



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA AEROSPAZIALE

**ANALISI DEI DATI SULLA
CARATTERIZZAZIONE DI FIBRE OTTICHE PER
LO SVILUPPO DEL NUOVO RIVELATORE DI
LUMINOSITÀ DELL'ESPERIMENTO ATLAS**

Relatore
Prof. Laura Fabbri

Presentata da
Gaia Gamberini

Correlatori
Dott. Federico Lasagni Manghi
Dott. Davide Cremonini

14/12/2023

Anno Accademico 2023/2024

Indice

Elenco delle figure	4
Elenco delle tabelle	7
Introduzione	8
1 LHC, ATLAS e luminosità	9
1.1 LHC	9
1.2 ATLAS	10
1.3 Luminosità	10
1.4 LUCID	11
2 Utilizzo delle fibre ottiche per la rivelazione della luminosità	13
2.1 Effetto Cherenkov	13
2.2 Rivelatore a fibre di LUCID	14
2.3 Irraggiamento delle fibre ad ENEA	15
2.4 Test delle fibre con luce impulsata e continua	17
2.4.1 Luce impulsata	17
2.4.2 Luce continua	21
3 Test beam	26
3.1 CLEAR in breve	26
3.2 Apparato sperimentale	26
3.3 Setup di acquisizione	27
3.4 Risultati preliminari	28
3.4.1 Scansioni angolari	28
3.4.2 Scansioni verticali	32
3.4.3 Scansioni con LED	35
3.5 Setup alternativi	39
3.5.1 Beam dark current: fibra non irraggiata	39
3.5.2 Beam dark current: fibre irraggiate	39
3.5.3 Beam dark current: PMT boosters	40
3.5.4 Irraggiamento con fascio ad alta intensità	41

4	Test in laboratorio	42
4.1	Analisi della forma del segnale dei PMT	42
4.1.1	Analisi del segnale dei PMT in funzione della luce	42
4.1.2	Analisi del segnale dei PMT in funzione dell'angolo di incidenza della luce	44
4.2	Analisi del segnale dei PMT in funzione della loro distanza dall'estremità della fibra	46
4.3	Test delle fibre con luce impulsata	48
4.4	Propagazione della luce nella fibra	49
4.5	Effetto dei segnali continui su PMT: beam dark current	51
5	Analisi a posteriori dei dati presi	55
5.1	Ampiezza e carica del segnale in funzione dell'angolo di incidenza	55
5.2	Ampiezza e carica del segnale in funzione dell'irraggiamento delle fibre	57
5.3	Indice di rifrazione	59
5.3.1	Indice di rifrazione utilizzando i minimi del segnale	59
5.3.2	Indice di rifrazione utilizzando il gradiente	60
5.3.3	indice di rifrazione utilizzando il tempo di arrivo	62
5.4	Distanza di propagazione della luce nella fibra	62
	Conclusioni	68
	Bibliografia	70

Elenco delle figure

1	LHC e la catena di accelerazione.	9
2	ATLAS con indicata la posizione dei due moduli di LUCID.	10
3	LUCID e i suoi principali componenti.	12
4	Onda elettromagnetica generata dal passaggio di una particella che viaggia a velocità minore (sinistra) e maggiore (destra) della velocità della luce nel mezzo considerato.	13
5	Spettro di emissione di luce Cherekov, per $300 \text{ nm} < \lambda < 650 \text{ nm}$	13
6	Rivelatore a fibre di LUCID.	14
7	(a) Schema di posizionamento delle fibre e dei dosimetri attorno alla fonte radioattiva. (b) Grafico della distribuzione della dose durante l'irraggiamento.	15
8	Perdite di trasmissione della fibra con apertura numerica di 0.28 a seguito dell'irraggiamento.	16
9	Apparato sperimentale utilizzato.	18
10	Segnali rilevati dal PMT per ogni LED utilizzato, per ciascuna fibra testata. La fibra irraggiata con apertura numerica di 0.28 è indicata come « <i>normal-irradiated fiber</i> », mentre la fibra irraggiata con apertura di 0.22 come « <i>different-irradiate fiber</i> ».	19
11	Rapporto fra le ampiezze del segnale della fibra e del segnale del LED, in funzione del LED utilizzato.	20
12	Rapporto fra le ampiezze del segnale della fibra e del segnale del LED, in funzione del LED utilizzato, normalizzato per la fibra non irraggiata (<i>non-irradiated fiber 2</i> , linea blu).	20
13	Rapporto fra cariche del segnale della fibra e del LED, in funzione del LED utilizzato.	21
14	Rapporto fra cariche del segnale della fibra e del LED, in funzione del LED utilizzato, normalizzato per la fibra non irraggiata (<i>non-irradiated fiber 2</i> , linea blu).	21
15	Apparato sperimentale utilizzato.	22
16	Rapporto tra ampiezza del segnale della fibra e del LED per ogni fibra, in funzione del LED utilizzato: 1° presa dati.	23
17	Rapporto tra ampiezza del segnale della fibra e del LED per ogni fibra, in funzione del LED utilizzato: 2° presa dati.	23
18	Rapporto tra ampiezza del segnale della fibra e del LED per ogni fibra, in funzione del LED utilizzato: 1° presa dati, normalizzato per la fibra non irraggiata.	24
19	Rapporto tra ampiezza del segnale della fibra e del LED per ogni fibra, in funzione del LED utilizzato: 2° presa dati, normalizzato per la fibra non irraggiata.	24
20	Apparato sperimentale utilizzato per il test beam. (a) Supporto delle fibre. (b) Alloggiamento delle spire nelle tre scanalature.	27
21	Segnale della scansione angolare della fibra irraggiata con apertura numerica 0.22 (scanalatura centrale), PMT R7459. L'asse x indica i campionamenti (ciascuno corrispondente a 1 ns), mentre l'asse y la rotazione del supporto rispetto alla configurazione nominale.	29
22	Segnale della scansione angolare della fibra non irraggiata con apertura numerica 0.28 (scanalatura centrale), PMT R1635. L'asse x indica i campionamenti (ciascuno corrispondente a 1 ns), mentre l'asse y la rotazione del supporto rispetto alla configurazione nominale.	30

23	Segnale della scansione angolare della fibra irraggiata con apertura numerica 0.28 (scanalatura centrale), PMT R760 66. L'asse x indica i campionamenti (ciascuno corrispondente a 1 ns), mentre l'asse y la rotazione del supporto rispetto alla configurazione nominale.	31
24	Segnale della scansione angolare del circuito di distribuzione LED, PMT R760 59. L'asse x indica i campionamenti (ciascuno corrispondente a 1 ns), mentre l'asse y la rotazione del supporto rispetto alla configurazione nominale.	32
25	Scansione verticale a -45° . L'asse x indica i campionamenti (ciascuno corrispondente a 1 ns), mentre l'asse y la posizione verticale del fascio di elettroni rispetto alle scanalature.	34
26	Scansione verticale a $+45^\circ$. L'asse x indica i campionamenti (ciascuno corrispondente a 1 ns), mentre l'asse y la posizione verticale del fascio di elettroni rispetto alle scanalature.	35
27	Scansione LED con $\lambda = 467.5$ nm per le tre fibre e il circuito di distribuzione.	36
28	Scansione LED con $\lambda = 385$ nm per le tre fibre e il circuito di distribuzione.	37
29	Scansione LED con $\lambda = 340$ nm per le tre fibre e il circuito di distribuzione.	37
30	Ampiezza minima per ogni PMT normalizzata per il PMT R760 59 connesso al circuito di distribuzione, in funzione del numero di scansioni verticali svolte.	38
31	Carica minima per ogni PMT normalizzata per il PMT R760 59 connesso al circuito di distribuzione, in funzione del numero di scansioni verticali svolte.	38
32	Segnale della scansione angolare della fibra non irraggiata con apertura numerica 0.28, PMT R760 59.	39
33	Scansione angolare con setup alternativo.	40
34	Segnale della scansione angolare della fibra non irraggiata con apertura numerica 0.28, PMT R760 59 con <i>boosters</i> connessi.	41
35	Segnale della scansione angolare della fibra irraggiata con apertura numerica 0.28, PMT R760 66.	41
36	Ampiezza e carica del segnale primario e rapporto tra le ampiezze delle spalle (precedente e successiva) e il segnale primario, in funzione della lunghezza del segnale di input del LED con $\lambda = 385$ nm.	43
37	Ampiezza e carica del segnale primario e rapporto tra le ampiezze delle spalle (precedente e successiva) e il segnale primario, in funzione della tensione del segnale di input del LED con $\lambda = 385$ nm.	43
38	Ampiezza e carica del segnale primario e rapporto tra le ampiezze delle spalle (precedente e successiva) e il segnale primario, in funzione della tensione del segnale di input del LED con $\lambda = 340$ nm.	44
39	Apparato sperimentale utilizzato.	44
40	Andamento del segnale rilevato dal PMT R7459 in funzione dell'angolo di incidenza della luce sulla finestra del PMT. (a) Ampiezza del segnale principale. (b) Carica del segnale principale. (c) Rapporto tra l'ampiezza della spalla precedente il segnale e l'ampiezza del segnale principale. (d) Rapporto tra l'ampiezza della spalla successiva il segnale e l'ampiezza del segnale principale.	45
41	Apparato sperimentale utilizzato.	46
42	Ampiezza e carica del segnale del PMT R7459 con copertura originale, PMT R670 66 come riferimento: funzione dell'angolo tra la luce LED e l'estremità della fibra.	47

43	Ampiezza e carica del segnale del PMT R7459 con copertura modificata, PMT R760 66 come riferimento: funzione dell'angolo tra la luce LED e l'estremità della fibra.	47
44	Ampiezza e carica del segnale del PMT R760 59 con copertura originale del PMT R16365, PMT R1635 con copertura modificata, PMT R760 66 come riferimento: funzione dell'angolo tra la luce LED e l'estremità della fibra.	48
45	Tempo di arrivo del segnale della fibra rispetto al segnale del LED, in funzione dell'angolo tra la luce e la fibra, quando questa si trova avvolta in spire (linea blu) e quando si trova stesa a «U» (linea rossa).	50
46	Tempo di arrivo del segnale della fibra rispetto al segnale del LED, in funzione dell'angolo tra la luce e la fibra, per diverse lunghezze d'onda della luce.	50
47	Ampiezza del segnale del fascio in presenza della <i>dark current</i> (segnale totale), ampiezza del solo segnale del fascio, ampiezza del solo segnale della <i>dark current</i>	52
48	Carica del segnale totale, carica del solo segnale del fascio, rapporto tra le cariche del segnale totale e del segnale del fascio: funzione della tensione di alimentazione dei PMT.	53
49	Carica del segnale totale, carica del solo segnale del fascio, rapporto tra le cariche del segnale totale e del segnale del fascio: funzione della tensione del LED della <i>dark current</i>	53
50	Carica del segnale totale, carica del solo segnale del fascio, rapporto tra le cariche del segnale totale e del segnale del fascio: funzione della frequenza del LED della <i>dark current</i>	54
51	Carica e rapporto tra la carica dei valori successivi e precedenti, per ogni scanalatura, in funzione dell'angolo di rotazione del supporto: fibra irraggiata con apertura numerica di 0.22, PMT R7459.	55
52	Carica e rapporto tra la carica dei valori successivi e precedenti, per ogni scanalatura, in funzione dell'angolo di rotazione del supporto: fibra non irraggiata con apertura numerica di 0.28, PMT R1635.	56
53	Carica e rapporto tra la carica dei valori successivi e precedenti, per ogni scanalatura, in funzione dell'angolo di rotazione del supporto: fibra irraggiata con apertura numerica di 0.28, PMT R760 66. Le linee rosse rappresentano la regione in cui la <i>dark current</i> del fascio rende poco attendibili i valori misurati.	57
54	Ampiezza e carica in funzione della posizione verticale del fascio, rapporto tra i minimi delle cariche e il primo picco in funzione della distanza del punto di generazione dal PMT: fibra irraggiata con apertura numerica di 0.22, PMT R7459.	58
55	(a) Rapporti tra le cariche delle scanalature ottenuti con le scansioni verticali (ultimo grafico di Fig. 54) e il minimo della carica della scanalatura inferiore. (b) Rapporti tra le cariche delle scanalature ottenuti con le scansioni angolari e il minimo della carica della scanalatura inferiore. (c) Rapporti tra le cariche delle scanalature ottenuti con le scansioni angolari, normalizzati per i rapporti della fibra non irraggiata, e il minimo della carica della scanalatura inferiore.	59
56	Generazione dell'effetto Cherenkov per il passaggio di una particella nel mezzo, avente una velocità maggiore della velocità di propagazione della luce nel mezzo stesso.	60
57	Gradienti lungo l'asse y del segnale di una scansione angolare, scanalatura centrale.	61
58	Segnale riflesso della scansione angolare della fibra irraggiata con apertura numerica 0.28 (PMT R760 66), [Fig. 23] con indicati i valori γ_{max} , γ , $\Delta\gamma$, $t(0.9*\gamma_{max})$, $t(0.9*\gamma)$, Δt	63
59	Distanza di propagazione effettiva della luce, per ogni scanalatura della fibra irraggiata con apertura numerica di 0.28 (PMT R760 66).	64

60	Modello bidimensionale della riflessione della luce nella fibra, generata per effetto Cherenkov dal passaggio delle particelle nella fibra stessa.	65
61	Analisi della distanza di propagazione della luce ottenuta col modello bidimensionale, per ogni scanalatura della fibra irraggiata con apertura numerica di 0.28 (PMT R760 66).	66
62	Schema della riflessione tridimensionale della luce sulla superficie cilindrica esterna della fibra.	67
63	Schema della distanza effettiva percorsa dalla luce nella fibra secondo il modello bidimensionale (sinistra) e tridimensionale (destra), rispetto alla lunghezza della fibra stessa.	67

Elenco delle tabelle

1	Parametri di alimentazione dei LED.	18
2	Perdita di ampiezza del segnale della fibra irraggiata con apertura numerica di 0.28, rispetto al segnale della fibra non irraggiata, in funzione della lunghezza d'onda. Confronto tra i valori ottenuti a seguito dell'irraggiamento γ_e dei test con luce impulsata e continua.	25
3	Perdita di ampiezza del segnale della fibra irraggiata con apertura numerica di 0.22, rispetto al segnale della fibra non irraggiata, in funzione della lunghezza d'onda. Confronto tra i valori ottenuti a seguito dei test con luce impulsata e continua.	25
4	Distanza dei punti delle fibre colpiti dal fascio rispetto all'estremità connessa al PMT corrispondente. La fibra irraggiata con apertura numerica di 0.28 presenta due spire nella prima scanalata. La seconda spira si trova a una distanza di 1430 mm dal PMT. Le fibre ottiche del circuito di distribuzione hanno una lunghezza di 660 mm.	27
5	Parametri di alimentazione dei LED (a) e dei PMT (b) utilizzati per il test.	42
6	Confronto tra le perdite della fibre irraggiate con apertura numerica di 0.28 e 0.22, rispetto alla fibra non irraggiata. Perdite rilevate nei test con la luce impulsata prima e dopo il <i>test beam</i> , confrontate con le perdite a seguito dell'irraggiamento γ	49
7	Parametri di alimentazione dei LED e dei PMT utilizzati durante i test.	51
8	Indici di rifrazione calcolati con i minimi della carica per le tre fibre testate, utilizzando per ciascuna i dati delle scansioni angolari di ogni scanalatura.	60
9	Indici di rifrazione calcolati con i minimi della carica per le tre fibre testate, utilizzando per ciascuna i dati delle scansioni angolari di ogni scanalatura.	62
10	Indice di rifrazione calcolato a partire dal tempo di arrivo del segnale della fibra rispetto al segnale del LED, in funzione della lunghezza d'onda della luce.	62

Introduzione

La luminosità è un parametro fondamentale per gli acceleratori di particelle, in quanto permette di determinarne le prestazioni. ATLAS è uno dei quattro grandi esperimenti presenti a LHC al CERN di Ginevra, e il suo luminometro principale è il rivelatore LUCID. In vista dell'imminente upgrade di LHC si è reso necessario un aggiornamento di LUCID. A tale scopo sono stati installati diversi prototipi, tra cui uno costituito da fibre ottiche in quarzo accoppiate a fotomoltiplicatori. Le particelle cariche prodotte dalle collisioni attraversano le fibre, generando per effetto Cherenkov una luce che si propaga lungo la fibra fino ad essere rivelata dai PMT. Per poter implementare questo metodo di rivelazione, è necessario applicare una correzione che tenga conto della perdita di trasmissione dovuta all'irraggiamento della fibra e della diversa produzione di luce in funzione della direzione di provenienza delle particelle. Per poter studiare questi fenomeni, è stato svolto un *test beam* utilizzando un fascio accelerato di elettroni presso l'area sperimentale di CLEAR. Sono state testate due fibre in quarzo precedentemente irraggiate e una fibra non irraggiata, fissate su un supporto rotante rispetto al fascio. Le perdite di trasmissione rilevate durante il *test beam* sono state confrontate con i risultati ottenuti da test condotti prima dell'esperimento. Questi test sono stati svolti utilizzando la luce di sei LED, con lunghezze d'onda appartenenti allo spettro UV e visibile. Lo studio dei dati raccolti durante il *test beam* ha evidenziato la presenza di diversi fenomeni che sono stati indagati in seguito tramite ulteriori esperimenti in laboratorio.

1.2 ATLAS

ATLAS è uno dei quattro esperimenti di LHC [2]. È un rivelatore cilindrico di 44 m di lunghezza e 25 m di diametro, composto da quattro componenti principali: l'*inner detector*, i calorimetri, il rivelatore di muoni e i magneti [Fig. 2]. L'*inner detector* si trova vicino al punto di interazione. È costituito da tre tipi di tracciatori, e permette di misurare il momento delle particelle cariche che lo attraversano ricostruendone la traiettoria. I calorimetri, di due diverse tipologie, permettono di determinare l'energia delle particelle, ad esclusione dei muoni. La loro energia viene invece misurata dallo spettrometro di muoni tramite l'analisi del braccio più lungo delle traiettorie, che permette di determinare con maggiore precisione le proprietà di tali particelle. Questi rivelatori sono situati nella parte più esterna di ATLAS. Infine, un magnete solenoidale interno e una serie di magneti toroidali nella regione esterna curvano le traiettorie delle particelle cariche, permettendo di misurarne la quantità di moto. L'analisi combinata permette di determinare la tipologia e le quantità dinamiche e di moto delle particelle prodotte dalle collisioni.

Alle due estremità di ATLAS, posizionati sulla *beam pipe*, sono alloggiati i rivelatori di luminosità che compongono LUCID, di cui si parlerà in seguito.

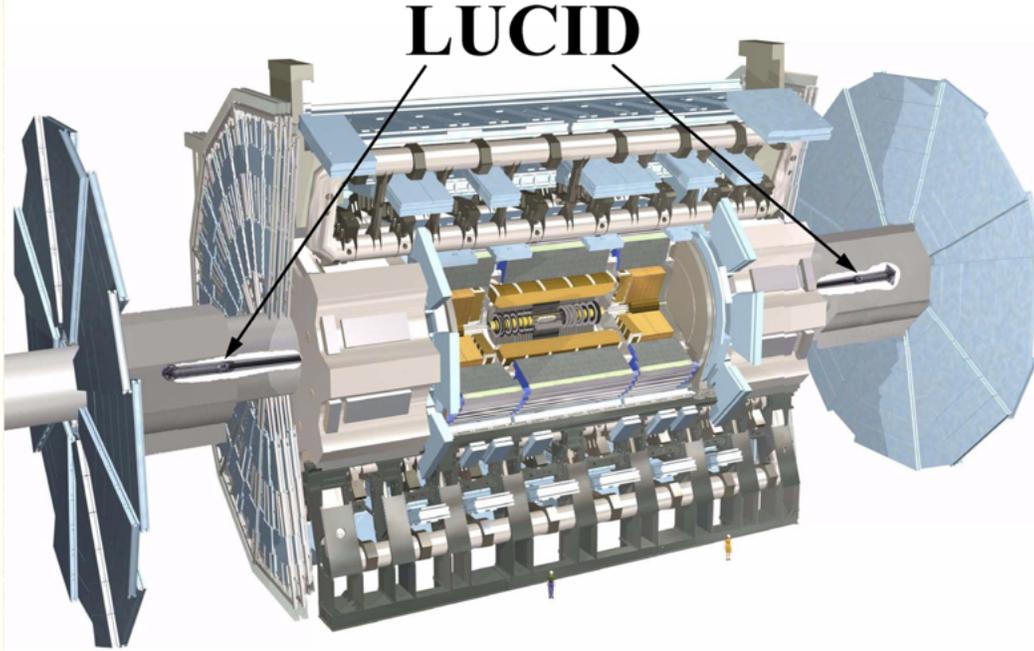


Figura 2: ATLAS con indicata la posizione dei due moduli di LUCID.

1.3 Luminosità

La luminosità L è definita come il rapporto tra il rate di un processo fisico R considerato per unità di tempo e la relativa sezione d'urto σ [3]. La misura della luminosità indica la performance del *collider*, permettendo di valutare le prestazioni della macchina in tempo reale e ottimizzare le collisioni. La luminosità così definita viene indicata come luminosità istantanea, e fluttua su scale di tempo dalle decine di nanosecondi al minuto.

A partire da tale definizione, la luminosità integrata viene indicata come $\int L dt$, ed è riferita alla luminosità istantanea accumulata nel corso del tempo. L'evoluzione di questo parametro nel lungo periodo

permette di determinare in modo diretto le prestazioni del *collider*. Inoltre, è possibile distinguere la luminosità assoluta e le misure di variazione relativa della luminosità.

- La luminosità assoluta viene espressa attraverso una scala assoluta, la quale viene determinata da opportune calibrazioni: nel caso di LHC si utilizzano delle scansioni Van der Meer. La luminosità assoluta è il parametro necessario per misurare la sezione d'urto [4];
- La luminosità relativa è utilizzata per determinare la variazioni di luminosità istantanee in un determinato periodo di tempo, e quindi di valutare in tempo reale le prestazioni della macchina. Inoltre, costituisce il primo passo per ottenere una stima corretta della luminosità integrata.

La misura della luminosità del fascio è descritta dalla formula $L = R/\sigma$. Sebbene la scelta del processo sia arbitraria, questo può essere individuato nelle interazioni inelastiche delle particelle. Per la misura di luminosità di un singolo *bunch*, il rate può essere espresso come $R = \mu f$, ossia il prodotto tra il numero medio di interazioni per *bunch crossing* (μ) e la frequenza di rivoluzione (f). La luminosità è esprimibile quindi come $L = \mu f/\sigma$. Dal momento che il rapporto tra frequenza e sezione d'urto è noto, per ricavare la luminosità è necessario determinare μ . Esistono diversi metodi per effettuare questa misura [5].

1. *Event counting*: questo metodo di misura conta il numero di eventi in cui il rivelatore considerato genera un segnale con determinate caratteristiche. Sebbene sia la metodologia più semplice da applicare, perde efficacia se il numero medio di interazioni è elevato.
2. *Hit counting*: in questo metodo viene contato, in ogni *bunch-crossing*, il numero di segmenti del rivelatore che hanno prodotto un segnale. Gli algoritmi che si basano su questo metodo sono caratterizzati da una maggiore sensibilità e da una soglia di saturazione più elevata.
3. *Particle counting*: a partire da quantità misurate dai rivelatori, o da quantità che dipendono dal flusso di particelle, viene ricostruito il numero di particelle per *bunch crossing*. Il numero medio di interazioni viene ottenuto misurando il numero di tracce o il numero dei vertici di interazione. Tali quantità misurate sono direttamente proporzionali alla luminosità. Un esempio dell'utilizzo di questa tecnica è rappresentato dai tracciatori ad alta precisione, i quali permettono di ricostruire le tracce delle particelle cariche e i loro vertici di interazione. Un altro esempio è costituito dalle correnti nei fotomoltiplicatori di alcune sezioni dei calorimetri. Gli algoritmi utilizzati sono caratterizzati da un'alta soglia di saturazione, ma spesso richiedono un'acquisizione complessa che non può essere sostenuta alla massima frequenza di interazione di ATLAS (40 MHz).

1.4 LUCID

Il LUCID (*L*Uminosity measurement using a *C*herenkov *I*ntegrating *D*etector) è il principale rivelatore di luminosità di ATLAS [6]. È composto da due moduli situati simmetricamente a 17 m dal punto di interazione, attorno alla *beam pipe*. Ogni modulo è composto da 16 fotomoltiplicatori divisi in quattro gruppi, situati lungo la *beam pipe* [Fig. 3]. Ogni PMT è composto da una finestra in quarzo in cui, quando attraversata dalle particelle prodotte dalle collisioni, viene generata luce per effetto Cherenkov. Dietro tale finestra è presente un materiale fotoelettrico, che converte in elettroni la luce generata. Attraverso una serie di dinodi la corrente prodotta viene amplificata per permettere la rilevazione del segnale [7]. Il metodo principale per la misura della luminosità di LUCID consiste nell'*hit counting*, in cui ogni PMT conta una *hit* se il segnale supera una soglia configurabile.

Fanno parte di LUCID anche alcuni prototipi installati in ATLAS per l'utilizzo nel futuro upgrade di LHC (HL-LHC). Il prototipo di interesse per questa tesi consiste in due fasci di fibre ottiche in quarzo, che scendono da una zona schermata dalle radiazioni. Questi percorrono 2 m parallelamente alla *beam*

pipe, curvano attorno ad essa e tornano indietro in una zona schermata, in cui sono installati due PMT per la lettura della luce Cherenkov prodotta nelle fibre stesse. Questo metodo di rivelazione viene approfondito in seguito [Cap. 2.2].

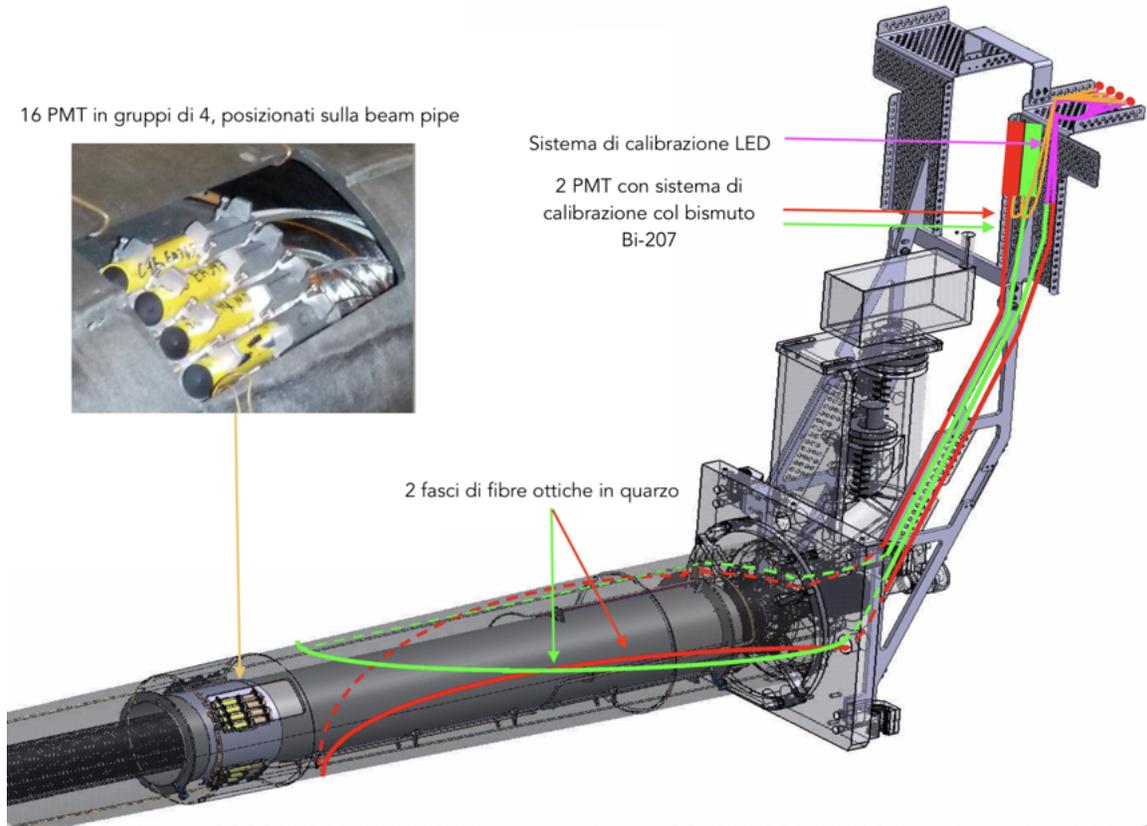


Figura 3: LUCID e i suoi principali componenti.

2 Utilizzo delle fibre ottiche per la rivelazione della luminosità

2.1 Effetto Cherenkov

L'effetto Cherenkov [8] è un fenomeno che si verifica quando una particella carica attraversa un mezzo con una velocità superiore alla velocità della luce in quello stesso mezzo. Il campo elettrico della particella polarizza il mezzo, che ritorna al suo stato originario dopo il passaggio della particella. Questa perturbazione elettromagnetica generata si propaga alla velocità della luce nel mezzo. Tale velocità si esprime come c/n , dove c è la velocità della luce nel vuoto e n è l'indice di rifrazione del materiale.

Nel caso in cui la particella abbia una velocità v superiore a c/n , le perturbazioni elettromagnetiche causate dalla polarizzazione generano una luce che si propaga su una superficie conica. La direzione di propagazione della luce generata è espressa dall'angolo Cherenkov θ_c , che si ricava dalla formula $\cos\theta_c = \frac{(c/n)t}{vt} = \frac{c}{nv}$ [Fig. 4]. L'emissione della luce Cherenkov si concentra nello spettro ultravioletto [Fig. 5].

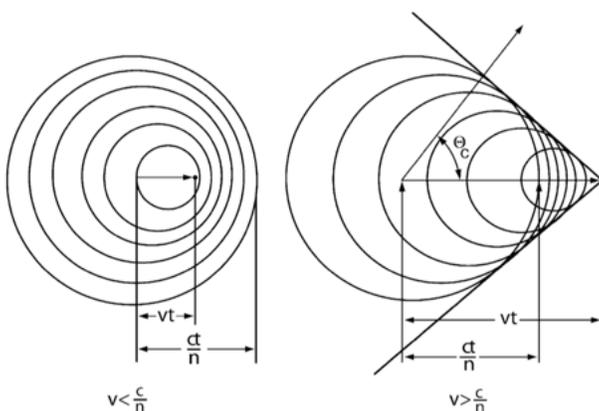


Figura 4: Onda elettromagnetica generata dal passaggio di una particella che viaggia a velocità minore (sinistra) e maggiore (destra) della velocità della luce nel mezzo considerato.

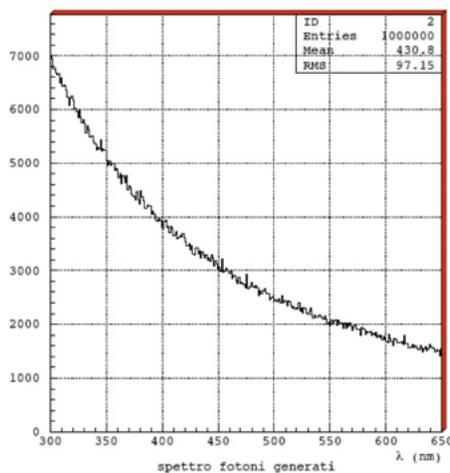


Figura 5: Spettro di emissione di luce Cherenkov, per $300 \text{ nm} < \lambda < 650 \text{ nm}$.

2.2 Rivelatore a fibre di LUCID

Il rivelatore LUCID-2, attualmente operante nell'esperimento ATLAS, utilizza come metodo rivelazione della luminosità la luce Cherenkov prodotta dal passaggio delle particelle cariche attraverso la finestra in quarzo dei PMT. In aggiunta, è stato introdotto un nuovo prototipo di rivelatore, composto da due fasci di fibre ottiche in quarzo connessi a ulteriori PMT [9]. In questo caso, la luce Cherenkov viene generata dal passaggio delle particelle cariche attraverso le fibre, lungo le quali la luce giunge ai PMT, dove viene rivelata. Questo prototipo di rivelatore permette di installare i PMT in una zona più riparata dalle radiazioni, garantendone una maggiore vita operativa [Fig. 6].

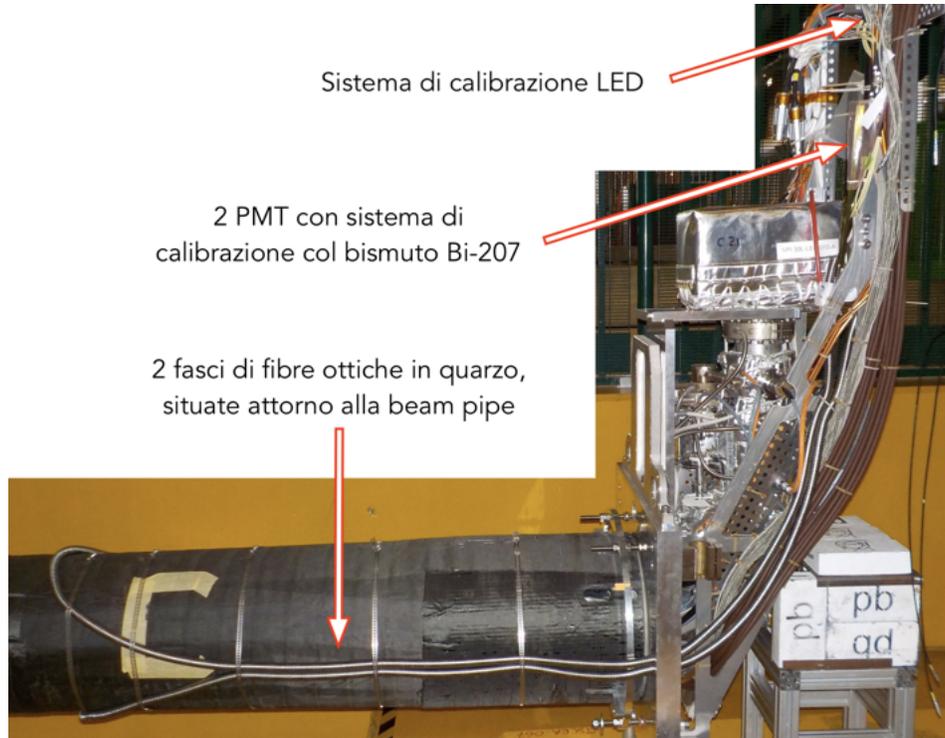


Figura 6: Rivelatore a fibre di LUCID.

L'operatività del rivelatore a fibre dipende da diversi parametri, primo fra questi la *radiation hardness* del materiale utilizzato. Le fibre utilizzate sono infatti esposte a un'elevata dose di radiazioni, ed è quindi necessario impiegare materiali e rivestimenti opportuni. L'invecchiamento delle fibre è tuttavia inevitabile, ed è fondamentale poter effettuare una correzione che tenga in considerazione questo fenomeno. Attualmente, la capacità di trasmissione delle fibre è monitorata tramite un sistema di calibrazione che utilizza LED in grado di emettere luce a sei lunghezze d'onda diverse, tra 310 nm e 660 nm. Tramite un circuito di distribuzione, i LED sono connessi sia a un'estremità dei fasci di fibre che ai PMT utilizzati. I PMT rilevano quindi sia il segnale diretto dei LED che il segnale della luce prodotta dai LED propagatasi lungo la fibra. Il confronto tra il segnale del LED e il segnale della fibra permette di determinare eventuali perdite di trasmissione della fibra. Tuttavia, questo sistema non è sufficiente in quanto la luce prodotta per effetto Cherenkov ha caratteristiche differenti rispetto alla luce dei LED. Infatti, mentre la luce dei LED è monocromatica ed è generata assialmente alla fibra, la luce prodotta per effetto Cherenkov è formata da una sovrapposizione di diverse lunghezze d'onda, che si propaga su una superficie conica attorno alla direzione di provenienza delle particelle.

Per effettuare una correzione per questo metodo di rivelazione, è necessario studiare il segnale in funzione dell'irraggiamento della fibra e dell'angolo di incidenza tra la fibra e le particelle cariche. A tale scopo, è stato svolto un test beam per poter analizzare segnali prodotti da una luce Cherenkov, così come avviene durante i *run* di LHC.

2.3 Irraggiamento delle fibre ad ENEA

Per studiare il comportamento delle fibre quando irraggiate, è stata svolta una sessione di irraggiamento nei laboratori Calliope di ENEA [10]. Lo scopo primario di questo test è l'analisi della perdita di trasmissione della luce nelle fibre in funzione dell'irraggiamento e della lunghezza d'onda della luce stessa. L'irraggiamento è stato completato dal gruppo di ricerca prima dell'inizio della mia attività di tesi.

Setup sperimentale Sono state testate quattro fibre in quarzo, modello UVNSS600/624/660, di cui tre sono state sottoposte a una sessione di irraggiamento γ .

1. Fibra non irraggiata, con apertura numerica di 0.28;
2. Due fibre irraggiate, con apertura numerica di 0.28;
3. Fibra irraggiata, con apertura numerica di 0.22. Tale fibra presenta caratteristiche diverse rispetto alle precedenti, in quanto facente parte di un altro slot produttivo.

Prima di effettuare l'irraggiamento, le fibre sono state testate utilizzando diversi LED, con lunghezze d'onda nello spettro della luce visibile e dell'ultravioletto. Si sono utilizzati tre LED ultravioletti (MTE280F13-UV con $\lambda = 280$ nm, MTE340H21 con $\lambda = 340$ nm, VAOL-5GUV8T4 con $\lambda = 385$ nm), e un LED RGB (LEDRGBE con $\lambda = 627.5$, $\lambda = 525$, $\lambda = 467.5$ nm). Tramite un circuito di distribuzione, i LED sono stati connessi a un'estremità di ciascuna fibra e a un primo *pin-diode*. Le estremità opposte delle fibre sono state connessi a un secondo circuito di distribuzione, a sua volta connesso al secondo *pin-diode*. I LED sono stati alimentati tramite un circuito connesso a un Arduino, per poter fornire la giusta tensione di alimentazione a ciascun LED. Il primo *pin-diode* viene letto da un *sourcemeter*, mentre il secondo da un picoamperometro. Confrontando i segnali della luce generata dai LED coi segnali della luce propagatasi lungo la fibra, si sono ottenuti i valori di riferimento sul comportamento delle fibre non irraggiate.

In seguito, le fibre ottiche sono state esposte a un irraggiamento γ . Le tre fibre sono state posizionate attorno a una fonte di ^{60}Co [Fig. 7a], e tramite dei dosimetri si è misurata la dose assorbita durante l'irraggiamento [Fig. 7b]. In contemporanea, è stato svolto l'esperimento precedentemente descritto.

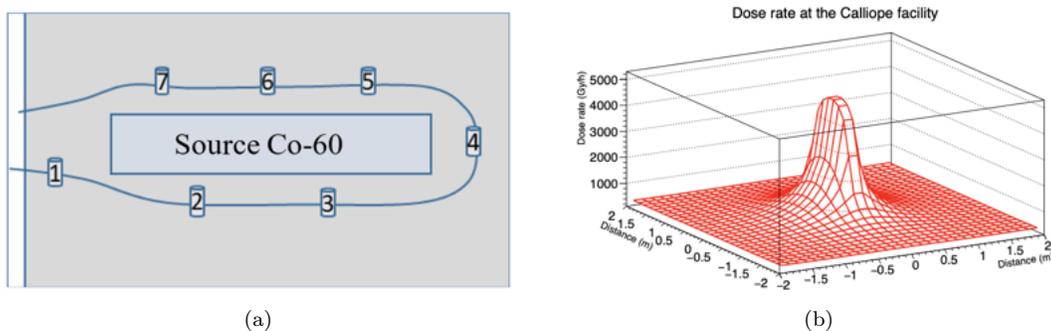


Figura 7: (a) Schema di posizionamento delle fibre e dei dosimetri attorno alla fonte radioattiva. (b) Grafico della distribuzione della dose durante l'irraggiamento.

Analisi dei risultati Una volta concluso l'irraggiamento, per ogni LED utilizzato si è calcolato il rapporto tra il segnale del LED e il segnale della fibra (acquisiti dai due *pin-diode*), per determinare la perdita di trasmissione delle fibre in funzione del tempo. Per ragioni sperimentali, la fibra con apertura numerica di 0.22 non è stata monitorata durante l'irraggiamento, perciò si sono ottenute le perdite relative alla fibra con apertura numerica di 0.28. Dai risultati ottenuti, le perdite maggiori si riscontrano nello spettro UV, dove raggiungono il 97%. All'aumentare della lunghezza d'onda le perdite diminuiscono, fino a raggiungere valori compresi tra il 19% e il 34% per lo spettro visibile [Fig. 8].

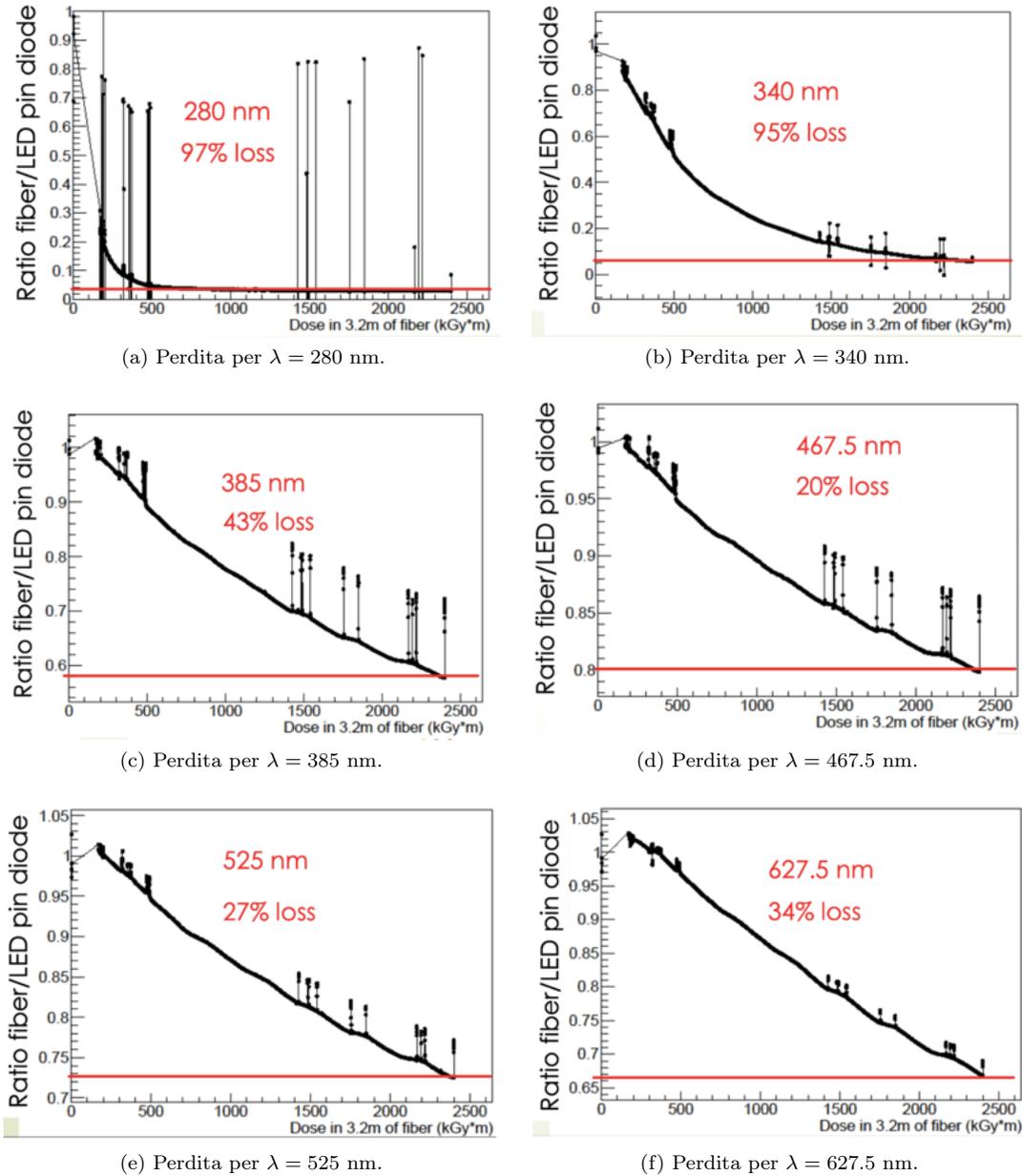


Figura 8: Perdite di trasmissione della fibra con apertura numerica di 0.28 a seguito dell'irraggiamento.

2.4 Test delle fibre con luce impulsata e continua

Per poter interpretare correttamente i risultati del *test beam*, è necessario comprendere il comportamento delle fibre ottiche testate. A questo scopo, sono stati effettuati diversi test per verificare la risposta delle fibre a differenti segnali di input. In questi esperimenti, da cui è cominciata la mia attività di tesi, sono state testate tre fibre in quarzo, di cui due precedentemente irraggiate.

Per studiare la variazione di trasmissione della luce in funzione della lunghezza d'onda, sono stati analizzati i segnali generati da quattro differenti LED. Si sono utilizzati tre LED ultravioletti (con $\lambda = 280$, $\lambda = 340$, $\lambda = 385$ nm), e un LED RGB (con $\lambda = 627.5$, $\lambda = 525$, $\lambda = 467.5$ nm). Sono stati utilizzati dei LED UV in quanto la maggior parte dei fotoni emessi per effetto Cherenkov appartiene allo spettro ultravioletto. Inoltre, l'efficienza quantica dei PMT è definita come il rapporto tra il numero di fotoelettroni emessi e il numero di fotoni incidenti sulla finestra del PMT. Questa è funzione della lunghezza d'onda e raggiunge il suo massimo per $\lambda = 380$ nm.

Nei test condotti in laboratorio spesso sono stati utilizzati due circuiti di distribuzione della luce, che permettono di dividere uniformemente la luce proveniente da un'unica fonte. Il primo circuito è composto da fibre ottiche in materiale plastico, e presenta quattro input e tre output. Il secondo circuito è composto da tre fibre ottiche in quarzo, che convergono in un unico output.

2.4.1 Luce impulsata

Per comparare il segnale trasmesso dalle fibre irraggiate rispetto a quella non irraggiata, le fibre sono state testate utilizzando la luce impulsata proveniente da quattro differenti LED. Confrontando i risultati ottenuti coi valori dei test effettuati dopo la sessione di irraggiamento, si vuole verificare l'eventuale variazione nel comportamento delle fibre a seguito di un possibile recupero del materiale.

Apparato sperimentale Per mantenere i LED in una posizione fissa per ogni test, in modo da evitare effetti sistematici dovuti a cambi di posizione dei LED, si è utilizzato un circuito di distribuzione della luce composto da tre fibre di input e quattro di output. Ad ognuna delle quattro fibre di input è stato connesso un LED, mentre la fibra in quarzo da testare è stata connessa a una delle tre fibre di output. Infine, un PMT è stato posizionato all'estremità opposta della fibra per la rilevazione del segnale. Questo è stato connesso alla LUCROD, la scheda elettronica utilizzata in LUCID per l'acquisizione dei segnali, riproducendo il sistema di monitoraggio delle fibre utilizzato in ATLAS.

Per questo esperimento si è utilizzato un PMT R760, ed ognuna delle tre fibre è stata testata con ciascuno dei LED. I LED sono stati alimentati singolarmente tramite un impulsatore. I parametri utilizzati per ogni LED [Tab. 1] permettono di ottenere un segnale rilevabile per ognuna delle fibre testate. Infatti, le fibre irraggiate sono caratterizzate da una perdita di segnale dovuta all'invecchiamento del materiale. Se il segnale di input proveniente dal LED fosse troppo basso, il segnale di output non sarebbe rilevabile. D'altra parte, se il segnale di input fosse troppo elevato, la lettura dell'output delle fibre non irraggiate sarebbe affetto da saturazione.

λ LEDs	<i>Amplitude</i>	<i>Width</i>	<i>PMT tension</i>
280 nm	5.0 V	30.0 ns	850 V
340 nm	5.0 V	23.3 ns	850 V
385 nm	2.6 V	8.0 ns	800 V
467.5 nm	2.7 V	7.0 ns	800 V
525 nm	3.8 V	7.0 ns	800 V
627.5 nm	2.1 V	10.0 ns	800 V

Tabella 1: Parametri di alimentazione dei LED.

Per eliminare le instabilità a cui i LED sono soggetti, è necessario leggere il segnale emesso dal LED stesso. In questo modo è possibile calcolare il rapporto tra il segnale del LED e quello trasmesso dalla fibra, per eliminarne gli errori. A questo scopo, si è utilizzato il secondo circuito di distribuzione della luce, alloggiato all'interno della scatola nera. Uno dei tre input è stato connesso all'estremità finale della fibra da testare, mentre un secondo è stato connesso a una delle fibre di output della scatola grigia (primo circuito di distribuzione). Infine, il PMT è stato connesso all'output comune [Fig. 9]. In questo modo, il PMT rileva sia la luce generata dal LED che la luce trasmessa dalla fibra. Nonostante entrambi i segnali vengano letti dallo stesso PMT, questi non si intersecano. Infatti, dovendo percorrere l'intera lunghezza della fibra da testare, il segnale proveniente dalla fibra arriva con un certo ritardo rispetto al segnale della luce emessa dal LED.

Una settimana dopo, l'esperimento è stato ripetuto con la fibra non irraggiata, dal momento che alcuni dati non sono stati salvati correttamente. Questa presa dati viene indicata come «fibra non irraggiata 2».

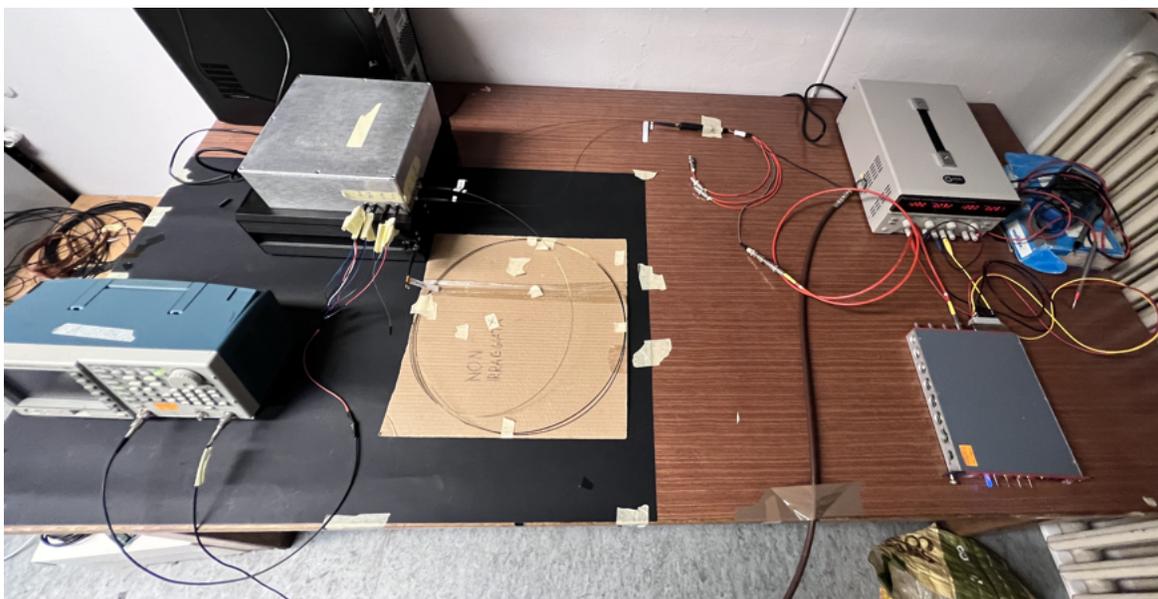


Figura 9: Apparato sperimentale utilizzato.

Analisi dei dati Dal momento che il PMT è connesso sia alla fibra che al LED, nel segnale rilevato possono essere individuati due picchi distinti [Fig. 10]. Questi risultano essere facilmente identificabili,

essendo separati temporalmente. Ciò è vero ad esclusione del LED verde, a causa di caratteristiche proprie del LED, ma non rientra tra le lunghezze d'onda di maggiore interesse per lo studio dell'emissione Cherenkov.

Inizialmente si è calcolata l'ampiezza dei due picchi. Per ogni LED di ciascuna fibra, sono stati identificati i massimi dei due segnali. A tali valori è stata sottratta la *baseline*, ottenuta come la media dei primi 20 campionamenti, per ottenere l'ampiezza assoluta. Per eliminare l'instabilità intrinseca dei segnali emessi dai LED, si è calcolato il rapporto tra la media del segnale diretto e quella del segnale trasmesso dalla fibra. Infine, i valori ottenuti sono stati normalizzati dividendo per i valori relativi alla fibra non irraggiata. Questo ha permesso di evidenziare le eventuali perdite di segnale attese nelle fibre irraggiate.

In un secondo tempo, è stata calcolata la carica dei segnali rilevati. Per ogni evento è stato calcolato il minimo fra i due picchi, per poterli separare. A partire da tale punto, è stata calcolata la somma dei 10 punti precedenti (appartenenti al segnale del LED) e dei 10 punti successivi (appartenenti al segnale della fibra). In seguito, il valore della *baseline* è stata moltiplicata per 10 e sottratta ai valori precedentemente trovati. Infine, è stato calcolato il rapporto fra la carica del segnale della fibra e quella del LED.

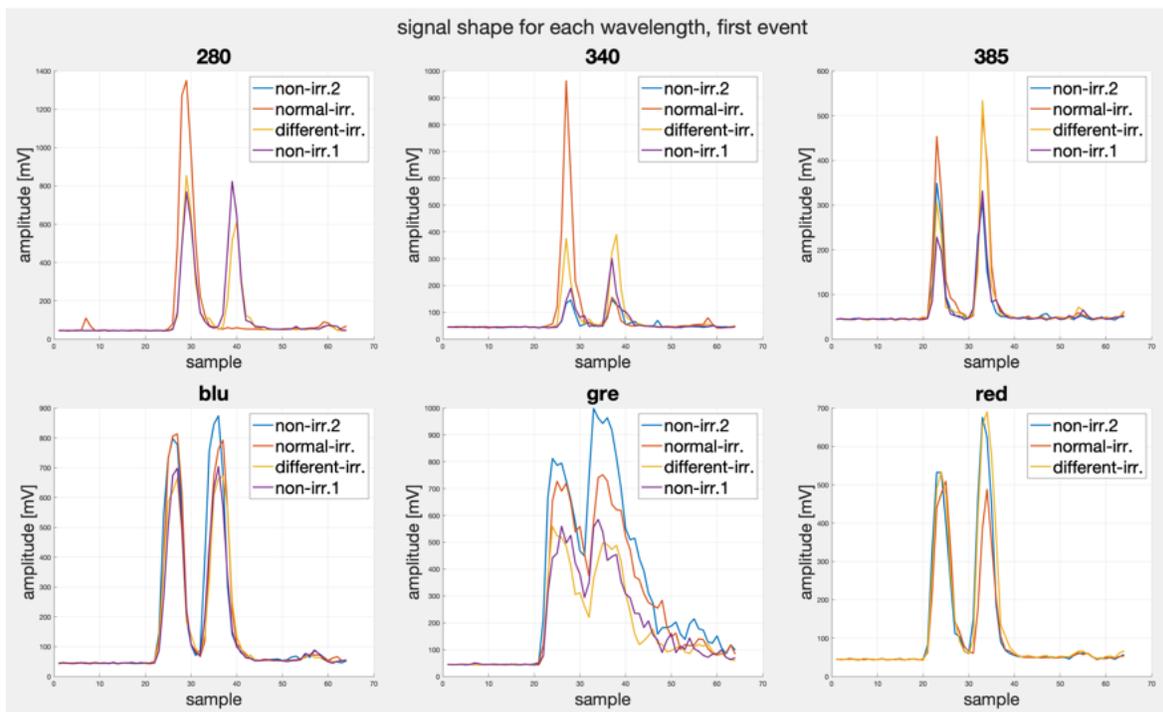


Figura 10: Segnali rilevati dal PMT per ogni LED utilizzato, per ciascuna fibra testata. La fibra irraggiata con apertura numerica di 0.28 è indicata come «*normal-irradiated fiber*», mentre la fibra irraggiata con apertura di 0.22 come «*different-irradiate fiber*».

Risultati ottenuti Dai risultati ottenuti, è emerso che la fibra irraggiata con apertura numerica di 0.28 ha una perdita di trasmissione della luce considerevole rispetto la fibra non irraggiata, come atteso. Le perdite registrate sono comparabili con i risultati ottenuti dopo l'irraggiamento γ . Invece, la fibra irraggiata con apertura numerica di 0.22 non presenta una perdita significativa rispetto alla fibra non irraggiata [Fig. 11, 12, 13, 14]. La spiegazione di questo fenomeno non è chiara, ma può essere

dovuto alle differenti caratteristiche di produzione della fibra, come la minore apertura numerica e la tipologia di rivestimento.

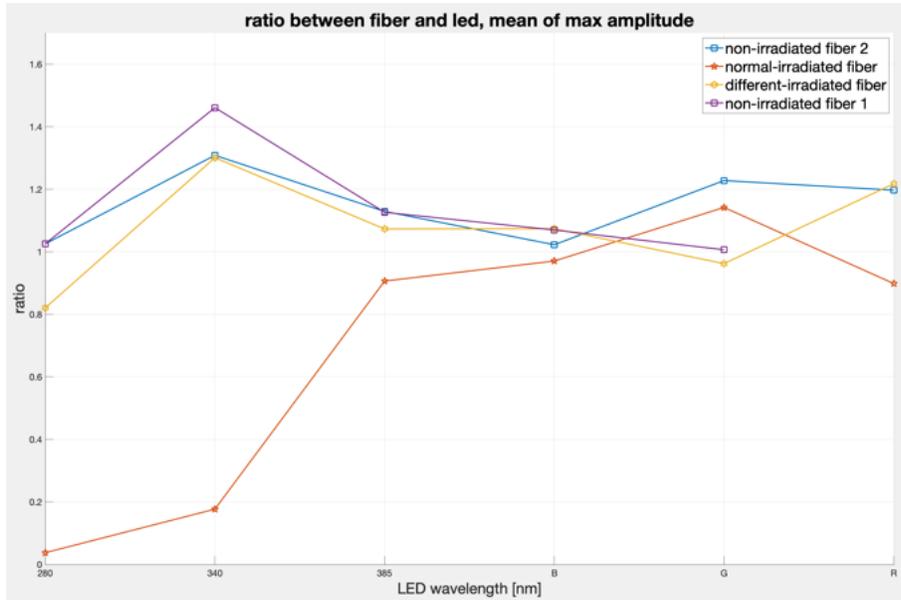


Figura 11: Rapporto fra le ampiezze del segnale della fibra e del segnale del LED, in funzione del LED utilizzato.

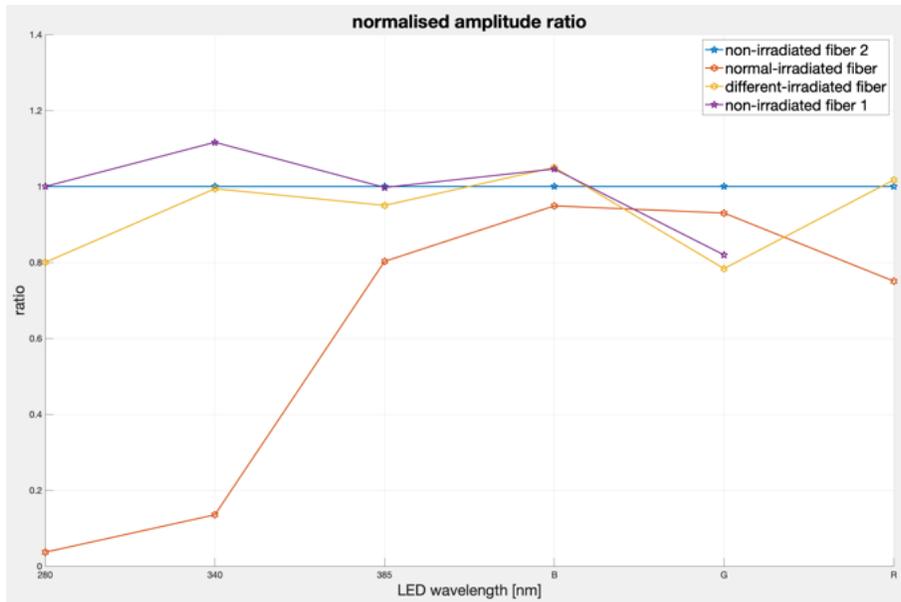


Figura 12: Rapporto fra le ampiezze del segnale della fibra e del segnale del LED, in funzione del LED utilizzato, normalizzato per la fibra non irradiata (*non-irradiated fiber 2*, linea blu).

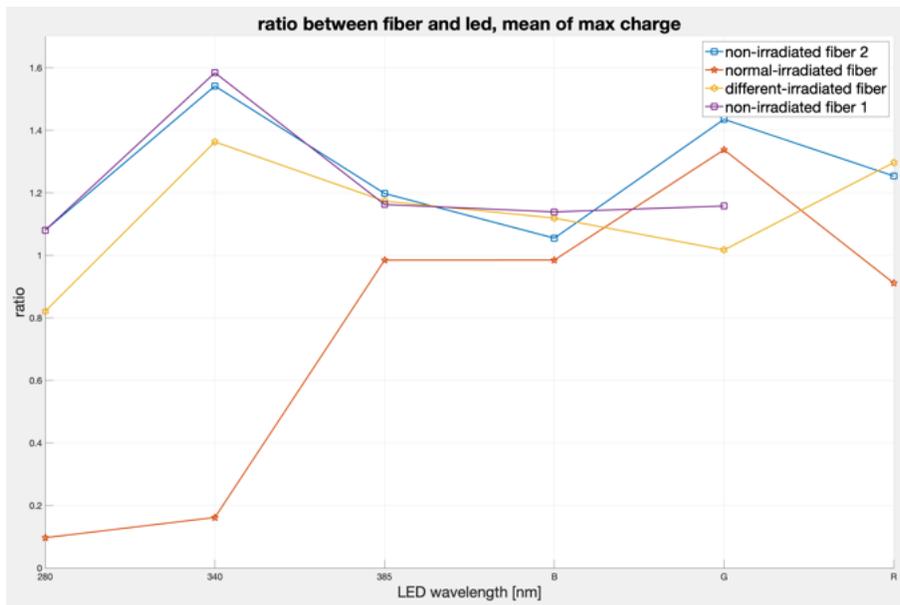


Figura 13: Rapporto fra cariche del segnale della fibra e del LED, in funzione del LED utilizzato.

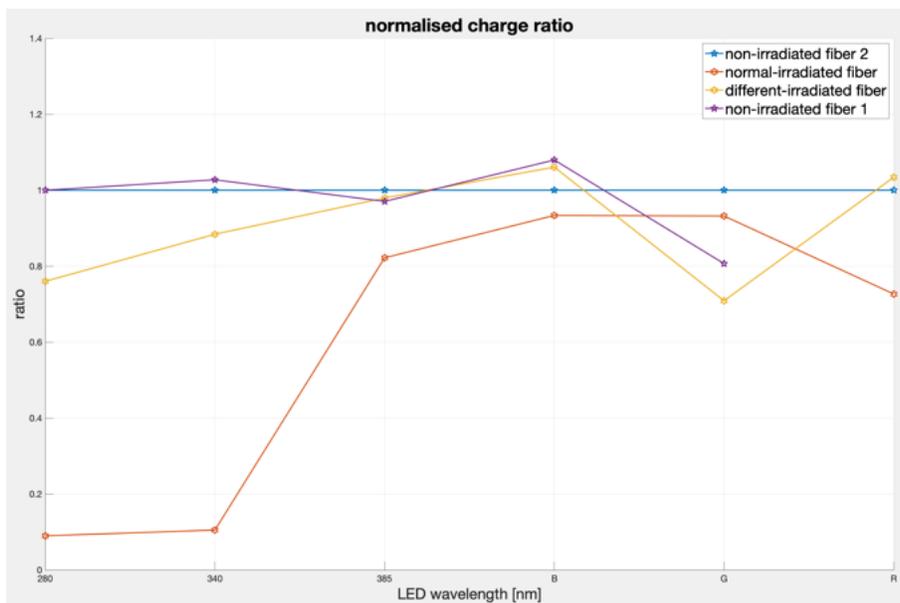


Figura 14: Rapporto fra cariche del segnale della fibra e del LED, in funzione del LED utilizzato, normalizzato per la fibra non irraggiata (*non-irradiated fiber 2*, linea blu).

2.4.2 Luce continua

Per comparare i risultati ottenuti in precedenza, è stato condotto un ulteriore test sulla trasmissione del segnale nelle fibre, utilizzando la luce continua. È stato riprodotto lo stesso apparato sperimentale utilizzato durante la sessione di irraggiamento delle fibre.

Apparato sperimentale Dal momento che i LED sono alimentati continuamente, non è possibile utilizzare i PMT per la lettura del segnale, poiché sono strumenti progettati per rilevare minori quantitativi di luce. Per questo test i segnali sono stati rilevati da due *pin diode*. I quattro LED con cui le fibre sono state testate sono stati connessi alle quattro fibre di input del circuito di distribuzione contenuto nella scatola grigia. I LED sono stati alimentati tramite un circuito connesso a un Arduino, che fornisce una tensione di 5 V. Tale circuito presenta opportune resistenze, che permettono di ottenere per ogni LED la giusta tensione di alimentazione. Tramite i comandi dell'Arduino, ogni LED è stato acceso singolarmente. Il circuito di distribuzione divide la luce di ogni led in due uscite. Il primo output è connesso alla fibra da testare, mentre il secondo output trasmette la luce prodotta dal LED al primo *pin diode*, che viene letto da un *sourcemeter*. Questa misura permette di determinare il segnale della luce emessa direttamente dal LED. L'estremità opposta della fibra da testare è stata connessa alla scatola nera, che contiene il secondo circuito di distribuzione della luce. La fibra di output della scatola nera è connessa al secondo *pin diode*, per la lettura del segnale trasmesso dalla fibra. Il *pin diode* viene letto da un picoamperometro [Fig. 15].

Per ognuna delle tre fibre sono stati acquisiti quattro cicli di misurazioni. Ogni ciclo è composto dall'accensione dei sei LED utilizzati (3 LED UV e un LED RGB) e da una settimana misura di buio, ottenuta con tutti i LED spenti. Tale valore permette di valutare la componente di luce naturale presente nella stanza.

Tre giorni dopo, il test è stato condotto connettendo la fibra da testare a diversi connettori delle scatole grigia e nera, per verificare la presenza di eventuali variazioni. In questo caso, è stato raccolto un numero minore di dati.

Analisi dei dati Inizialmente il segnale di *void*, ottenuto coi LED spenti, è stato sottratto dagli altri valori per eliminare l'influenza della luce ambientale. Per eliminare l'instabilità intrinseca dei segnali emessi dai LED, per ogni lunghezza d'onda si è calcolato il rapporto tra il segnale prodotto dalla luce nel *pin diode* posto al termine della fibra e quello posto direttamente all'uscita della scatola di distribuzione della luce. Infine, per ogni LED si è calcolata la media dei quattro rapporti, ciascuno corrispondente a un ciclo di misurazione. Questi valori sono stati normalizzati dividendoli per quelli della fibra non irraggiata.

Risultati ottenuti Coerentemente con i test effettuati con la luce impulsata, è emerso che la fibra irraggiata con apertura numerica di 0.28 ha una perdita di trasmissione della luce considerevole rispetto la fibra non irraggiata, come atteso. Le perdite registrate sono comparabili con i risultati ottenuti dopo l'irraggiamento γ alla fibra. Invece, la fibra irraggiata con apertura numerica di 0.22 non presenta una perdita significativa rispetto alla fibra non irraggiata [Fig. 16, 17, 18, 19, Tab. 2, 3].

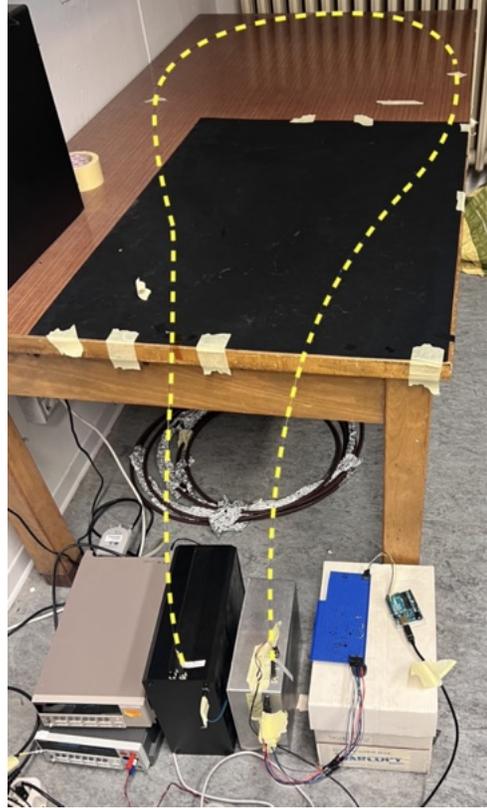


Figura 15: Apparato sperimentale utilizzato.

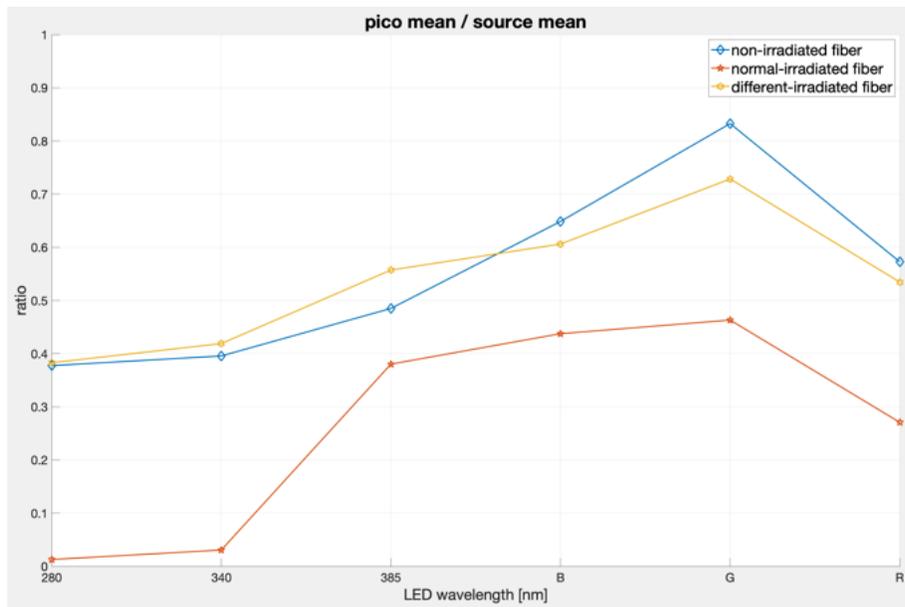


Figura 16: Rapporto tra ampiezza del segnale della fibra e del LED per ogni fibra, in funzione del LED utilizzato: 1° presa dati.

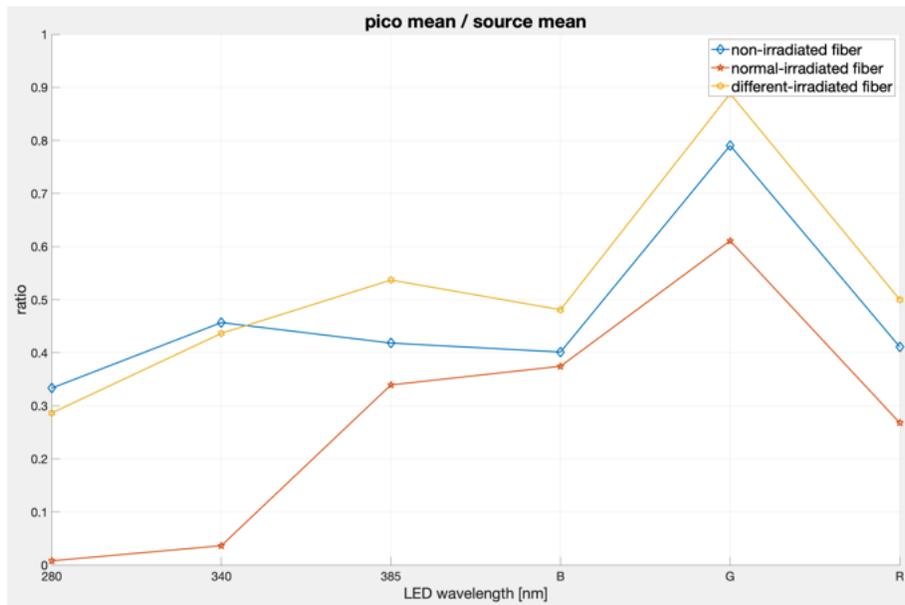


Figura 17: Rapporto tra ampiezza del segnale della fibra e del LED per ogni fibra, in funzione del LED utilizzato: 2° presa dati.

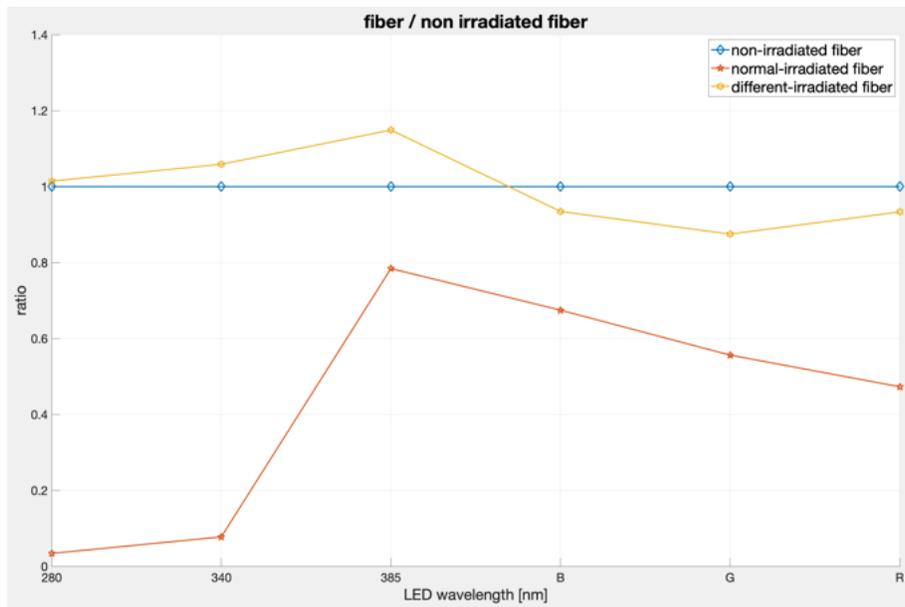


Figura 18: Rapporto tra ampiezza del segnale della fibra e del LED per ogni fibra, in funzione del LED utilizzato: 1° presa dati, normalizzato per la fibra non irradiata.

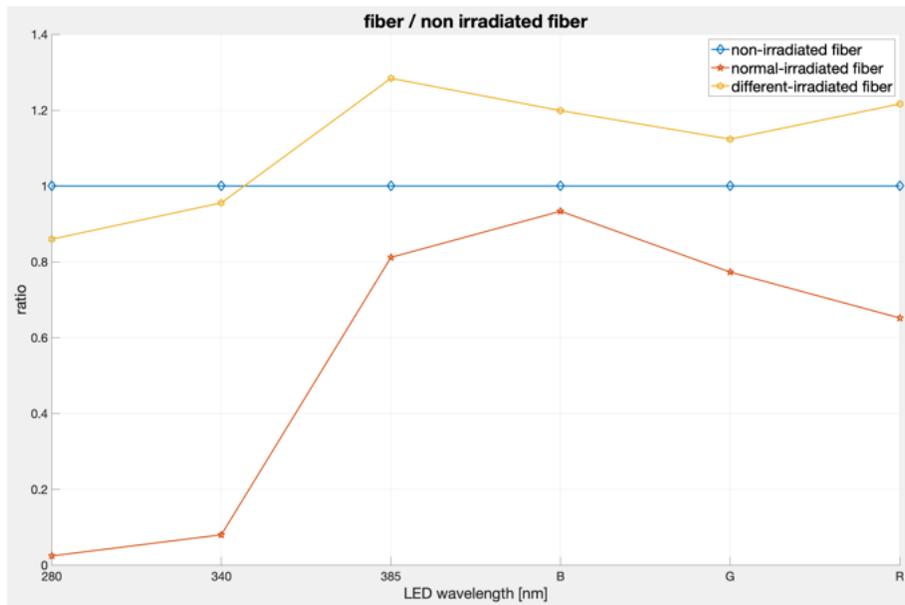


Figura 19: Rapporto tra ampiezza del segnale della fibra e del LED per ogni fibra, in funzione del LED utilizzato: 2° presa dati, normalizzato per la fibra non irradiata.

λ LEDs [nm]	Luce impulsata	Luce continua, 1° dati	Luce continua, 2° dati	γ irradiation
280	- 96.3 %	- 96.6 %	- 97.6 %	- 97 %
340	- 86.5 %	- 92.2 %	- 92.0 %	- 95 %
385	- 19.7 %	- 21.6 %	- 18.9 %	- 43%
467.5	- 5.1 %	- 32.5 %	- 6.7 %	- 20 %
525	- 7.0 %	- 44.4 %	- 22.7 %	- 27 %
627.5	- 24.9 %	- 52.7 %	- 34.8 %	- 34 %

Tabella 2: Perdita di ampiezza del segnale della fibra irraggiata con apertura numerica di 0.28, rispetto al segnale della fibra non irraggiata, in funzione della lunghezza d'onda. Confronto tra i valori ottenuti a seguito dell'irraggiamento γ e dei test con luce impulsata e continua.

λ LEDs [nm]	Luce impulsata	Luce continua, 1° dati	Luce continua, 2° dati
280	- 20.0 %	+ 1.4 %	- 14.0 %
340	- 0.6 %	+ 5.9 %	- 4.5 %
385	- 5.0 %	+ 14.9 %	+ 28.4 %
467.5	+ 5.0 %	- 6.6 %	+ 19.9 %
525	- 21.6 %	- 12.5 %	+ 12.3 %
627.5	+ 1.7 %	- 6.7 %	+ 21.7 %

Tabella 3: Perdita di ampiezza del segnale della fibra irraggiata con apertura numerica di 0.22, rispetto al segnale della fibra non irraggiata, in funzione della lunghezza d'onda. Confronto tra i valori ottenuti a seguito dei test con luce impulsata e continua.

3 Test beam

3.1 CLEAR in breve

Il test beam è stato svolto presso l'area sperimentale di CLEAR (*CERN Linear Electron Accelerator for Research*) al CERN di Ginevra. Si tratta di un acceleratore lineare di elettroni, che ha come scopo primario lo studio di nuovi componenti e metodi di accelerazione per il funzionamento dei futuri acceleratori e di sistemi di rilevazione delle particelle. Inoltre, CLEAR è impiegato per ricerche nel campo delle radiazioni, con applicazioni in campo medico e aerospaziale.

CLEAR permette di accelerare fasci di elettroni fino a un'energia compresa tra 60 e 220 MeV, aventi una carica tra 0.01 e 1.5 nC. Per la sensibilità dei PMT utilizzati, la carica del fascio è stata mantenuta a 10 pC durante le prese dati. L'apparato sperimentale è stato posizionato all'estremità di CLEAR, alla fine della linea di accelerazione.

3.2 Apparato sperimentale

Per poter condurre il *test beam*, è stato necessario progettare e realizzare un telaio di supporto per permettere il corretto alloggiamento delle fibre. Le tre fibre utilizzate hanno una lunghezza di 6200 mm, quindi per ridurre gli ingombri sono state avvolte in spire di diametro di circa 30 cm. Sono state testate le fibre precedentemente descritte:

- Fibra non irraggiata con apertura numerica di 0.28;
- Fibra irraggiata con apertura numerica di 0.28;
- Fibra irraggiata con apertura numerica di 0.22.

Il primo tra gli scopi primari dell'esperimento consiste nel determinare la variazione del segnale in funzione dell'angolo di incidenza tra la fibra e il fascio di elettroni. Il supporto è stato fissato a un motore rotativo, che permette di compiere step costanti e regolari. Il motore permette di ottenere angoli con la precisione di un grado, in un range compreso tra -85° e 85° [Fig. 20a].

Il secondo obiettivo del test beam consiste nello studio dell'assorbimento della luce prodotta nelle fibre in funzione del loro irraggiamento. A questo scopo, il fascio di elettroni deve poter colpire le fibre in tre punti differenti lungo la loro lunghezza. La luce Cherenkov generata in tali punti si propaga lungo il corrispondente segmento di fibra fino al PMT, dove viene rilevata. Rispetto alla luce trasmessa nella fibra non irraggiata, i segnali delle altre fibre mostreranno una perdita relativa alla propagazione nel materiale irraggiato.

Lungo l'arco inferiore della circonferenza, le spire sono state separate in tre scanalature [Fig. 20b]. Ognuna di esse alloggia un singolo avvolgimento per ogni fibra, e sono separate verticalmente per poter essere irraggiate singolarmente dal fascio. Nella scanalatura inferiore sono alloggiati i primi segmenti di ogni fibra, la cui estremità è connessa al PMT corrispondente. Questi segmenti non sono stati sottoposti al processo di irraggiamento, perciò il segnale relativo alla luce generata in questi punti non presenta alcuna perdita dovuta al materiale irraggiato. La scanalatura superiore, invece, alloggia i segmenti finali delle spire, le cui estremità sono connesse al circuito di distribuzione dei LED [Tab. 4].

Per poter monitorare il comportamento delle fibre durante la durata del test beam, si utilizza un segnale di input noto. A questo scopo vengono utilizzati tre differenti LED connessi a un circuito di distribuzione della luce, che permette di dividere uniformemente la luce emessa e portarla a ciascuna fibra. Tale segnale viene rilevato da un quarto PMT e confrontato col segnale propagatosi lungo la fibra. Il calcolo del loro rapporto permette di eliminare le instabilità dei LED, e vien utilizzato per verificare la presenza di eventuali variazioni nel comportamento delle fibre.

Fibra	Lunghezza totale	Scanalatura inferiore	Scanalatura centrale	Scanalatura superiore
Non irraggiata, 0.28	5830 mm	400 mm	2455 mm	4515 mm
Irraggiata, 0.28	6200 mm	423 mm	2513 mm	4505 mm
Irraggiata, 0.22	6200 mm	390 mm	2405 mm	4540 mm

Tabella 4: Distanza dei punti delle fibre colpiti dal fascio rispetto all'estremità connessa al PMT corrispondente. La fibra irraggiata con apertura numerica di 0.28 presenta due spire nella prima scanalata. La seconda spira si trova a una distanza di 1430 mm dal PMT. Le fibre ottiche del circuito di distribuzione hanno una lunghezza di 660 mm.

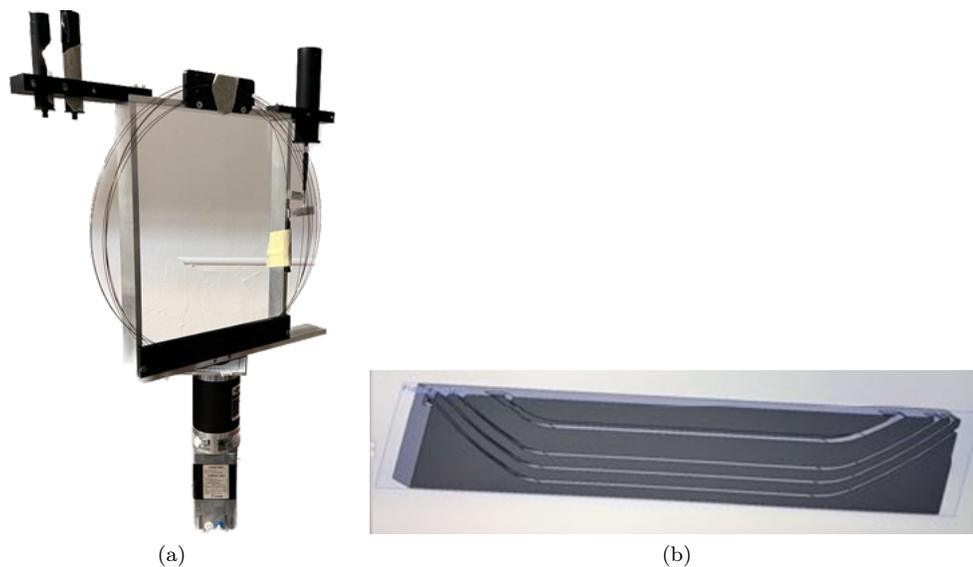


Figura 20: Apparato sperimentale utilizzato per il test beam. (a) Supporto delle fibre. (b) Alloggiamento delle spire nelle tre scanalature.

3.3 Setup di acquisizione

Il supporto è stato posizionato perpendicolarmente al fascio, in modo che questo fosse allineato con la scanalatura centrale. Il fascio può traslare verticalmente, raggiungendo sia la scanalatura inferiore che superiore. Durante le scansioni realizzate, la carica del fascio è stata mantenuta a 10pC. Per evitare che la luce ambientale potesse interferire coi segnali, le spire sono state schermate da opportune coperture. Per motivi strutturali, i PMT R760 e R1635 si trovano a sinistra del telaio, mentre il PMT R7459 si trova a destra. I due PMT R760 utilizzati sono identificati dal loro seriale: 59 e 66. Questi sono stati connessi come segue:

- PMT R1635: connesso alla fibra non irraggiata con apertura numerica di 0.28;
- PMT R760 66: connesso alla fibra irraggiata con apertura numerica di 0.28;
- PMT R7459: connesso alla fibra irraggiata con apertura numerica di 0.22;
- PMT R760 59: connesso al circuito di distribuzione dei LED.

Inizialmente sono state svolte delle scansioni angolari, una per ogni scanalatura. Il supporto è stato fatto ruotare da -85° a $+85^\circ$ rispetto alla configurazione in cui si trova perpendicolare al fascio. Non è stata compiuta una rotazione completa di 180° per evitare i fenomeni di scattering dovuti all'interazione del fascio con la struttura del supporto. Per ogni angolo sono stati acquisiti 120 eventi, ciascuno composto da 400 campionamenti acquisiti nell'arco di 400 ns.

Grazie alle scansioni angolari, è stato possibile individuare l'angolo in cui si riscontra la massima ampiezza del segnale, pari a $\pm 45^\circ$. Il supporto è stato quindi posizionato a tali angoli, e sono state svolte delle scansioni verticali. Il fascio è stato traslato verticalmente, dal basso verso l'alto, per determinare il corretto centraggio delle scanalature.

Infine, sono state svolte delle scansioni utilizzando i LED, realizzate col fascio spento, per monitorare l'andamento del comportamento delle fibre durante il test beam.

3.4 Risultati preliminari

3.4.1 Scansioni angolari

Per comprendere il comportamento delle fibre, si vuole studiare il segnale generato dal passaggio delle particelle in funzione dell'angolo tra le fibre e il fascio. Quando gli elettroni del fascio attraversano la fibra, per effetto Cherenkov si genera una luce su di un cono di angolo θ . Variando l'angolo di incidenza delle particelle rispetto alla fibra, varia anche l'inclinazione del cono di luce rispetto alla fibra. Di conseguenza, la propagazione della luce avviene in direzioni diverse.

Quando il supporto si trova fra -85° e 0° , la luce viene generata e trasmessa verso l'estremità destra delle fibre. A tale estremità, la fibra con apertura numerica di 0.22 è connessa al PMT, che rileva quindi il segnale diretto. Le altre fibre, invece, all'estremità destra sono connesse al circuito di distribuzione. La luce generata viene trasmessa per tutta la fibra fino ai LED, dove viene riflessa dalla loro superficie. Questa percorre l'intera lunghezza della fibra nel verso opposto, dove viene rilevata dai PMT generando il segnale riflesso. Dal momento che questo segnale percorre una distanza maggiore, risulta avere un ritardo rispetto al segnale diretto. Tra 0° e 85° , la luce viene generata verso l'estremità sinistra delle fibre, dando luogo a un comportamento opposto. Nelle fibre con apertura numerica di 0.28, la luce viene direttamente trasmessa in direzione dei PMT, mentre nella terza fibra la luce viene trasmessa in direzione dei LED, dove viene riflessa.

Oltre ai segnali diretti e riflessi, sono individuabili altri contributi:

- Nello stesso range angolare del segnale diretto, dopo un certo tempo, è presente un ulteriore segnale che costituisce la riflessione della luce diretta. Quando la luce arriva al PMT, una parte di essa si riflette sulla finestra dello strumento, percorrendo l'intera fibra fino a raggiungere i LED. Qui, la luce viene nuovamente riflessa in direzione del PMT, dove viene rilevata.
- Alle estremità del range di rotazione, è presente un segnale che viene interpretato come prodotto degli elettroni emessi nello *scattering* del fascio che colpisce la struttura.
- In corrispondenza del segnale diretto, sono individuabili alcune fasce verticali. Queste corrispondono al fenomeno di *scattering* che avviene lungo la fibra. Quando il fascio viene puntato sulla scanalatura centrale o superiore, parte degli elettroni colpiscono anche le spire inferiori, generando un segnale indipendente dall'angolo di rotazione. Dal momento che i segmenti di fibra nelle scanalature inferiori sono più vicini ai PMT, tale segnale arriva prima del segnale diretto. I segnali della scanalatura centrale presentano quindi due bande verticali, mentre quelli della scanalatura superiore ne presentano tre.

Per le diverse specifiche di ciascun PMT utilizzato, i segnali rilevati differiscono fra loro.

Fibra irraggiata, 0.22 La fibra con apertura numerica di 0.22 è connessa al PMT R7459, che per motivi strutturali è stato posto a destra del fascio. Per questa ragione, il segnale diretto viene rilevato ad angoli di rotazione negativi, mentre il segnale riflesso per angoli positivi.

I segnali riflesso e diretto appaiono localizzati in un range di circa $\pm 20^\circ$ attorno alla posizione del loro massimo. Inoltre, non è visibile il riflesso del segnale diretto. In corrispondenza sia del segnale diretto che del riflesso è presente un pre-segnale o spalla, che appare una decina di nanosecondi prima del segnale principale [Fig. 21]. Ulteriori test sono stati svolti in laboratorio per determinare se tale comportamento sia dovuto all'azione del PMT o alle caratteristiche della fibra.

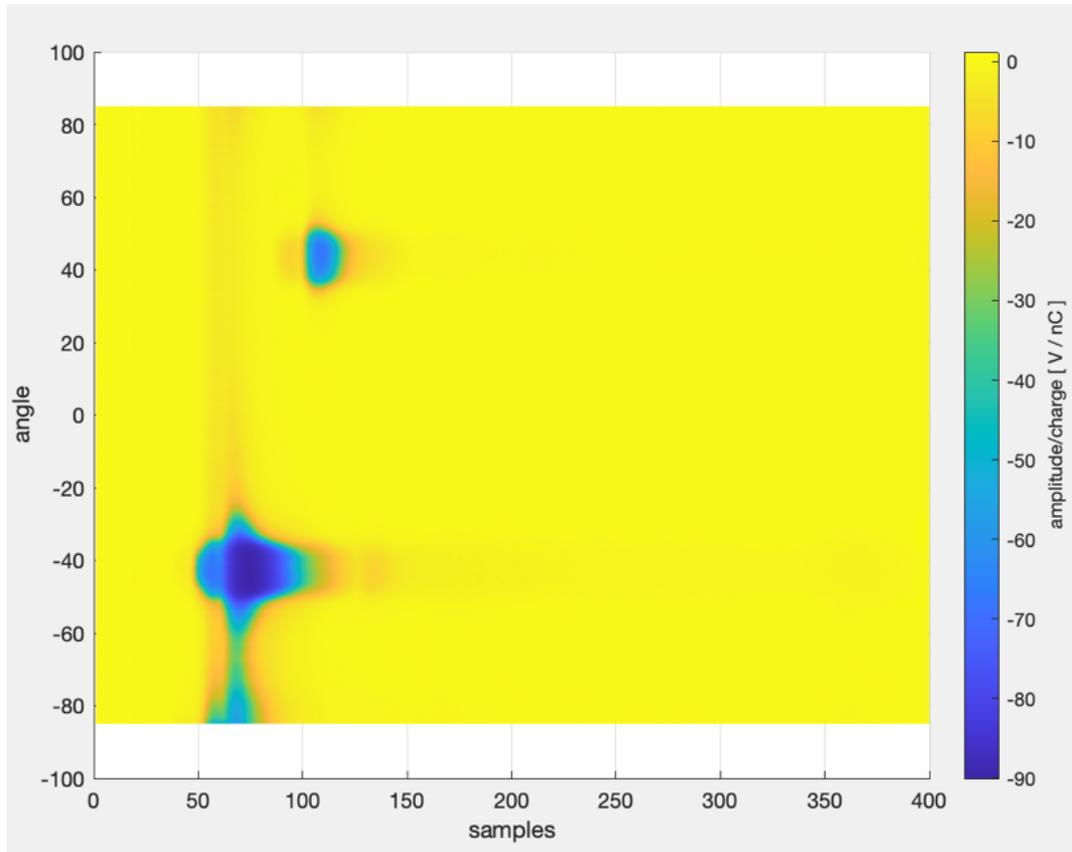


Figura 21: Segnale della scansione angolare della fibra irraggiata con apertura numerica 0.22 (scanatura centrale), PMT R7459. L'asse x indica i campionamenti (ciascuno corrispondente a 1 ns), mentre l'asse y la rotazione del supporto rispetto alla configurazione nominale.

Fibra non irraggiata, 0.28 La fibra non irraggiata è stata connessa al PMT R1635. A differenza della fibra precedente, tale PMT è stato posizionato a sinistra del fascio, perciò il segnale diretto viene rilevato per angoli di rotazione positivi, mentre quello indiretto per angoli negativi.

Similmente a quanto accade col PMT R7459, anche i segnali diretto e riflesso rilevati su questa fibra appaiono localizzati entro un certo range attorno alla posizione del massimo [Fig. 22]. Questo comportamento è stato indagato in seguito con opportuni test condotti in laboratorio.

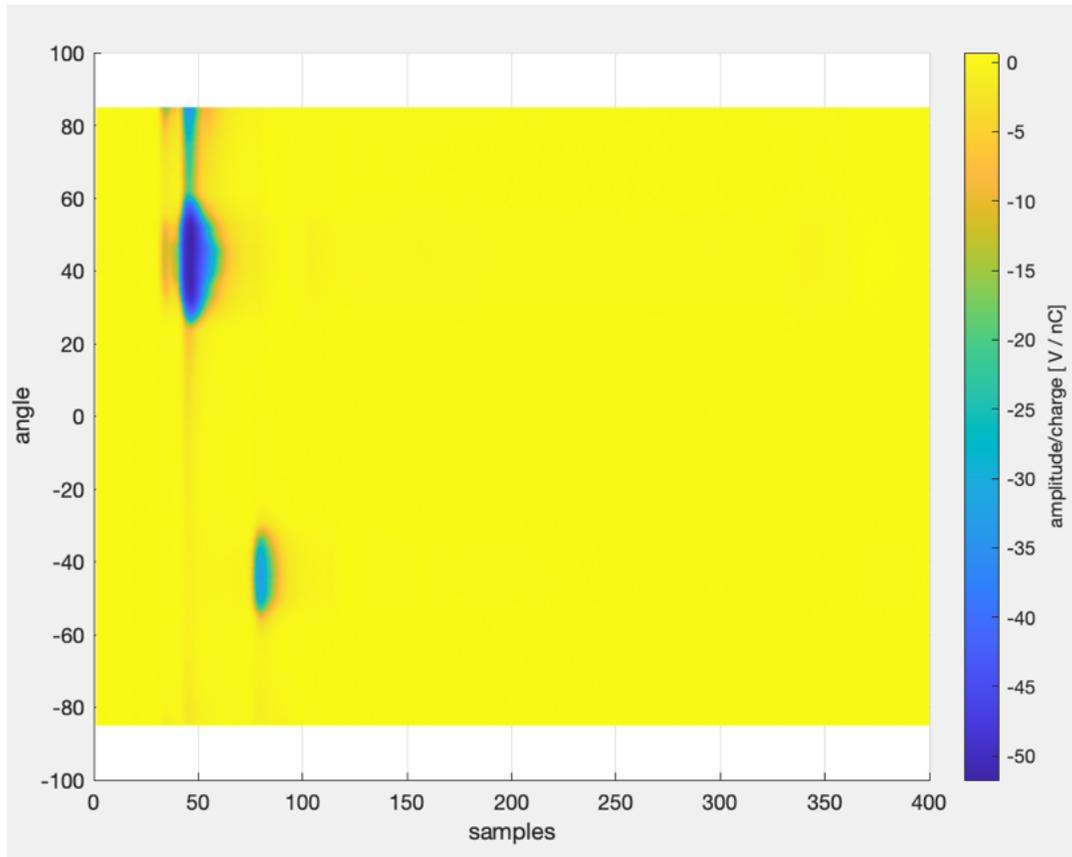


Figura 22: Segnale della scansione angolare della fibra non irraggiata con apertura numerica 0.28 (scanalatura centrale), PMT R1635. L'asse x indica i campionamenti (ciascuno corrispondente a 1 ns), mentre l'asse y la rotazione del supporto rispetto alla configurazione nominale.

Fibra irraggiata, 0.28 La fibra non irraggiata è stata connessa al PMT R760 66, posto a sinistra del supporto, ottenendo il segnale diretto nel range $[0,+85]^\circ$ e il segnale riflesso nel range $[-85,0]^\circ$.

A differenza di quanto si osserva nel caso precedente, sia il segnale diretto che il riflesso assumono una forma ad arco, e non sono localizzati solamente attorno ai massimi dei segnali. Inoltre, in corrispondenza del segnale diretto, appare visibile un secondo arco. Analizzando la loro separazione temporale, il secondo arco si rivela essere il riflesso del segnale diretto [Fig. 23].

Un'ulteriore differenza rispetto ai casi precedenti è costituita dalla presenza di un segnale continuo localizzato attorno a $+45^\circ$, identificato come una componente di *dark current* del fascio. In seguito sono stati svolti dei test per determinare come può variare il segnale primario in presenza di un secondo segnale con caratteristiche simili alla dark current.

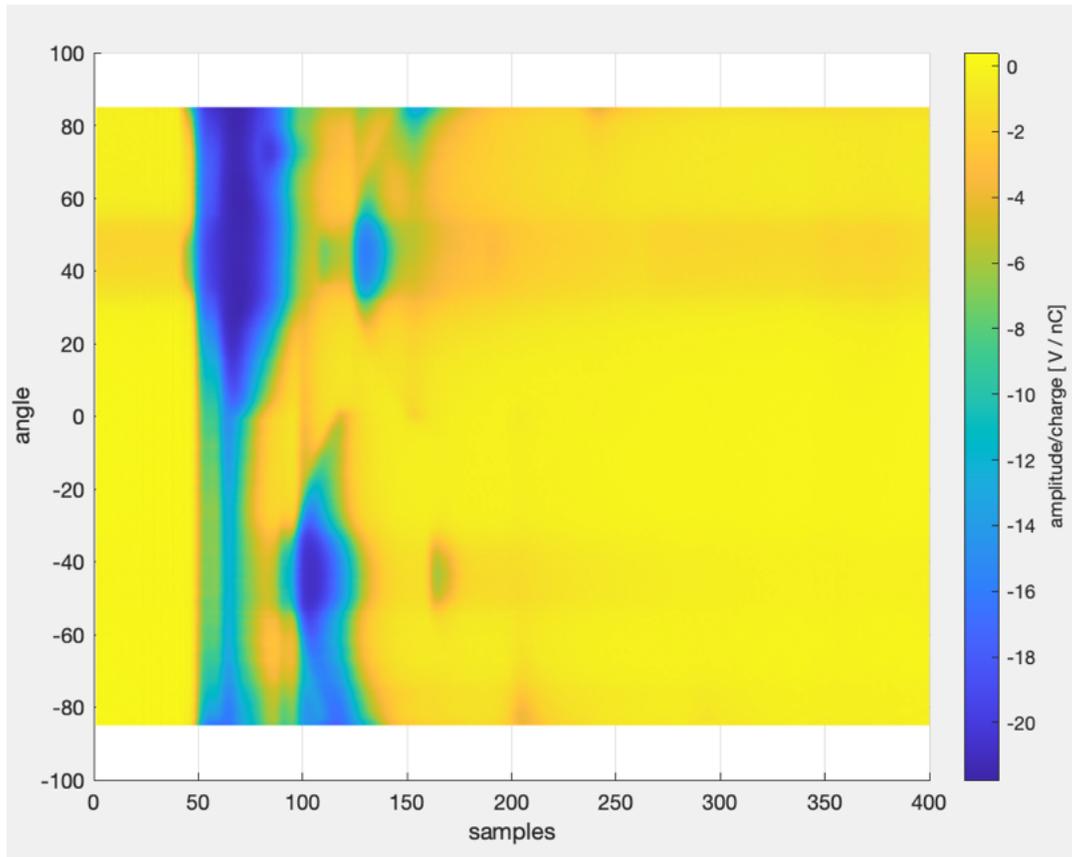


Figura 23: Segnale della scansione angolare della fibra irraggiata con apertura numerica 0.28 (scantatura centrale), PMT R760 66. L'asse x indica i campionamenti (ciascuno corrispondente a 1 ns), mentre l'asse y la rotazione del supporto rispetto alla configurazione nominale.

Circuito di distribuzione LED Il circuito di distribuzione dei LED è stato connesso al PMT R760 59. Durante i rotation scans i LED sono stati mantenuti spenti, ma il PMT ha rilevato comunque la presenza di segnali, localizzati attorno ai $\pm 45^\circ$. Siccome il circuito di distribuzione è connesso alle tre fibre testate, le finestre dei LEDs riflettono la luce prodotta nella fibra lungo la loro direzione. Per questo motivo, il PMT rileva la luce del segnale riflesso delle tre fibre. In particolare, per angoli di rotazione positivi rileva la luce riflessa della fibra con apertura numerica di 0.22, mentre per angoli negativi rileva la luce riflessa nelle altre due fibre.

Inoltre, è presente una fascia che appare circa costante per ogni angolo di rotazione, che per questo motivo non può dipendere dalla luce generata per effetto Cherenkov dal fascio primario [Fig. 24]. Questo segnale probabilmente è il risultato dello *scattering* degli elettroni sul bersaglio. Gli elettroni così prodotti non saranno collineari col fascio, e quindi produrranno luce su tutto l'angolo solido. L'altra possibilità è che vengano prodotti fotoni per luce di scintillazione, fenomeno riportato in letteratura solo in quarzo naturale. Tuttavia, è possibile che una piccola quantità di luce venga prodotta a causa delle impurità nel quarzo fuso delle fibre.

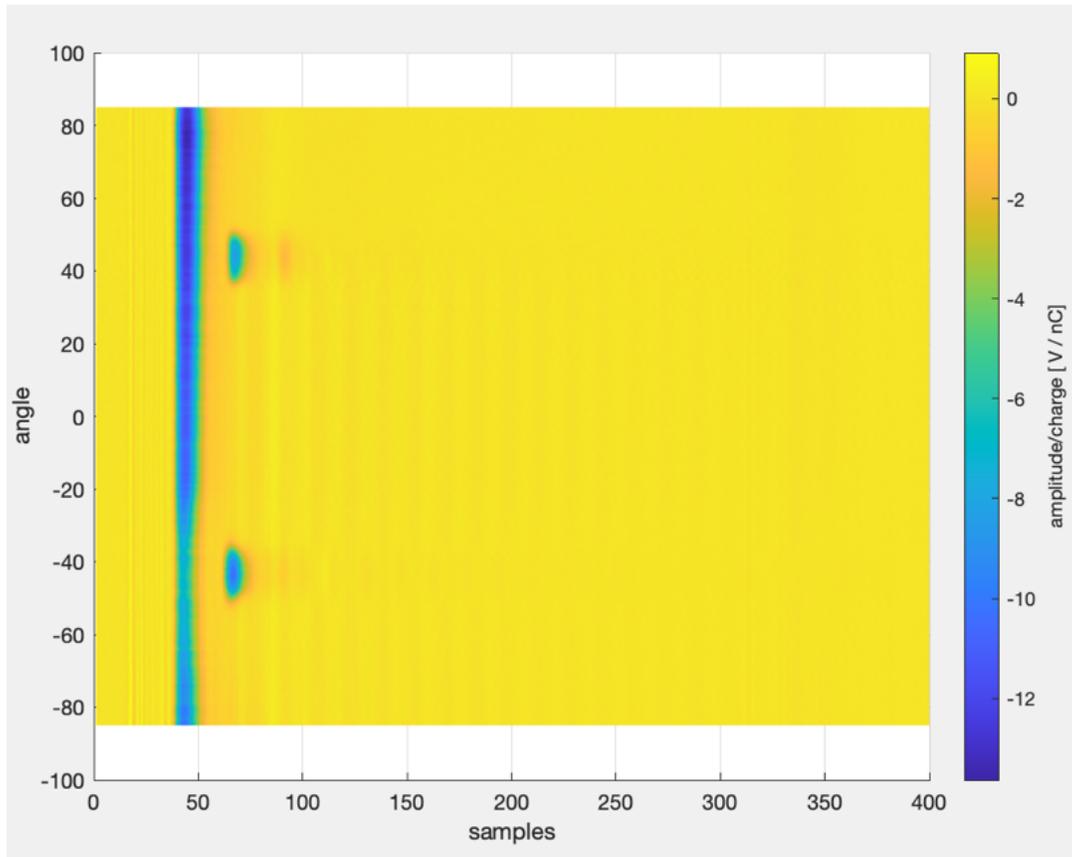


Figura 24: Segnale della scansione angolare del circuito di distribuzione LED, PMT R760 59. L'asse x indica i campionamenti (ciascuno corrispondente a 1 ns), mentre l'asse y la rotazione del supporto rispetto alla configurazione nominale.

3.4.2 Scansioni verticali

Dall'analisi delle scansioni angolari risulta che l'ampiezza massima del segnale si ottiene per un angolo di incidenza di circa $\pm 45^\circ$. Quando il supporto si trova a tali angoli rispetto alla direzione del fascio, una parte di cono di luce Cherenkov risulta collineare con la direzione della fibra. Per questo motivo, una parte della luce prodotta si propaga senza riflessioni e lungo il percorso più breve, massimizzando il segnale. In corrispondenza di queste posizioni del supporto, sono stati eseguiti delle scansioni verticali. Il fascio di elettroni è stato fatto traslare verticalmente lungo l'alloggiamento delle fibre, illuminando singolarmente le tre scanalature, contenenti ciascuna una spira di ogni fibra testata.

Le scansioni verticali sono state eseguite per confrontare i comportamenti delle tre fibre in relazione al loro precedente irraggiamento γ . Le estremità delle fibre non sono state esposte all'irraggiamento, quindi la trasmissione della luce lungo questi segmenti non dovrebbe subire significative variazioni tra la fibra non irraggiata e quelle irraggiate. Per questo motivo, quando il fascio incide sulla scanalatura inferiore, che contiene il segmento di fibra adiacente al PMT, ci si aspetta un comportamento simile nelle tre fibre. Invece, quando il fascio colpisce le due scanalature superiori, la luce prodotta viene trasmessa attraverso un segmento di fibra irraggiato. Il comportamento atteso è quindi una diminuzione dell'ampiezza del segnale rispetto a quello ottenuto per la fibra non irraggiata. Per queste scansioni, le fibre sono state connesse come segue:

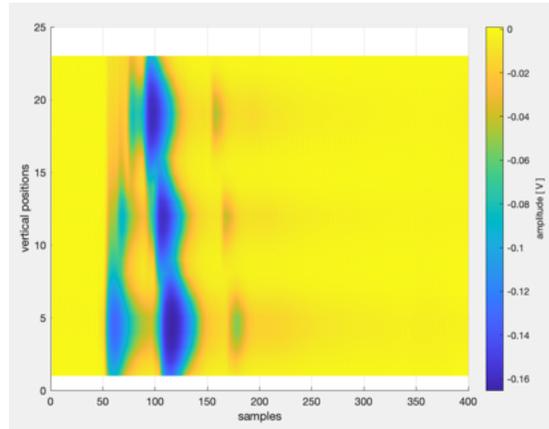
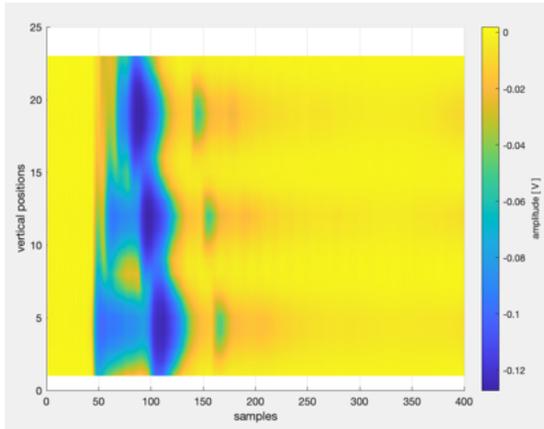
- PMT R760 59: fibra non irraggiata con apertura numerica di 0.28;
- PMT R760 66: fibra irraggiata con apertura numerica di 0.28;
- PMT R7459: fibra irraggiata con apertura numerica di 0.22;
- PMT R1635: circuito di distribuzione della luce.

Come spiegato in precedenza, quando il supporto si trova a -45° si rileva il segnale diretto nella fibra irraggiata con apertura numerica di 0.22. Invece, nelle fibre con apertura numerica di 0.28 il segnale diretto si ottiene quando il supporto si trova a $+45^\circ$.

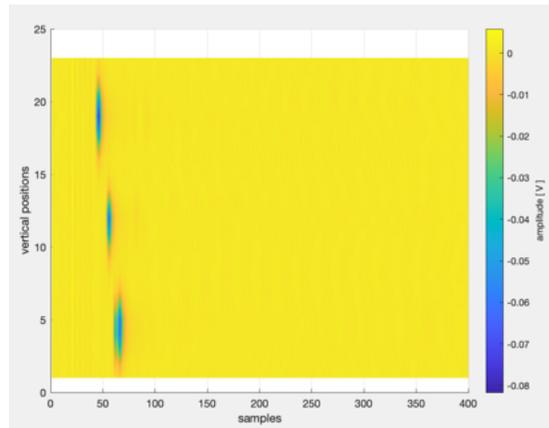
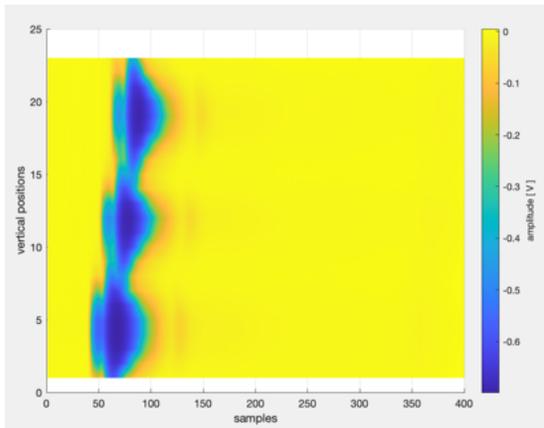
Il primo segnale diretto rilevato appartiene alla luce prodotta nella scanalatura inferiore, in quanto la luce percorre un segmento di fibra minore prima di arrivare al PMT. Il primo segnale riflesso, invece, corrisponde alla scanalatura superiore. Infatti, la luce viene generata nel punto più vicino all'estremità della fibra connessa al circuito di distribuzione, perciò percorre la distanza minore prima di essere riflessa ed arrivare al PMT.

Dai risultati ottenuti, si nota la presenza di alcuni fenomeni:

- I tre picchi corrispondenti ai massimi dei segnali si ottengono quando il fascio si trova posizionato al centro della scanalatura corrispondente. In alcuni casi è presente una spalla che precede il picco del segnale. Per determinarne la natura, sono stati svolti dei test in laboratorio.
- I PMT R760 59 e R760 66 mostrano due serie di segnali nella configurazione a -45° [Fig. 25a, 25b]. I primi segnali che raggiungono il PMT corrispondono al segnale diretto, mentre la seconda serie rappresenta il segnale riflesso. La maggior parte della luce prodotta è generata lungo la fibra in direzione dei LED, su cui si riflette verso il PMT. Tuttavia, una parte di luce generata si propaga in direzione opposta verso il PMT, generando un debole segnale diretto. Questo viene acquisito prima del segnale riflesso, in quanto percorre un segmento più corto di fibra. Il PMT R7459, dal momento che la fibra a cui è connesso è stata montata in verso opposto, rileva il segnale diretto [Fig. 25c].
- Nella configurazione a $+45^\circ$, i PMT R760 59 e R760 66 rilevano i segnali diretti, generati dalla luce prodotta nella fibra in direzione del PMT [Fig. 26a, 26b]. È possibile individuare un'altra serie di segnali nelle posizioni corrispondenti ai picchi dei segnali principali. Mentre la maggior parte della luce che arriva al PMT viene rilevata, una parte viene riflessa. Questa percorre l'intera fibra, viene riflessa dalla superficie dei LED, e torna nuovamente verso il PMT. Per questo motivo tali segnali mostrano un certo ritardo rispetto ai segnali diretti da cui sono generati. Il PMT R7459 rileva invece il segnale riflesso [Fig. 26c].
- Il PMT R1635 è connesso al circuito di distribuzione, perciò in entrambe le configurazioni rileva la luce che viene riflessa sulle finestre dei LED [Fig. 25d, 26d].

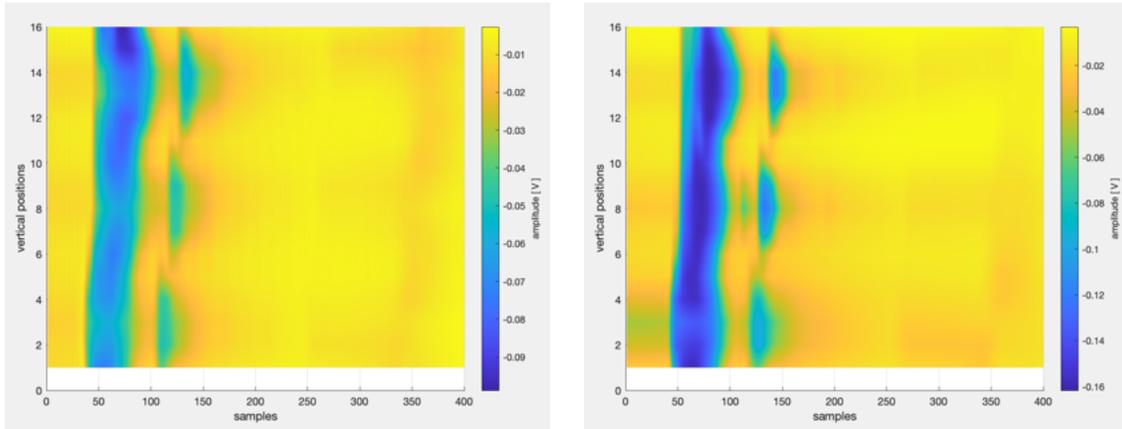


(a) PMT R760 59, fibra non irraggiata con apertura numerica 0.28. (b) PMT R760 66, fibra irraggiata con apertura numerica 0.28.

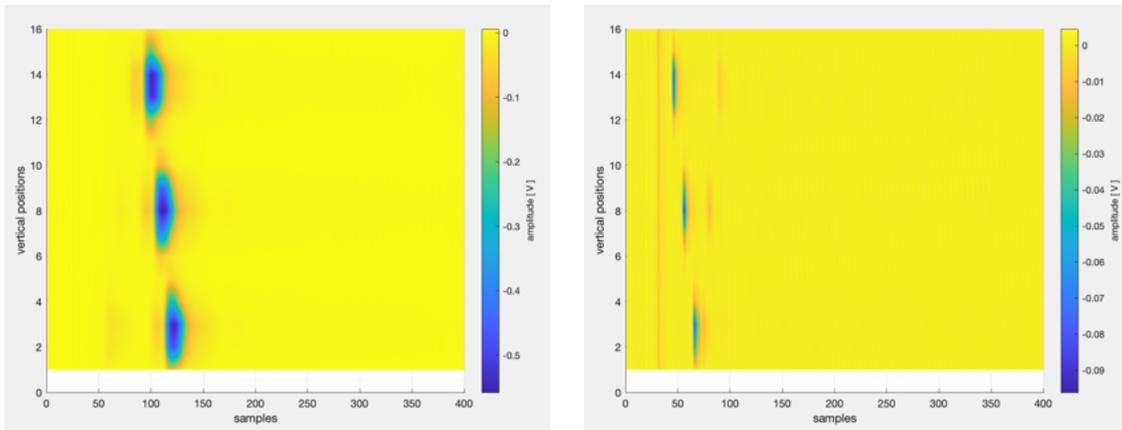


(c) PMT R7459, fibra irraggiata con apertura numerica 0.22. (d) PMT R1635, circuito di distribuzione LED.

Figura 25: Scansione verticale a -45° . L'asse x indica i campionamenti (ciascuno corrispondente a 1 ns), mentre l'asse y la posizione verticale del fascio di elettroni rispetto alle scanalature.



(a) PMT R760 59, fibra non irraggiata con apertura numerica 0.28. (b) PMT R760 66, fibra irraggiata con apertura numerica 0.28.



(c) PMT R7459, fibra irraggiata con apertura numerica 0.22. (d) PMT R1635, circuito di distribuzione LED.

Figura 26: Scansione verticale a $+45^\circ$. L'asse x indica i campionamenti (ciascuno corrispondente a 1 ns), mentre l'asse y la posizione verticale del fascio di elettroni rispetto alle scanalature.

3.4.3 Scansioni con LED

Durante le diverse prese dati, sono state effettuate delle scansioni col fascio di elettroni spento e i LED accesi. In questo modo, dal momento che il segnale di input è noto, è possibile determinare la presenza di variazioni nel comportamento delle fibre e dei PMT. Sono stati utilizzati due LED ultravioletti (MTE340H21 con $\lambda = 340$ nm, VAOL-5GUV8T4 con $\lambda = 385$ nm), e un LED nello spettro visibile (LEDRGBE con $\lambda = 467.5$ nm).

Ogni fibra è stata testata con i tre differenti LED, e per ciascuno dei segnali rilevati è stata calcolata l'ampiezza massima e la carica. Per determinare la carica, la media dei primi 100 *samples*, che costituisce la *baseline*, è stata sottratta al segnale. La carica è stata ottenuta integrando le ampiezze dei punti contenuti tra gli estremi del segnale, determinati con un valore di soglia pari al 10% dell'ampiezza massima. Per eliminare l'instabilità intrinseca dei segnali emessi dai LED, si è calcolato il rapporto tra le cariche del segnale trasmesso lungo la fibra e il segnale di input. I segnali di input sono ottenuti dal PMT R760 59, connesso direttamente al circuito di distribuzione.

In particolare, grazie a queste scansioni si è confrontato il segnale prima e dopo una breve sessione di irraggiamento delle fibre, svolta utilizzando il fascio di elettroni [Cap. 3.5.4]. La prima scansione è stata svolta prima di tale irraggiamento, la seconda al termine del processo, e la terza il giorno seguente [Fig. 27, 28, 29]. I massimi (in valore assoluto) delle ampiezze e delle cariche per ogni PMT sono stati normalizzati dividendoli per i risultati ottenuti dal PMT R760 59, in modo da evidenziare eventuali variazioni nel tempo. È emerso che la sessione di irraggiamento non ha prodotto delle variazioni nel comportamento delle fibre, che si è mantenuto costante per l'intera durata del *test beam* [Fig. 30, 31].

I risultati delle scansioni LED sono stati utilizzati anche per confrontare i tempi di arrivo del segnale tra i diversi PMT. Infatti, dal momento che è stato acceso un solo LED per scansione, le differenze di tempo di arrivo del segnale dipendono solamente dalle diverse configurazioni dei setup dei PMT.

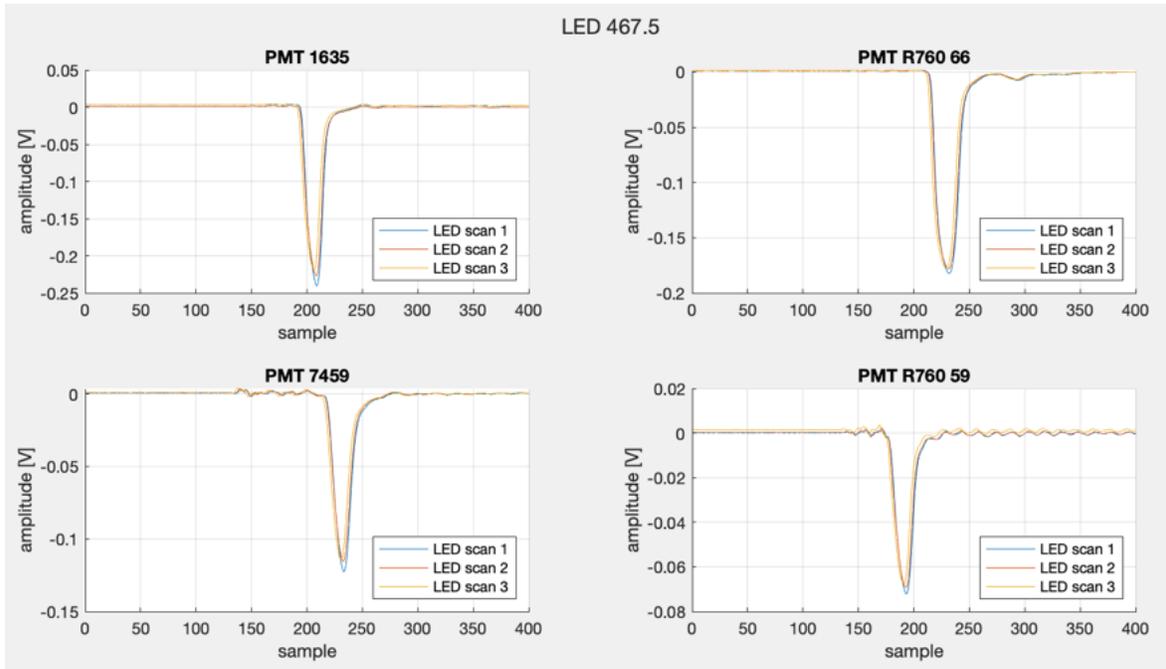


Figura 27: Scansione LED con $\lambda = 467.5$ nm per le tre fibre e il circuito di distribuzione.

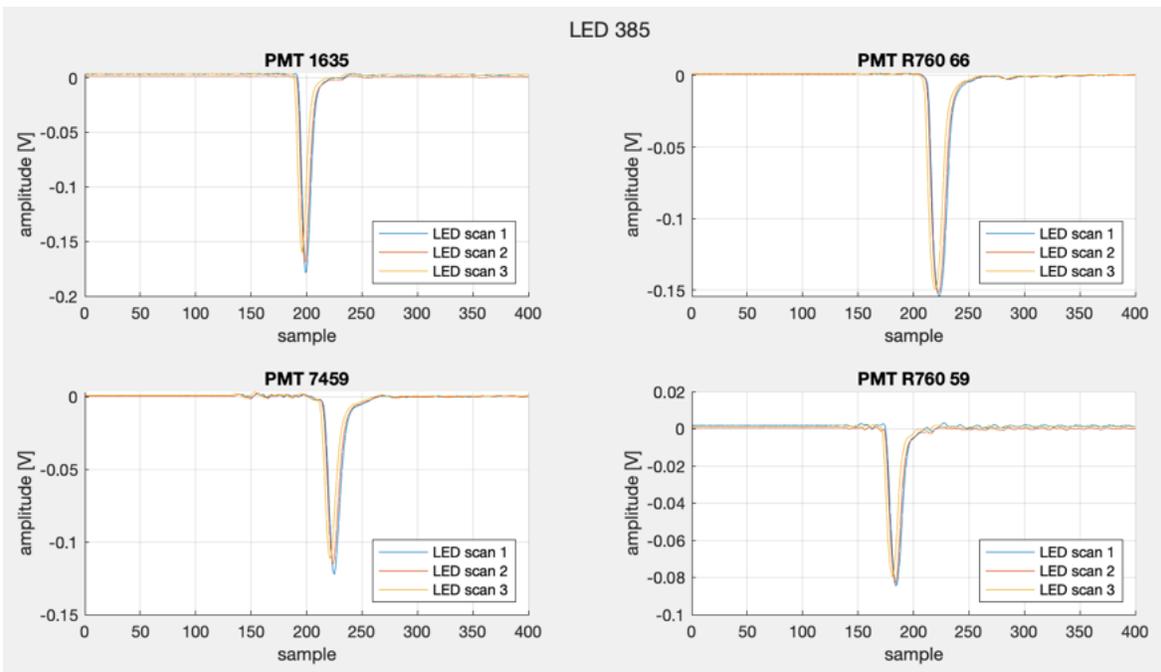


Figura 28: Scansione LED con $\lambda = 385$ nm per le tre fibre e il circuito di distribuzione.

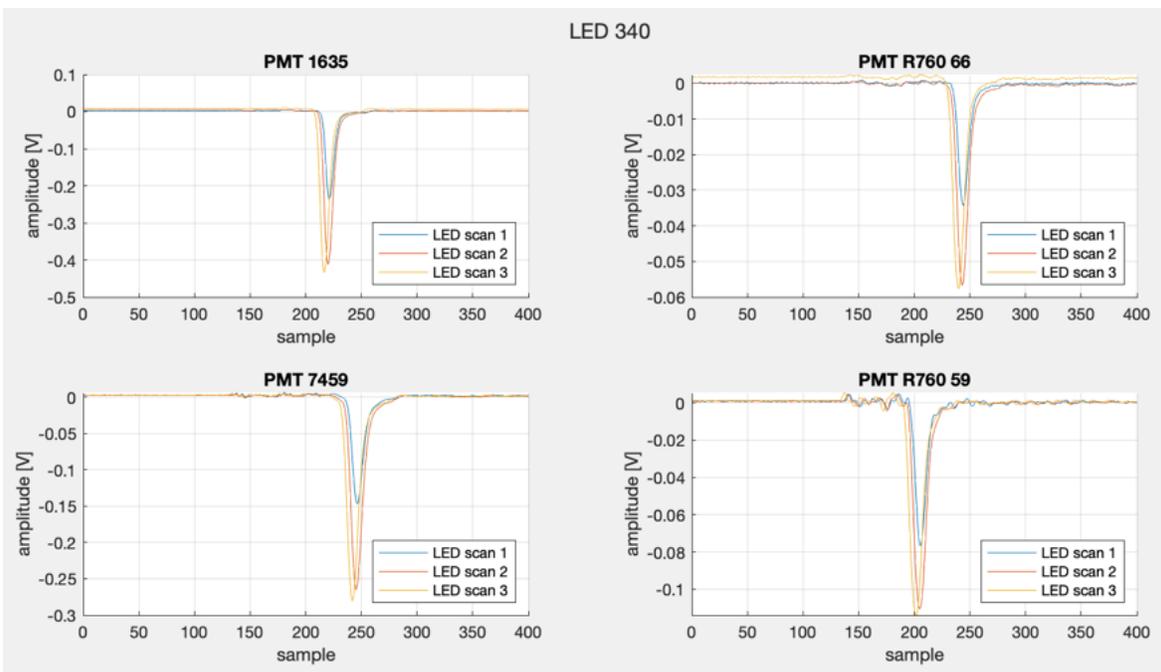


Figura 29: Scansione LED con $\lambda = 340$ nm per le tre fibre e il circuito di distribuzione.

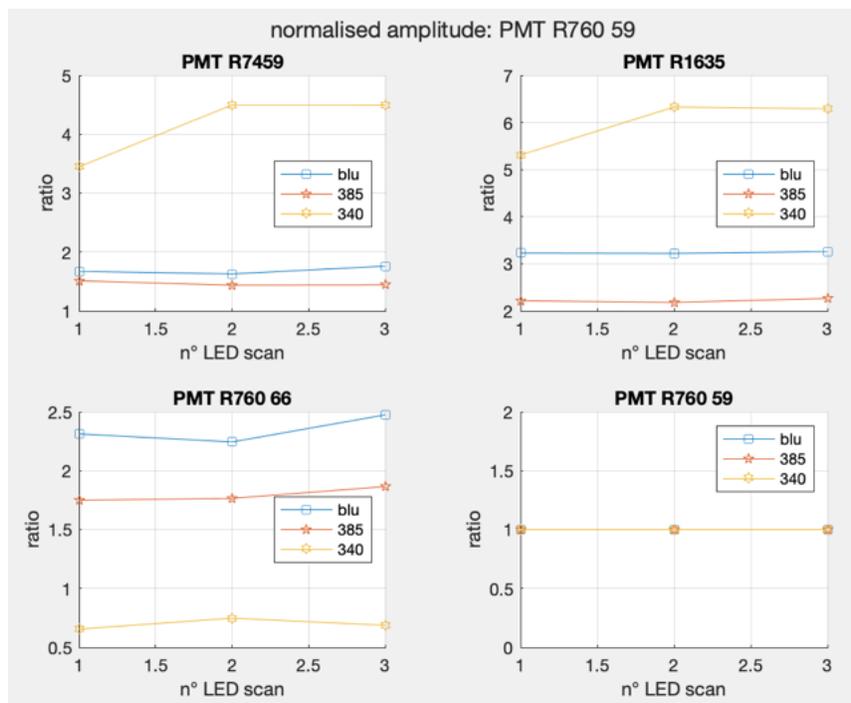


Figura 30: Ampiezza minima per ogni PMT normalizzata per il PMT R760 59 connesso al circuito di distribuzione, in funzione del numero di scansioni verticali svolte.

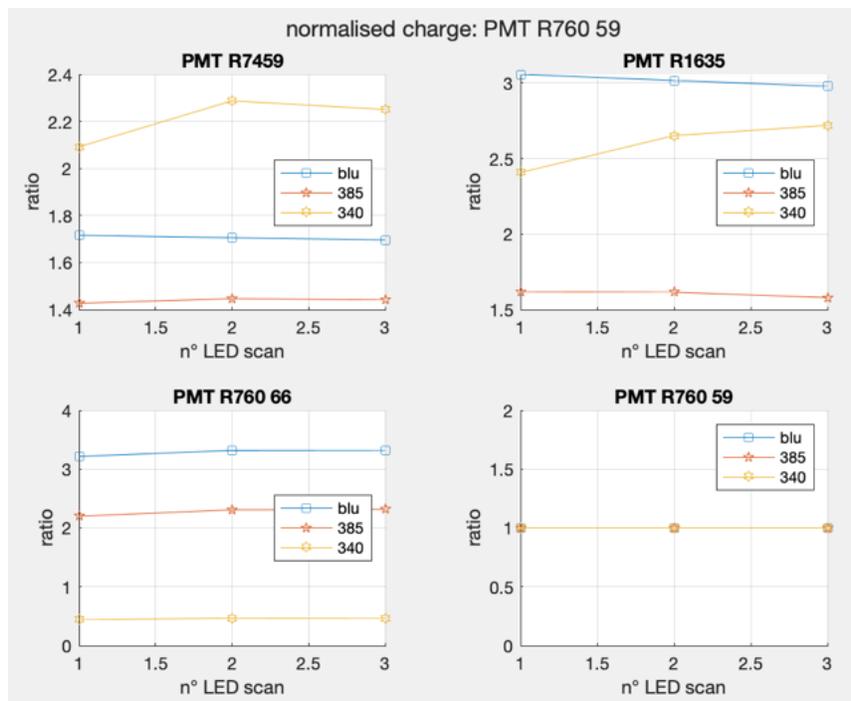


Figura 31: Carica minima per ogni PMT normalizzata per il PMT R760 59 connesso al circuito di distribuzione, in funzione del numero di scansioni verticali svolte.

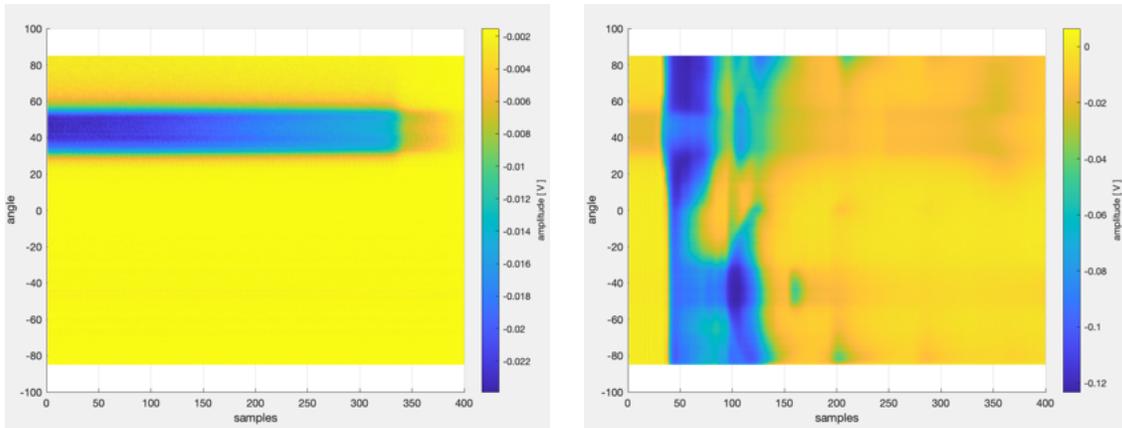
3.5 Setup alternativi

Durante il *test beam* si sono svolte alcune scansioni a seguito di modifiche del setup sperimentale, per approfondire alcuni fenomeni individuati.

3.5.1 Beam dark current: fibra non irraggiata

Durante le scansioni angolari, è emersa la presenza di un segnale continuo nel range $[35;55]^\circ$. Per determinare la natura di questo segnale, è stata eseguita una scansione angolare senza il fascio di elettroni, ma mantenendo l'acceleratore acceso. Questo segnale risulta ancora presente, e per questo risulta essere generato da un processo dell'acceleratore stesso. Tale componente viene indicata come *beam dark current* [Fig. 32a].

Inizialmente, si è svolta una scansione angolare connettendo la fibra non irraggiata al PMT R760 59 invece che al PMT R1635. L'interazione tra la *dark current* e il segnale diretto genera un avvallamento nella zona in cui si trova il picco del segnale diretto, impedendo di determinarne l'ampiezza [Fig. 32b]. Tale effetto è dovuto al comportamento del PMT. Per questo motivo la fibra non irraggiata è stata connessa al PMT R1635.



(a) Scansione angolare con fascio di elettroni spento: *beam dark current*. (b) Scansione angolare con fascio di elettroni acceso: segnale del fascio.

Figura 32: Segnale della scansione angolare della fibra non irraggiata con apertura numerica 0.28, PMT R760 59.

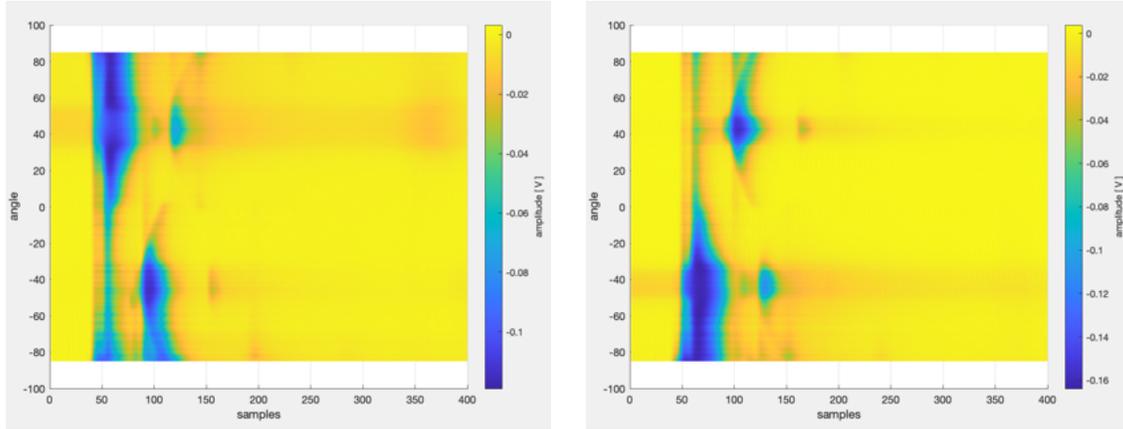
3.5.2 Beam dark current: fibre irraggiate

La presenza della *dark current* è visibile anche nel segnale rilevato dal PMT R760 66, connesso alla fibra irraggiata. A differenza del segnale letto dal PMT R760 59, il segnale del fascio non subisce una diminuzione della sua ampiezza, ma mostra un plateau nel range $[35, 55]^\circ$. Dal momento che solamente i PMT del tipo R760 sono influenzati dalla presenza della *dark current*, la fibra irraggiata con apertura numerica di 0.28 è stata connessa al PMT R7459. In questo modo è possibile ottenere il valore dell'ampiezza del segnale in corrispondenza della posizione angolare in cui si registra il suo massimo.

È stata quindi eseguita una scansione angolare modificando il setup sperimentale come segue:

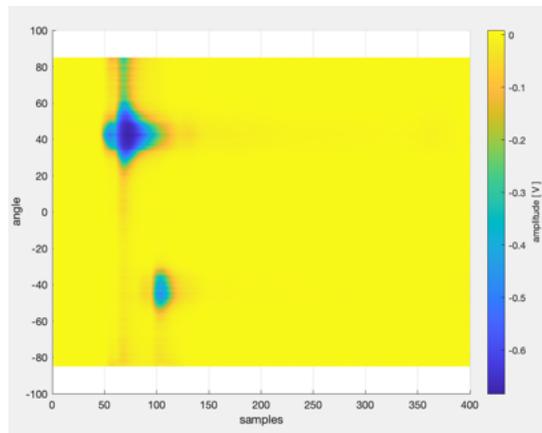
- PMT R760 59: connesso alla fibra non irraggiata con apertura numerica di 0.28 [Fig. 33a];

- PMT R760 66: connesso alla fibra irraggiata con apertura numerica di 0.22 [Fig. 33b];
- PMT R7459: connesso alla fibra irraggiata con apertura numerica di 0.28 [Fig. 33c].



(a) PMT R760 59, fibra non irraggiata 0.28.

(b) PMT R760 66, fibra irraggiata 0.22.



(c) PMT R7459, fibra irraggiata 0.28.

Figura 33: Scansione angolare con setup alternativo.

3.5.3 Beam dark current: PMT boosters

I PMT hanno un comportamento lineare solo fino a una soglia di corrente pari a $1\mu\text{A}$. Per eliminare l'influenza della *dark current* sul segnale del fascio, sono stati connessi i *boosters* del PMT R760 59, connesso alla fibra non irraggiata con apertura numerica di 0.28. I *boosters* sono tre ulteriori canali di alimentazione del PMT, che permettono di estenderne il comportamento lineare fino a una soglia di $100\mu\text{A}$. Per connettere i *boosters*, tutti gli altri PMT sono stati staccati dalle rispettive fibre. Tuttavia, i risultati della scansione angolare continuano a mostrare l'avvallamento del segnale diretto nel range angolare della *dark current* [Fig. 34].

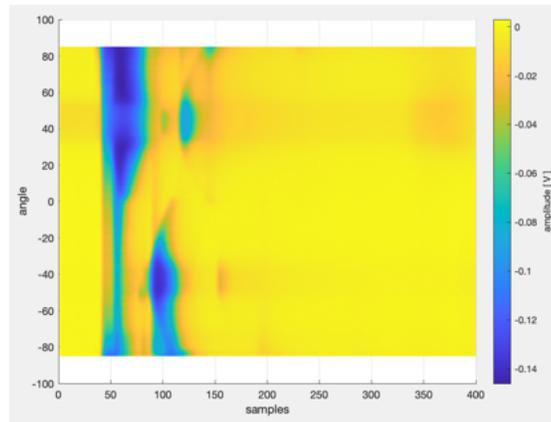
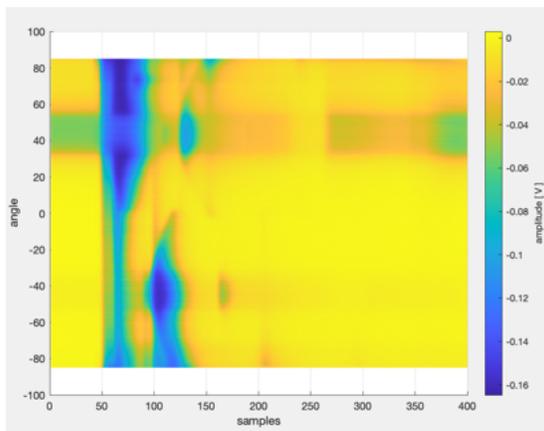


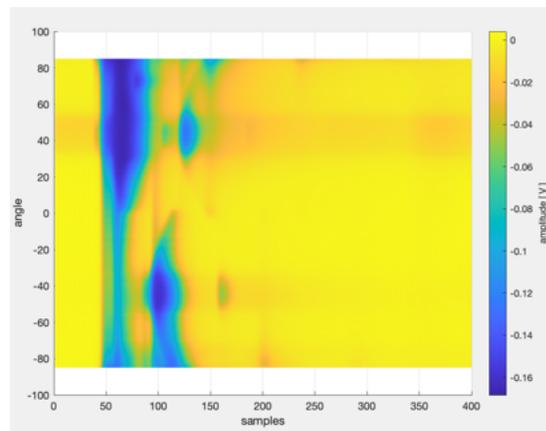
Figura 34: Segnale della scansione angolare della fibra non irraggiata con apertura numerica 0.28, PMT R760 59 con *boosters* connessi.

3.5.4 Irraggiamento con fascio ad alta intensità

Durante il *test beam* è stata condotta una breve sessione di irraggiamento delle fibre, per valutare eventuali variazioni del segnale. Le fibre sono state esposte per circa 20 minuti al fascio di elettroni, avente una carica di 500 pC. Al termine del processo è stata svolta un'ulteriore scansione angolare. I risultati non hanno evidenziato significative variazioni nel comportamento delle fibre, eccetto il segnale relativo alla fibra irraggiata, connessa al PMT R760 66. In questa scansione, l'interazione tra la *dark current* e il segnale diretto ha prodotto un avvallamento nella regione di intersezione [Fig. 35a], simile al comportamento osservato con il PMT R760 59. Dopo diverse ore è stata svolta una seconda scansione angolare, in cui non è stato rilevato tale effetto [Fig. 35b]. I risultati ottenuti da tutti i PMT risultano sostanzialmente invariati rispetto alle scansioni condotte prima dell'irraggiamento.



(a) Scansione angolare alla fine dell'irraggiamento.



(b) Scansione angolare il giorno dopo l'irraggiamento.

Figura 35: Segnale della scansione angolare della fibra irraggiata con apertura numerica 0.28, PMT R760 66.

4 Test in laboratorio

Per comprendere alcuni effetti rilevati durante il *test beam* sono stati svolti dei test in laboratorio. In particolare, si è studiato il comportamento dei PMT e la *beam dark current*.

4.1 Analisi della forma del segnale dei PMT

4.1.1 Analisi del segnale dei PMT in funzione della luce

Dai risultati delle scansioni effettuate durante il *test beam*, è emersa la presenza di un segnale che precede il picco del segnale primario. Questo fenomeno è facilmente osservabile nelle scansioni verticali [Fig. 25c]. Inoltre, il segnale rilevato durante le scansioni angolari dal PMT R7459 [Fig. 21] risulta avere una durata superiore a quella attesa.

Sono stati effettuati dei test in laboratorio per determinare se tali fenomeni siano dovuti all'acquisizione della luce da parte dei PMT o alla propagazione della luce nelle fibre. A questo scopo si è studiato il segnale rilevato dai PMT in funzione dei parametri di alimentazione dei LED, utilizzati come fonte di luce.

Apparato sperimentale Per verificare se le caratteristiche del segnale osservato dipendano dalle fibre o dai PMT, questi sono stati connessi a due LED ($\lambda = 385$ nm e $\lambda = 340$ nm) tramite un circuito di distribuzione. Per ciascun LED utilizzato, il test è stato effettuato alimentando i PMT con due valori diversi di tensione. Tali valori di tensione corrispondono alla tensione operativa utilizzata durante le scansioni angolari, e alla tensione utilizzata per i LED scan. Il segnale è stato letto grazie a un oscilloscopio. Per ogni PMT sono stati modificati i parametri di alimentazione dei due LED, come riassunto nelle tabelle seguenti [Tab. 5a, 5b].

λ LEDs [nm]	Parametri nominali	Variazione tensione	Variazione <i>width</i>	PMT	Tensione <i>test beam</i>	Tensione LED scan
385	2.65 V, 10 ns	2.50 V, 2.65 V, 2.85 V, 3.05 V	10 ns, 11 ns, 12 ns, 14 ns	R7459	470 V	670 V
				R1635	350 V	550 V
340	5.00 V, 23 ns	5.00 V	23 ns, 25 ns, 28 ns, 30 ns	R760 59	550 V	750 V
				R760 66	550 V	750 V

Tabella 5: Parametri di alimentazione dei LED (a) e dei PMT (b) utilizzati per il test.

Analisi dei risultati L'analisi dei segnali ottenuti mostra la presenza di spalle secondarie che precedono e seguono il segnale primario rilevato dal PMT R7459 [Fig. 36, 37, 38]. Le spalle individuate durante le scansioni del *test beam* [Fig. 21, 25c] sono quindi effetti dovuti esclusivamente al comportamento dei PMT, e non dipendono dalla propagazione della luce nella fibra.

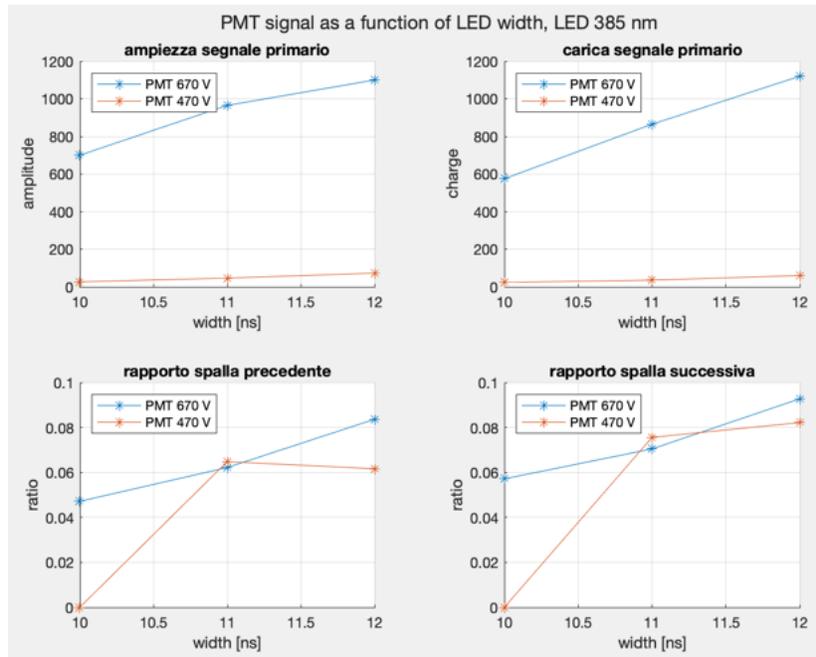


Figura 36: Ampiezza e carica del segnale primario e rapporto tra le ampiezze delle spalle (precedente e successiva) e il segnale primario, in funzione della lunghezza del segnale di input del LED con $\lambda = 385$ nm.

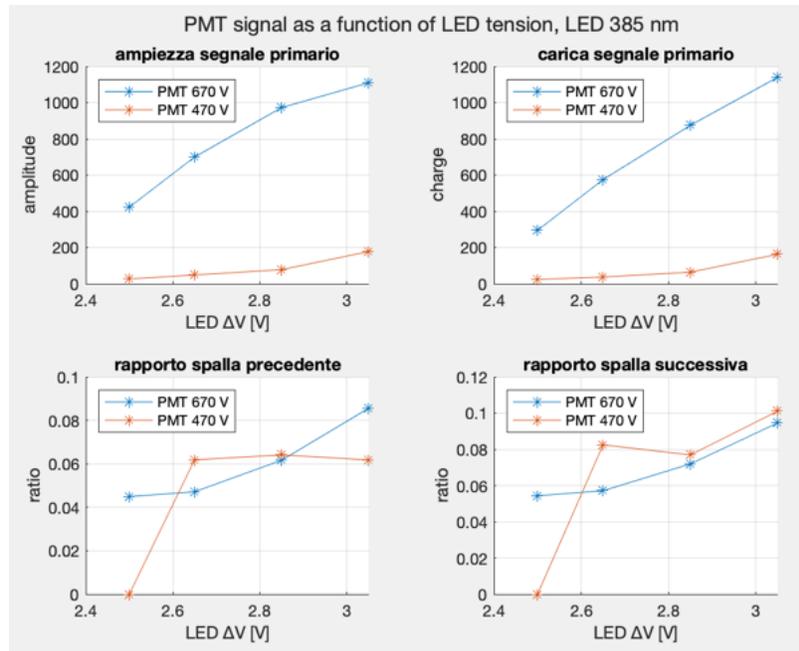


Figura 37: Ampiezza e carica del segnale primario e rapporto tra le ampiezze delle spalle (precedente e successiva) e il segnale primario, in funzione della tensione del segnale di input del LED con $\lambda = 385$ nm.

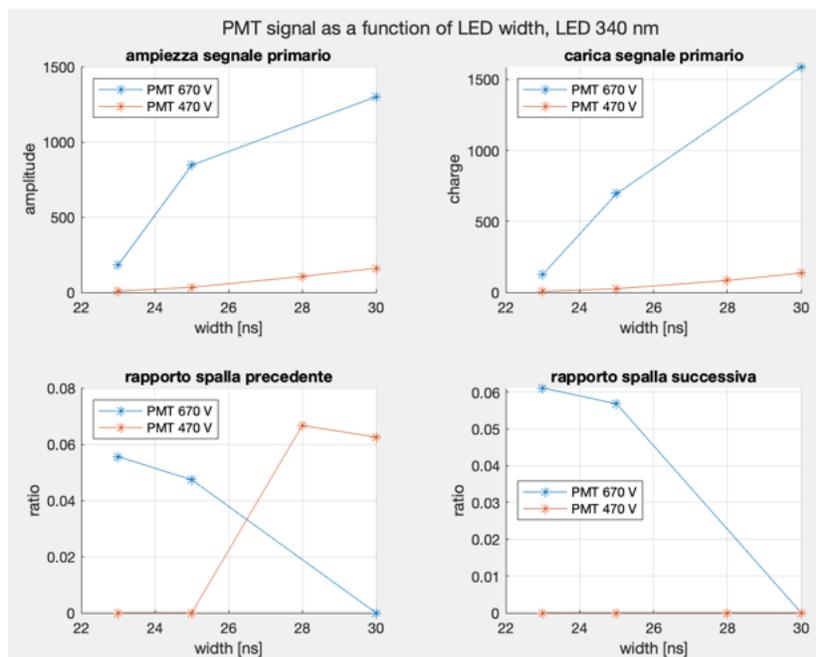


Figura 38: Ampiezza e carica del segnale primario e rapporto tra le ampiezze delle spalle (precedente e successiva) e il segnale primario, in funzione della tensione del segnale di input del LED con $\lambda = 340$ nm.

4.1.2 Analisi del segnale dei PMT in funzione dell'angolo di incidenza della luce

Per studiare come varia la forma del segnale, e le «spalle» individuate in precedenza, il funzione dell'angolo di incidenza della luce sulla finestra del PMT, è stato svolto un secondo esperimento.

Apparato sperimentale Il PMT 7459 è stato montato su un supporto rotante. Di fronte alla finestra del PMT è stata fissata l'estremità della fibra in quarzo appartenente al circuito di distribuzione. L'estremità opposta della fibra è stata connessa al LED con $\lambda = 385$ nm. Utilizzando una fibra in quarzo non irraggiata, si è riprodotta la trasmissione della luce avvenuta nel *test beam*, a meno degli effetti dovuti all'avvolgimento delle fibre in spire.

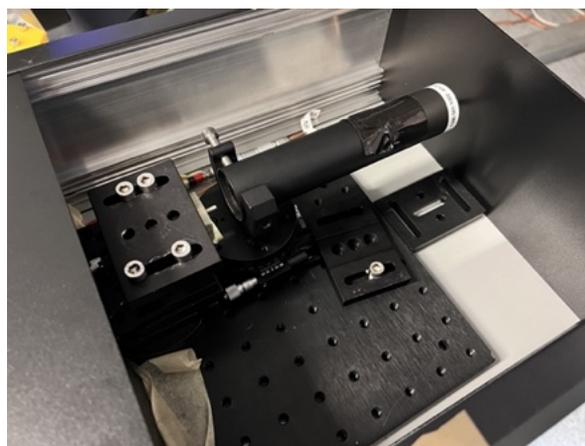


Figura 39: Apparato sperimentale utilizzato.

Il LED utilizzato è stato alimentato con un'onda quadra generata da un impulsatore, con un'ampiezza picco picco di 2.65 V e una lunghezza di 10 ns. Il segnale rilevato dal PMT è stato letto tramite un oscilloscopio. In particolare, si è osservato il valore di carica e ampiezza del picco principale, e i valori di ampiezza delle spalle. Le letture sono state prese in un range angolare di $[-20^\circ, +30^\circ]$, con uno step di 2° . Il PMT e il supporto rotante sono stati posizionati in una scatola nera, per ridurre l'influenza della luce ambientale [Fig. 39].

Analisi dei dati Per ogni punto considerato, dall'oscilloscopio sono stati letti i valori di ampiezza del picco principale e delle spalle [Fig. 40a, 40b]. Per poter valutare correttamente le ampiezze delle spalle in funzione dell'angolo di incidenza della luce, è necessario eliminare le instabilità a cui i LED sono soggetti. Per questo motivo sono stati calcolati i rapporti tra le ampiezze delle spalle e le ampiezze del segnale principale. La spalla che precede il picco principale mostra una dipendenza dall'angolo di incidenza della luce sul PMT. Maggiore è tale angolo, minore è l'ampiezza della spalla, che viene inglobata dal segnale principale. Attorno alla posizione centrale, in cui la luce arriva perpendicolarmente al PMT, l'ampiezza della spalla rimane costante, entro un range di circa $\pm 5^\circ$ [Fig. 40c]. Invece, l'ampiezza della spalla che segue il picco principale rimane circa costante al variare dell'angolo [Fig. 40d].

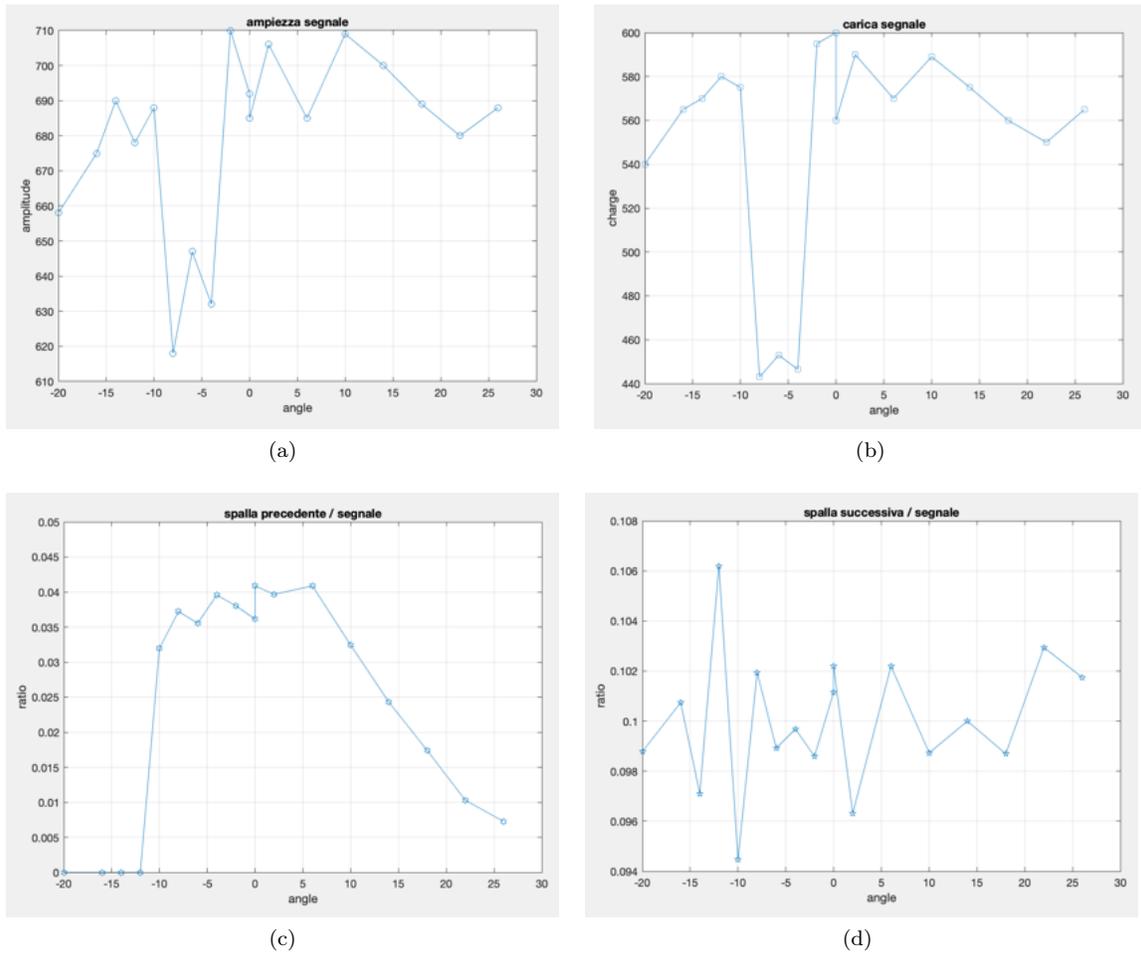


Figura 40: Andamento del segnale rilevato dal PMT R7459 in funzione dell'angolo di incidenza della luce sulla finestra del PMT. (a) Ampiezza del segnale principale. (b) Carica del segnale principale. (c) Rapporto tra l'ampiezza della spalla precedente il segnale e l'ampiezza del segnale principale. (d) Rapporto tra l'ampiezza della spalla successiva il segnale e l'ampiezza del segnale principale.

4.2 Analisi del segnale dei PMT in funzione della loro distanza dall'estremità della fibra

Dai risultati degli scan angolari fatti durante il *test beam*, i segnali rilevati dai quattro PMT risultano avere comportamenti differenti. In particolare, l'ampiezza dei segnali dei PMT R760 59 e R760 66 mostra una dipendenza dall'angolo tra il fascio di elettroni e le fibre colpite per un range angolare decisamente maggiore rispetto all'ampiezza dei segnali dei PMT R7459 e R1635. La differenza principale tra i PMT che potrebbe giustificare tale comportamento risulta essere la distanza tra la finestra del PMT e l'estremità della fibra connessa. Nel caso dei PMT R760, la copertura utilizzata per isolare il PMT dalla luce ambientale permette un contatto diretto tra la fibra e la finestra. Nei PMT R7459 e R1635 invece la fibra rimane distante un paio di centimetri dalla finestra del PMT. Per verificare se una maggiore distanza ha ridotto il range angolare in cui i PMT rilevano il segnale, è stato svolto un test in laboratorio.

Apparato sperimentale Per riprodurre le condizioni ottenute durante il *test beam*, è stato assemblato un supporto rotante, posizionandovi il LED con $\lambda = 385$ nm. Questo è stato alimentato con un onda quadra di ampiezza picco picco di 2.65 V e lunghezza di 10 ns, generata da un impulsatore. Un'estremità di una fibra in quarzo è stata fissata solidalmente al piano di lavoro, in modo da trovarsi sopra l'asse di rotazione del disco rotante. La fibra utilizzata è l'input comune di un circuito di distribuzione della luce, che divide la luce ricevuta in tre output. Alle estremità di output sono stati connessi i PMT da testare, i cui segnali sono stati letti grazie a un oscilloscopio. Il supporto è stato ruotato di 2° per ogni step, in un range di $[-40^\circ, +40^\circ]$ [Fig. 41].

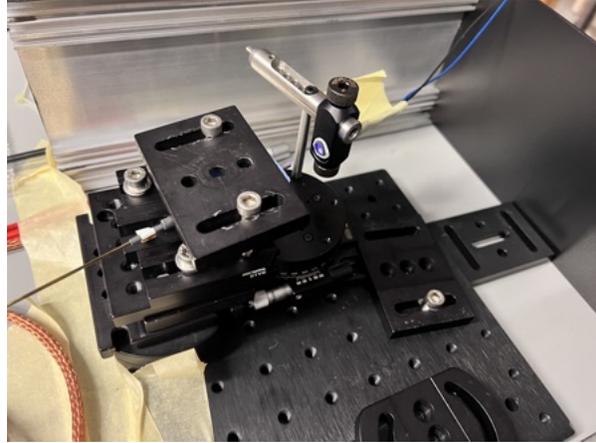


Figura 41: Apparato sperimentale utilizzato.

Nel primo test condotto, sono stati connessi il PMT R7459 e il PMT R760 66. Successivamente il test è stato ripetuto modificando la copertura del PMT R7459 in modo da ridurre la distanza tra la sua finestra e la fibra ad esso connessa. Nel secondo test sono stati connessi i PMT R1635, R760 59 e R760 66. Sul PMT R760 59 è stata montata la copertura originale del PMT R1635, mentre su quest'ultimo è stata montata la copertura opportunamente assottigliata.

Analisi dei dati Confrontando le ampiezze dei segnali dei diversi PMT, si osserva che queste rimangono circa costanti per un certo range angolare attorno al punto centrale, in cui la luce del LED risulta parallela alla fibra. In particolare, il segnale del PMT R760 66 mostra un plateau di circa $\pm 17^\circ$ attorno alla posizione centrale. Il PMT R7459 nella sua configurazione originaria mostra un comportamento costante per circa $\pm 10^\circ$ attorno alla posizione centrale [Fig. 42]. Questo range si estende a $\pm 15^\circ$ grazie all'assottigliamento della copertura, che porta la fibra ad essere più vicina alla finestra del PMT [Fig. 43]. Lo stesso effetto si riscontra negli altri PMT. Il PMT R760 59 mostra un plateau di circa 5° , mentre il PMT R1635, con la copertura più sottile più sottile, ha un comportamento costante per circa 15° [Fig. 44].

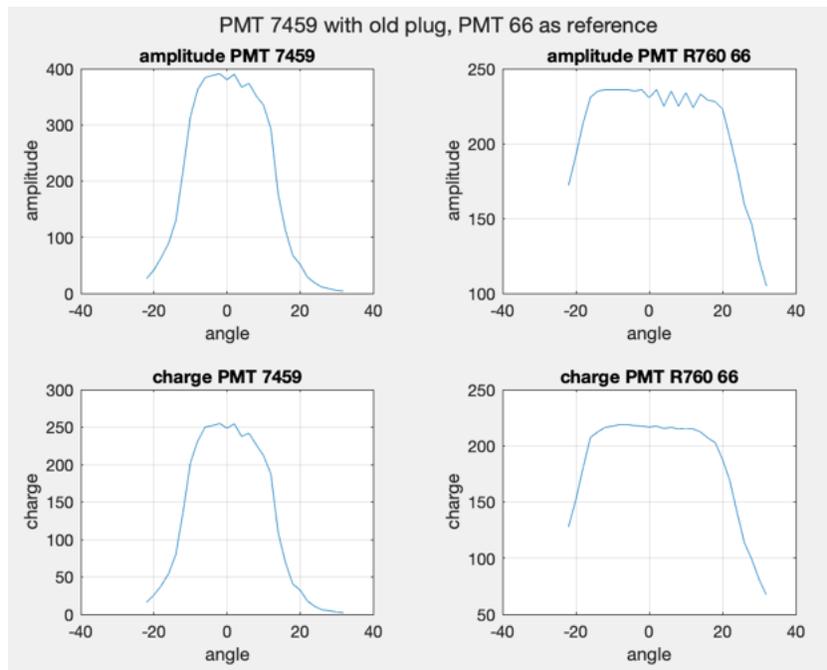


Figura 42: Ampiezza e carica del segnale del PMT R7459 con copertura originale, PMT R670 66 come riferimento: funzione dell'angolo tra la luce LED e l'estremità della fibra.

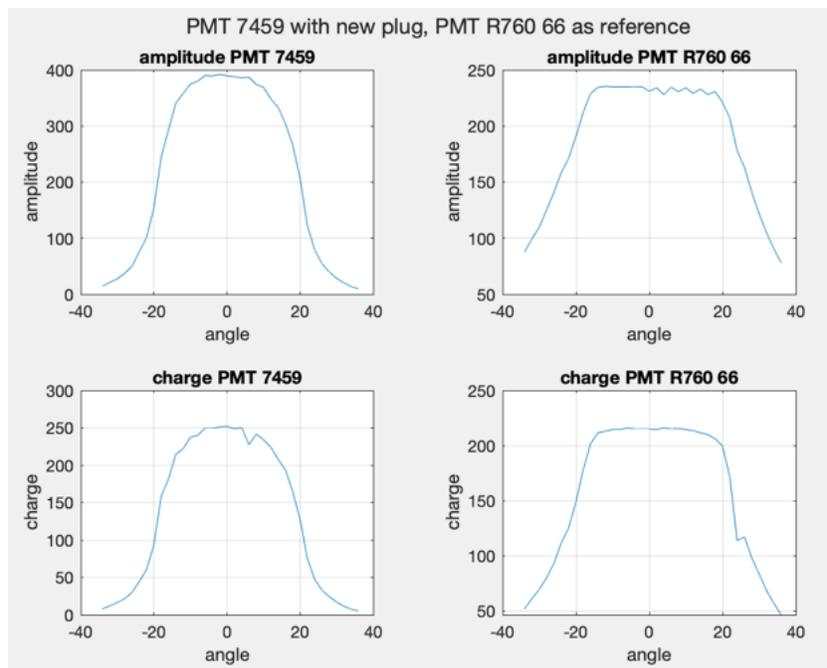


Figura 43: Ampiezza e carica del segnale del PMT R7459 con copertura modificata, PMT R760 66 come riferimento: funzione dell'angolo tra la luce LED e l'estremità della fibra.

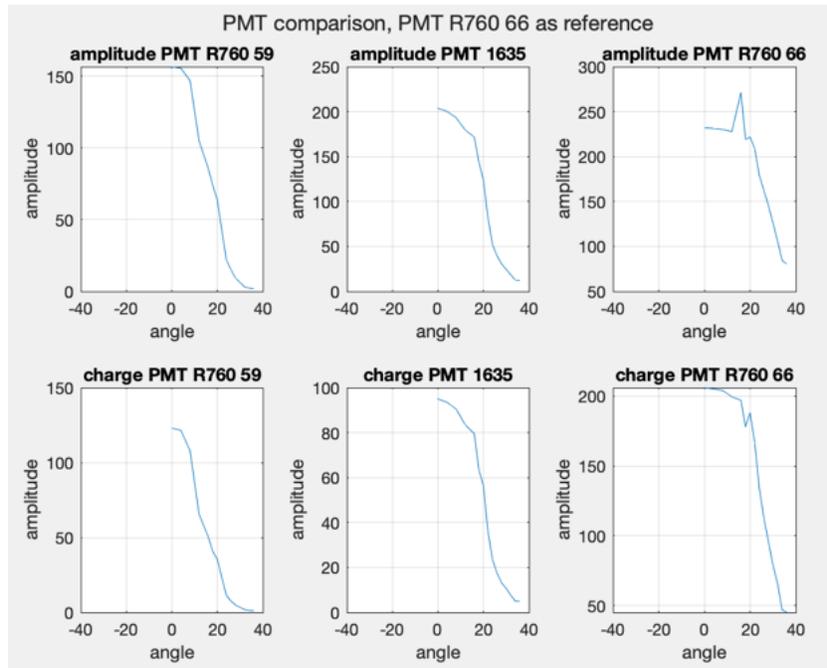


Figura 44: Ampiezza e carica del segnale del PMT R760 59 con copertura originale del PMT R16365, PMT R1635 con copertura modificata, PMT R760 66 come riferimento: funzione dell'angolo tra la luce LED e l'estremità della fibra.

Analisi dei risultati Questo test ha evidenziato la necessità di sostituire le coperture correntemente utilizzate per alcuni PMT, con lo scopo di ottimizzarne l'accoppiamento con la fibra.

4.3 Test delle fibre con luce impulsata

Dopo aver concluso il *test beam* è stato condotto un secondo test sulle fibre utilizzando la luce impulsata, per determinare l'eventuale cambiamento nella propagazione della luce lungo le fibre stesse a seguito della breve sessione di irraggiamento svolta.

Il test è stato svolto come descritto in precedenza [Cap. 2.4.1]. Ogni fibra è stata connessa al circuito di distribuzione della luce, per poter essere testata con LED aventi diverse lunghezze d'onda. Tramite un secondo circuito, l'altra estremità della fibra e il circuito di distribuzione dei LED sono stati connessi a un unico PMT. Per ogni LED con cui è stata testata ciascuna fibra, il segnale acquisito dal PMT mostra due picchi. Il primo corrisponde al segnale della luce generata dal LED, mentre il secondo corrisponde alla luce del LED propagatasi attraverso la fibra. È stato calcolato il rapporto tra l'ampiezza del segnale del LED e l'ampiezza del segnale della fibra per ogni lunghezza d'onda, in modo da eliminare le instabilità intrinseche dei LED. Infine questi risultati sono stati normalizzati rispetto ai valori ottenuti per la fibra non irraggiata. Le perdite così ottenute sono state confrontate con i risultati dei test compiuti in precedenza [Tab. 6].

λ LEDs [nm]	Fibra irr. 0.28: γ irradiation	Fibra irr. 0.28: prima	Fibra irr. 0.28: dopo	Fibra irr. 0.22: prima	Fibra irr. 0.22: dopo
280	- 97 %	- 96.3 %	- 96.5 %	- 20.0 %	- 11.1 %
340	- 95 %	- 86.5 %	- 65.5 %	- 0.6 %	- 1.7 %
385	- 43 %	- 19.7 %	- 9.3 %	- 5.0 %	- 3.3 %
467.5	- 20 %	- 5.1 %	- 8.9%	+ 5.0 %	- 1.6 %
525	- 27 %	- 7.0 %	- 26.4 %	- 21.6 %	- 16.4 %
627.5	- 34 %	- 24.9 %	- 32.3 %	+ 1.7 %	- 2.0 %

Tabella 6: Confronto tra le perdite della fibre irraggiate con aperutra numerica di 0.28 e 0.22, rispetto alla fibra non irraggiata. Perdite rilevate nei test con la luce impulsata prima e dopo il *test beam*, confrontate con le perdite a seguito dell'irraggiamento γ .

4.4 Propagazione della luce nella fibra

Durante il *test beam*, le fibre sono state avvolte in spire. L'avvolgimento modifica la geometria con cui la luce si riflette all'interno delle fibre, modificandone la propagazione. Inoltre, la propagazione della luce può dipendere dalla lunghezza d'onda della luce stessa. Per valutare l'entità di questi effetti è stato svolto un test in laboratorio. La fibra è stata testata sia in configurazione avvolta che stesa, in funzione dell'angolo tra il LED e la direzione delle fibre e della lunghezza d'onda del LED. Per determinare la distanza percorsa dalla luce nella fibra, si calcola la differenza tra il tempo di arrivo del segnale di input e del segnale della fibra. Da questi valori si può ottenere l'indice di rifrazione del materiale.

Apparato sperimentale Sono stati utilizzati tre differenti LED, alimentati tramite un impulsatore. Ognuno di questi è stato montato su un supporto in grado di ruotare con la precisione di un grado. Frontalmente al LED è stato posizionato l'input comune del circuito di distribuzione della luce composto da fibre di quarzo. Uno degli output del circuito è stato connesso al PMT R760 59, per rilevare il segnale della luce prodotta. Il secondo output è stato connesso alla fibra da testare. All'altra estremità della fibra è stato connesso il PMT R760 66. Entrambi i PMT sono stati collegati a un oscilloscopio.

Inizialmente la fibra irraggiata è stata testata in configurazione avvolta e in configurazione stesa (a forma di U) utilizzando il LED con $\lambda = 385$ nm. In seguito si è studiata la distanza percorsa dalla luce nella fibra stesa, in funzione della lunghezza d'onda. Sono stati utilizzati i LED con $\lambda = 340$ nm e $\lambda = 467.5$ nm.

Analisi dei risultati Confrontando i tempi ottenuti con la fibra avvolta in spire e la fibra stesa, si nota che l'avvolgimento non genera differenze apprezzabili nella distanza percorsa dalla luce [Fig. 45]. Il tempo di propagazione invece dipende dalla lunghezza d'onda utilizzata. Maggiore è λ , minore è la differenza tra i tempi di arrivo del segnale del LED e il segnale della fibra [Fig. 46].

In seguito, le distanze effettive percorse dalla luce sono state utilizzate per determinare l'indice di rifrazione del materiale [Cap. 5.3.3].

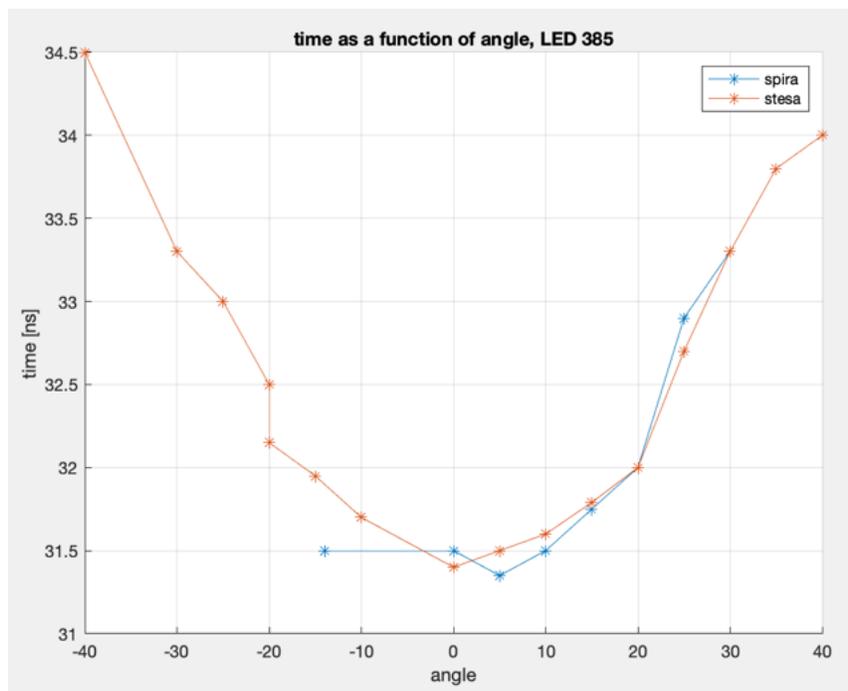


Figura 45: Tempo di arrivo del segnale della fibra rispetto al segnale del LED, in funzione dell'angolo tra la luce e la fibra, quando questa si trova avvolta in spire (linea blu) e quando si trova stesa a «U» (linea rossa).

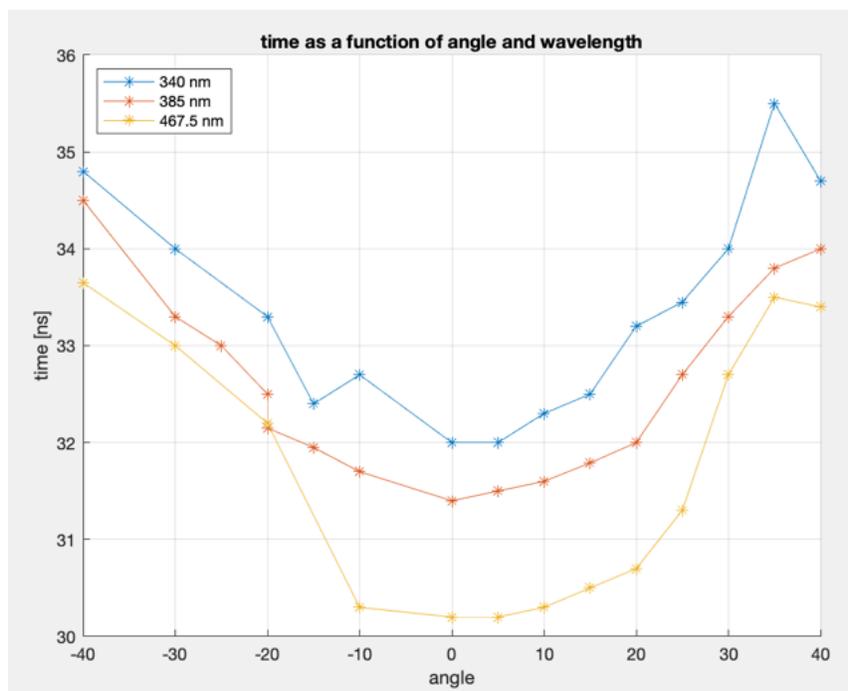


Figura 46: Tempo di arrivo del segnale della fibra rispetto al segnale del LED, in funzione dell'angolo tra la luce e la fibra, per diverse lunghezze d'onda della luce.

4.5 Effetto dei segnali continui su PMT: beam dark current

Nei risultati ottenuti dalle scansioni angolari effettuate durante il *test beam*, si è evidenziata la presenza della *beam dark current* [Cap. 3.5.1]. Questo è un segnale di bassa intensità e lunga durata, localizzato attorno al massimo del segnale diretto del fascio. Per valutare come la presenza della dark current influisca sul segnale principale, sono stati effettuati dei test in laboratorio.

Apparato sperimentale Per poter studiare una condizione simile a quella riscontrata durante il *test beam*, è stato necessario ricreare il segnale della *dark current* e il segnale del fascio. Per fare ciò, sono stati utilizzati due LED alimentati da due onde quadre sfasate di 0.003° , generate da un impulsatore. Per ricreare la *dark current*, si è utilizzato il LED con $\lambda = 467.5$ nm. Invece, il LED con $\lambda = 385$ nm è stato utilizzato per ricreare il segnale del fascio. Entrambi sono stati connessi al circuito di distribuzione, i cui output sono stati connessi ai PMT R760 59, R760 66 e R7459. Nella condizione nominale, i PMT sono stati alimentati con gli stessi valori di tensione utilizzati durante il *test beam*. I PMT sono stati connessi a un oscilloscopio per la lettura dei segnali. La fase tra i due segnali ha reso possibile ricreare la condizione osservata durante il *test beam*. In seguito, sono stati variati i parametri di alimentazione dei LED e dei PMT, per studiare le dipendenze dei segnali rilevati [Tab. 7].

Parametri di alimentazione	Condizione nominale	Variazioni dei parametri
Tensione dei PMT	PMT R760 59: 700 V PMT R760 66: 550 V PMT R7459: 470 V	Incremento di + 50 V Incremento di + 100 V
Tensione del LED <i>dark current</i>	1.40 V	1.30 V, 1.35 V, 1.45 V
Frequenza del LED <i>dark current</i>	10 Hz (fase di 0.003°)	20 Hz (fase di 0.006°) 100 Hz (fase di 0.03°)

Tabella 7: Parametri di alimentazione dei LED e dei PMT utilizzati durante i test.

Analisi dei dati Per studiare come il segnale primario è influenzato dalla *dark current*, si confrontano le ampiezze e le cariche del segnale in presenza e assenza della *dark current*. Il segnale del fascio è stato ottenuto accendendo esclusivamente il LED $\lambda = 385$ nm, mentre il segnale della *dark current* si è ottenuto accendendo il LED $\lambda = 467.5$ nm. Per valutare il segnale totale, generato dalla sovrapposizione del segnale del fascio e della *dark current*, sono stati accessi entrambi i LED [Fig. 47]. Per calcolare la carica dei segnali, si sono integrate le ampiezze fra gli estremi stessi del segnale. Infine, il valore ottenuto come somma delle ampiezze è stato diviso per la resistenza dell'oscilloscopio.

In seguito, si è studiato come i segnali variano in funzione dei parametri di alimentazione. Per evidenziare le variazioni del segnale del fascio a seguito della presenza della *dark current*, la carica del segnale totale è stata divisa per la carica del solo segnale del fascio.

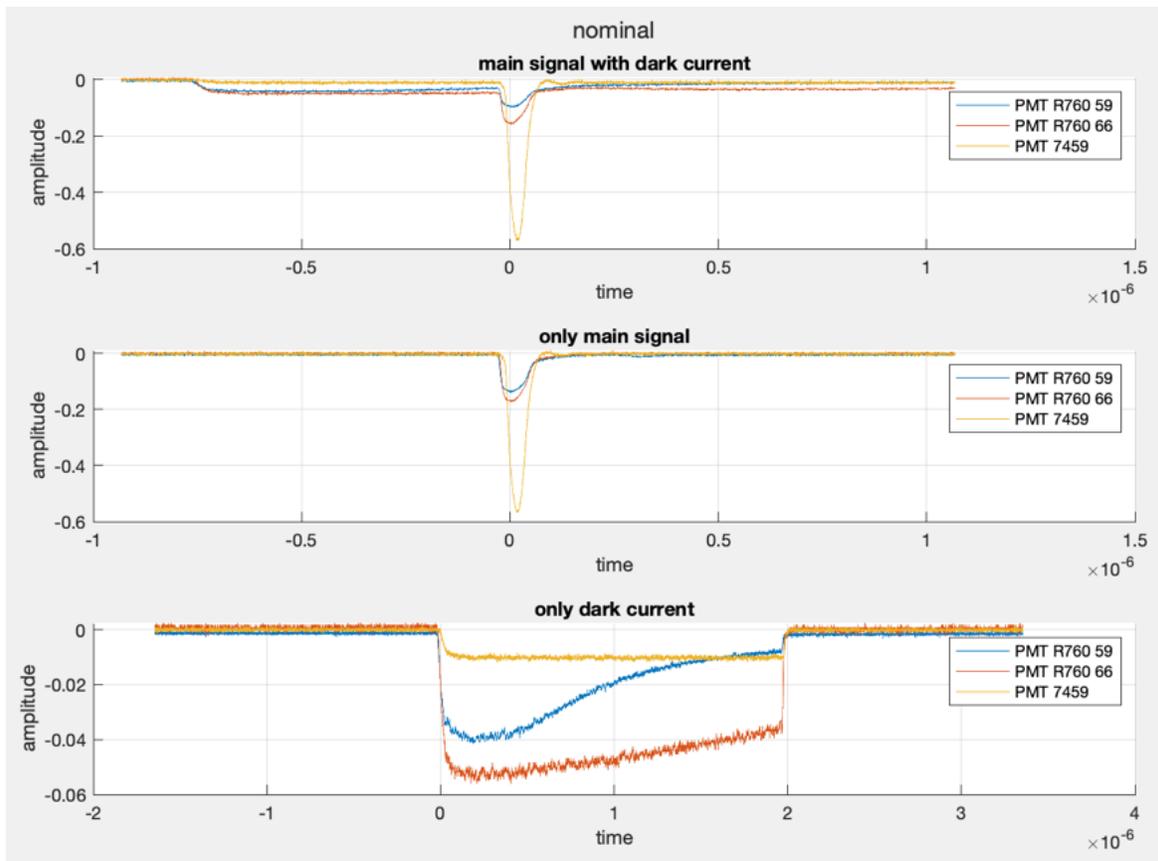


Figura 47: Ampiezza del segnale del fascio in presenza della *dark current* (segnale totale), ampiezza del solo segnale del fascio, ampiezza del solo segnale della *dark current*.

Analisi dei risultati Il rapporto tra la carica del segnale totale e il solo segnale del fascio permette di determinare come la *dark current* influenzi il segnale principale. In particolare, dall'analisi dei dati dei test effettuati appare una dipendenza del rapporto tra le cariche dall'alimentazione dei PMT [Fig. 48] e dai parametri della *dark current* [Fig. 49, 50]. L'impatto della *dark current* sul segnale principale varia quindi per le diverse condizioni al contorno, rendendo difficile riprodurre la situazione sperimentata durante il *test beam*. Le variazioni nell'output della luce di LED potrebbero essere individuate come la causa di alcune delle variazioni tra i segnali totali. Ulteriori studi devono essere svolti per poter comprendere appieno il fenomeno e poterlo modellizzare correttamente. In seguito, tale modello potrà essere utilizzato per effettuare una correzione sui risultati delle scansioni angolari, per ricavare i valori di ampiezza del segnale del fascio senza l'influenza della *dark current*.

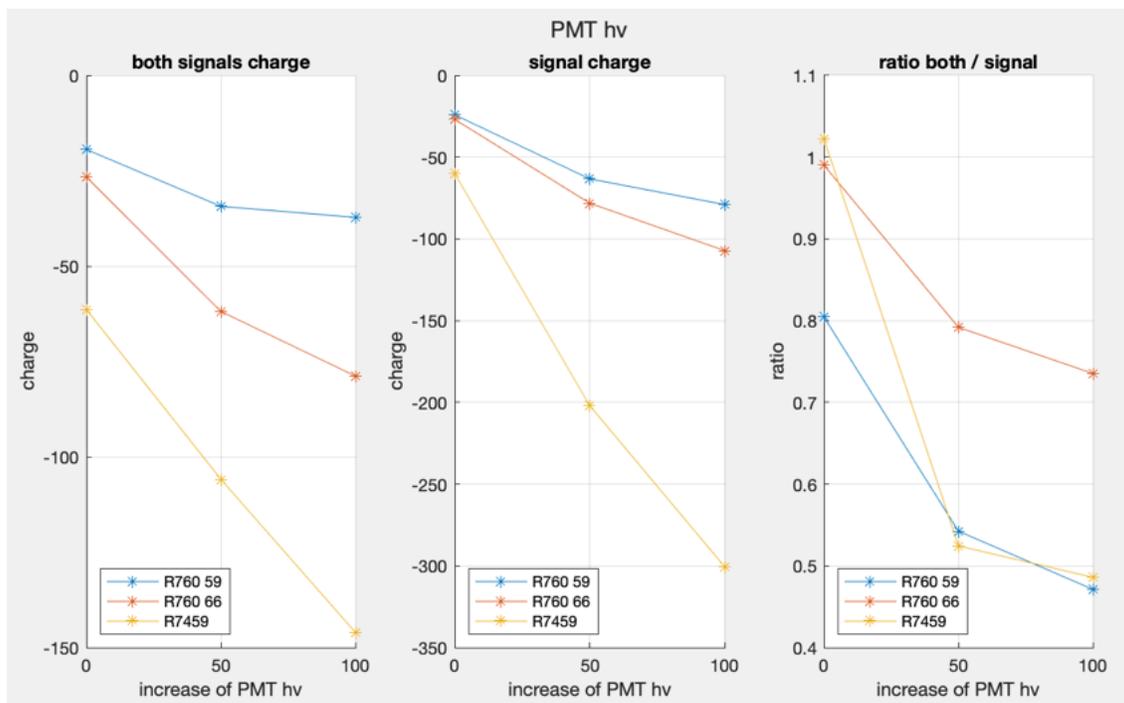


Figura 48: Carica del segnale totale, carica del solo segnale del fascio, rapporto tra le cariche del segnale totale e del segnale del fascio: funzione della tensione di alimentazione dei PMT.

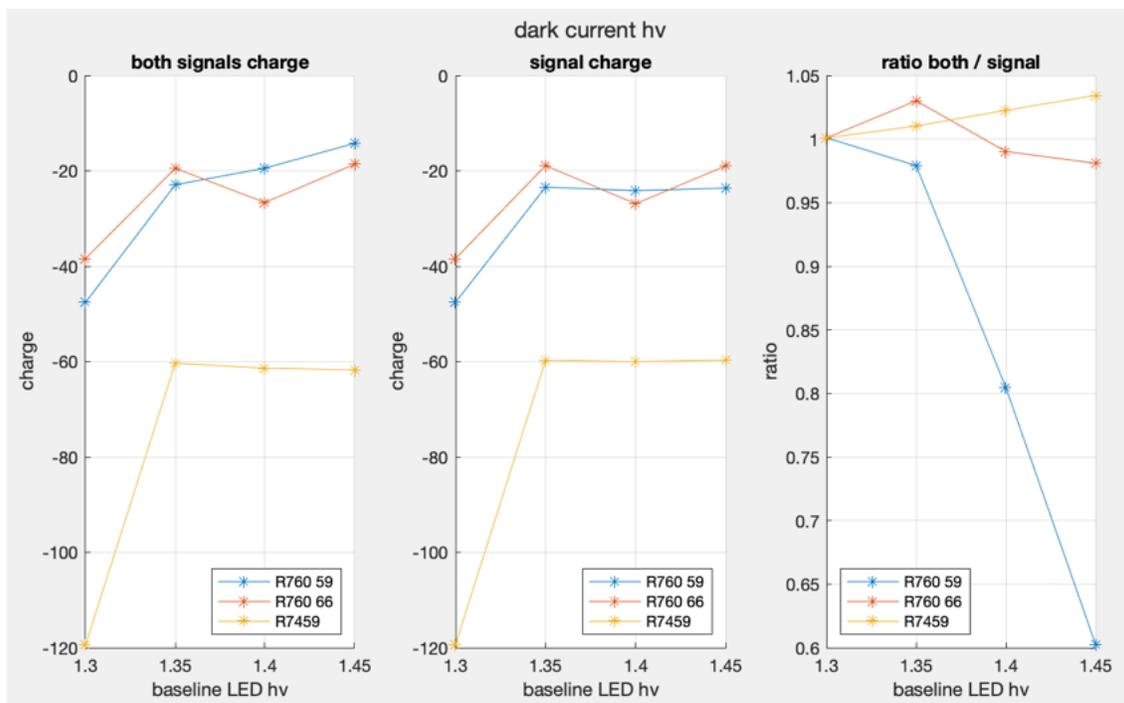


Figura 49: Carica del segnale totale, carica del solo segnale del fascio, rapporto tra le cariche del segnale totale e del segnale del fascio: funzione della tensione del LED della *dark current*.

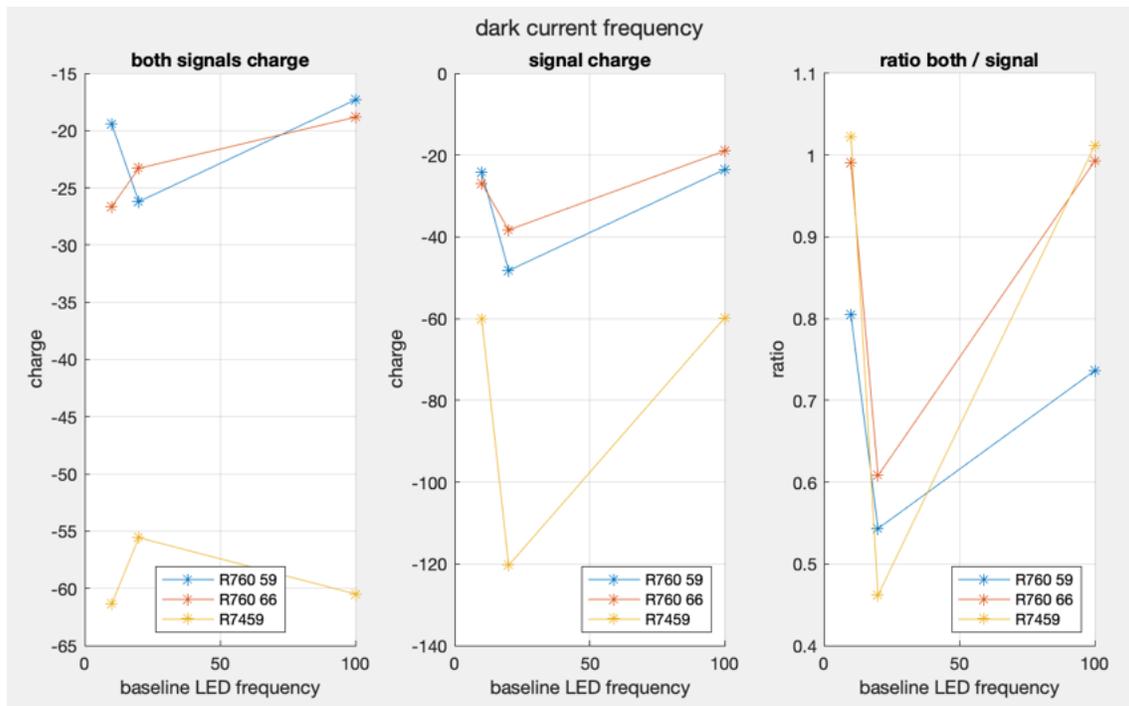


Figura 50: Carica del segnale totale, carica del solo segnale del fascio, rapporto tra le cariche del segnale totale e del segnale del fascio: funzione della frequenza del LED della *dark current*.

5 Analisi a posteriori dei dati presi

5.1 Ampiezza e carica del segnale in funzione dell'angolo di incidenza

Uno degli obiettivi del *test beam* è lo studio del segnale generato dal passaggio delle particelle nella fibra in funzione dell'angolo tra la fibra e il fascio. Per ogni fibra testata, si è analizzata la variazione della carica del segnale diretto in funzione dell'angolo di rotazione del supporto. Allo scopo di determinare la variazione della carica del segnale, è stato calcolato il rapporto tra la carica del segnale relativo a una posizione angolare del supporto e la carica del segnale della posizione successiva. Nello specifico, è stato individuato il massimo della carica del segnale diretto, grazie al quale il range angolare del segnale è stato diviso in due regioni. Nell'intervallo inferiore, la carica di ogni posizione angolare è stata divisa per la carica successiva, mentre nell'intervallo superiore la carica è stata divisa per la carica precedente. La variazione della carica del segnale c espressa in funzione dell'angolo di rotazione del supporto γ corrisponde alla derivata prima della carica, indicata come $dc/d\gamma$.

All'estremità dell'intervallo di rotazione, il valore assoluto della carica aumenta. Questo è probabilmente dovuto alla presenza del segnale di *scattering* degli elettroni sulla struttura del supporto.

Fibra irraggiata con apertura numerica di 0.22 In questa fibra il segnale diretto è ottenuto per angoli di rotazione negativi. La carica presenta un minimo, attorno al quale è localizzato il segnale. Tale effetto è dovuto al comportamento del PMT R7459, come studiato in precedenza [Cap. 4.2]. Si individuano due picchi nella variazione della carica. Inoltre, verso gli estremi del range di rotazione aumenta la distanza percorsa dal fascio all'interno della fibra, a causa della maggiore inclinazione. Questo fenomeno, unito alla forma del cono di luce Cherenkov, compensa le perdite in tali regioni angolari [Fig. 51]. Le perdite sono dovute all'effetto della distanza tra l'estremità della fibra e il PMT, e al fatto che l'angolo di riflessione della luce nella fibra va verso i limiti della riflessione totale.

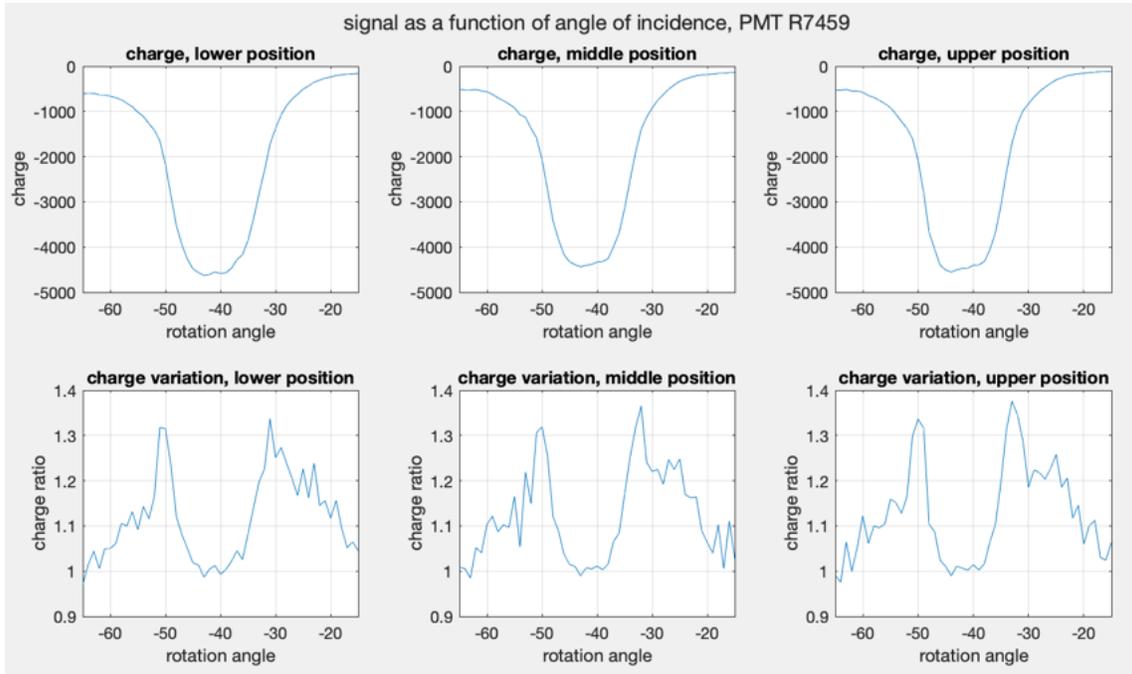


Figura 51: Carica e rapporto tra la carica dei valori successivi e precedenti, per ogni scansatura, in funzione dell'angolo di rotazione del supporto: fibra irraggiata con apertura numerica di 0.22, PMT R7459.

Fibra non irraggiata con apertura numerica di 0.28 Per la configurazione del setup sperimentale, il segnale diretto si osserva per angoli di rotazione positivi. La carica del segnale presenta un minimo più definito rispetto al caso precedente, e il range angolare del segnale risulta essere limitato a circa 35° , per le caratteristiche del PMT R1635. Anche per questa fibra, la variazione della carica mostra due picchi, e la distanza percorsa dal fascio nella fibra e la forma del cono di luce compensano le perdite verso gli estremi di rotazione del supporto [Fig. 52].

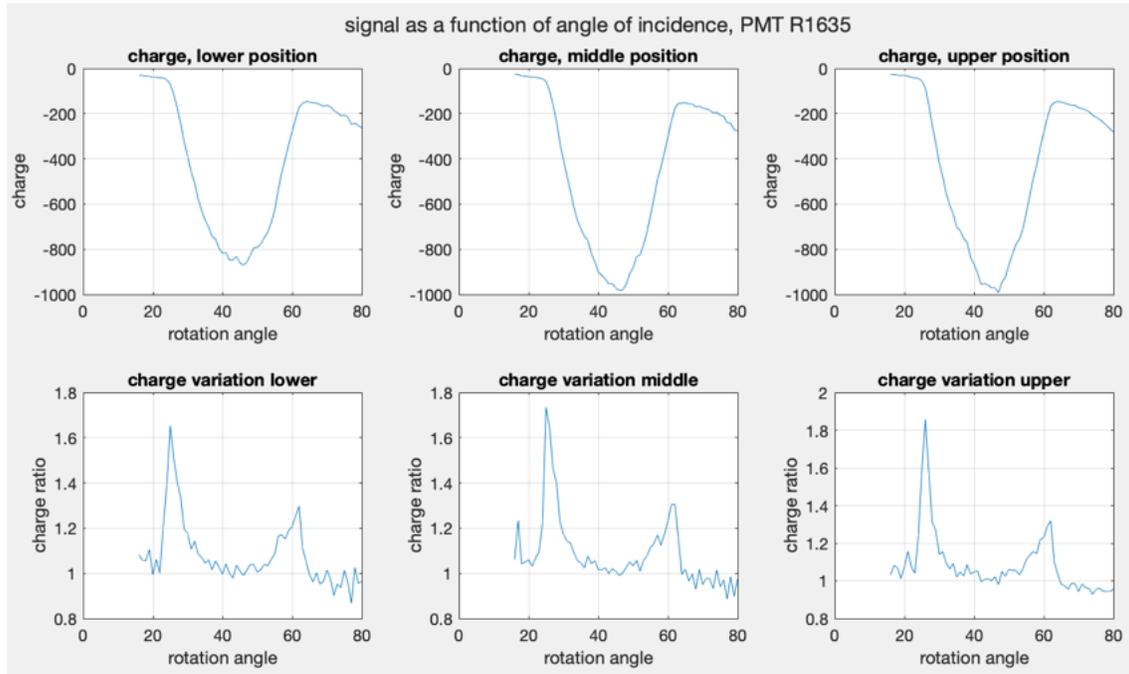


Figura 52: Carica e rapporto tra la carica dei valori successivi e precedenti, per ogni scanalatura, in funzione dell'angolo di rotazione del supporto: fibra non irraggiata con apertura numerica di 0.28, PMT R1635.

Fibra irraggiata con apertura numerica di 0.28 L'andamento della carica di questa fibra risulta differente rispetto ai casi precedenti, dal momento che il PMT R760 66 acquisisce il segnale per una range angolare maggiore. Il PMT è soggetto alla presenza della *dark current*, situata tra i 30° e i 60° [Cap. 3.4.1]. In questa regione il segnale del fascio ne è influenzato, pertanto i valori di carica nella zona compresa tra le bande verticali non sono attendibili. In particolare, nella scanalatura inferiore l'interazione con la *dark current* provoca un avvallamento del segnale primario, mentre nelle scanalature superiori si osserva un plateau [Fig. 53].

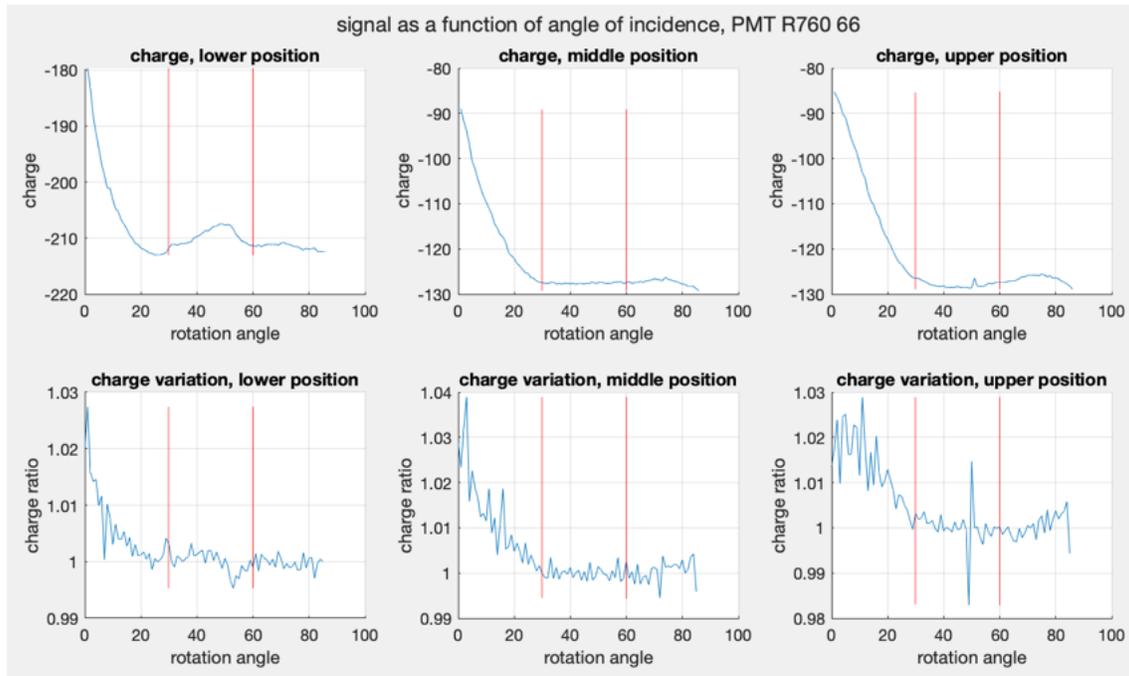


Figura 53: Carica e rapporto tra la carica dei valori successivi e precedenti, per ogni scanalatura, in funzione dell'angolo di rotazione del supporto: fibra irraggiata con apertura numerica di 0.28, PMT R760 66. Le linee rosse rappresentano la regione in cui la *dark current* del fascio rende poco attendibili i valori misurati.

5.2 Ampiezza e carica del segnale in funzione dell'irraggiamento delle fibre

Il secondo obiettivo del test beam è lo studio del segnale generato dal passaggio delle particelle nelle fibre in funzione dell'irraggiamento della fibra stessa. Per questa analisi, si sono studiati i dati delle scansioni verticali. Le scanalature inferiori contengono una delle estremità delle fibre, che non hanno subito nessun irraggiamento. Per questo, la luce generata nella scanalatura inferiore si propaga fino al PMT generando un segnale diretto non influenzato dall'irraggiamento del materiale. Ci si aspetta che tale segnale sia maggiore di quello generato dalla luce prodotta nelle scanalature superiori, in quanto la luce si propaga nel quarzo irraggiato.

Per ogni posizione del fascio, si è calcolata la carica del segnale come somma delle ampiezze tra gli estremi del segnale stesso. Per individuarli, è stata calcolata la media della *baseline*, considerando gli ultimi 200 campionamenti. La carica è stata quindi calcolata integrando l'ampiezza tra i punti in cui il segnale è minore della *baseline* trovata. Dai risultati ottenuti, è possibile individuare tre picchi di carica. Questi corrispondono alle posizioni del fascio in cui questo è centrato rispetto le tre scanalature. I massimi (in valore assoluto) dei tre picchi sono stati normalizzati rispetto al massimo del picco iniziale, corrispondente alla prima scanalatura. In questo modo, è possibile determinare la perdita di segnale dovuto alla trasmissione della luce nelle fibre irraggiate rispetto alla trasmissione nel quando non irraggiato.

La fibra irraggiata con apertura numerica di 0.22 è stata connessa al PMT R7459, che rileva il segnale diretto quando il supporto si trova a -45° rispetto alla direzione del fascio. I valori dei minimi di carica normalizzati per la scanalatura inferiore mostrano una riduzione del segnale in corrispondenza della scanalatura superiore, come atteso. Invece, il segnale relativo alla luce prodotta nella scanalatura

centrale appare maggiore rispetto a quello della scanalatura inferiore. Questa differenza è minima, e può essere causata da un'impresione sperimentale o del metodo di calcolo [Fig. 54, 55a].

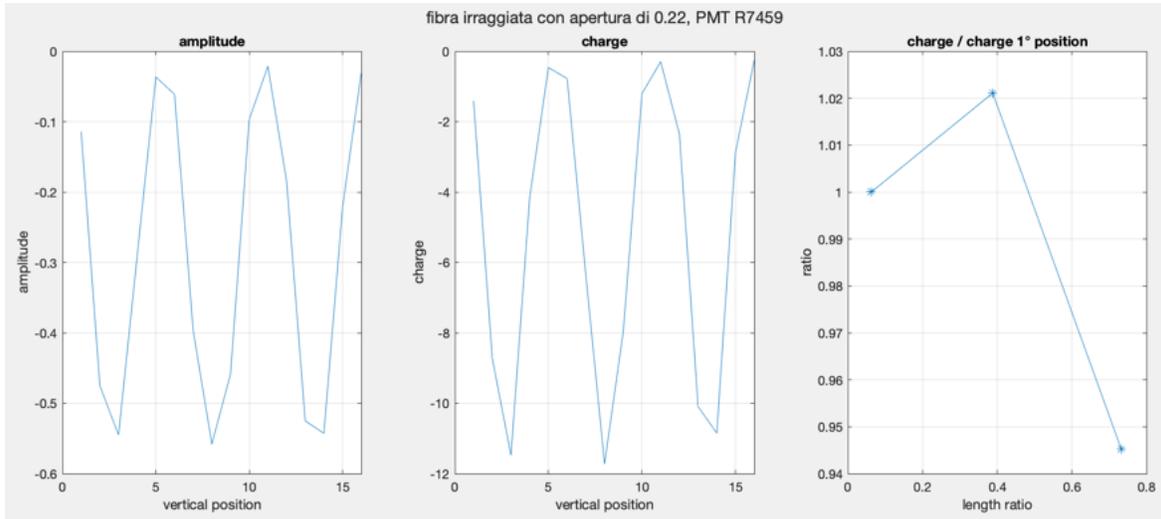


Figura 54: Ampiezza e carica in funzione della posizione verticale del fascio, rapporto tra i minimi delle cariche e il primo picco in funzione della distanza del punto di generazione dal PMT: fibra irraggiata con apertura numerica di 0.22, PMT R7459.

Durante le scansioni verticali, le fibre con apertura numerica di 0.28 sono state connesse ai PMT R760, i cui segnali diretti sono influenzati dalla presenza della *dark current*. Per questo motivo lo studio del segnale in funzione dell'irraggiamento è stato svolto utilizzando i dati delle scansioni angolari. La fibra non irraggiata e la fibra irraggiata con apertura di 0.22 sono state connesse ai PMT R1635 e R7459, i quali non sono influenzati dalla *dark current*. Sono quindi stati considerati i minimi dei segnali diretti per ogni scanalatura [Fig. 55b]. La fibra irraggiata con apertura di 0.28 è stata connessa al PMT R760 66, e per evitare il range angolare della *dark current* si è considerato il segnale diretto corrispondente all'angolo di rotazione di 25°. I tre valori ottenuti per le due fibre irraggiate sono poi stati normalizzati dividendoli per i valori della fibra non irraggiata [Fig. 55c]. Tuttavia, i risultati della fibra irraggiata con apertura di 0.28 non sono indicativi, poiché per un errore di montaggio la scanalatura inferiore contiene due spire della fibra irraggiata, invece di una. Di conseguenza, il segnale di tale scanalatura è la somma della luce generata nel primo segmento di fibra non irraggiato e la luce generata in un segmento di fibra che ha subito un irraggiamento, anche se in dosi non elevate. Per questo motivo si riportano solo i risultati per la fibra irraggiata con apertura numerica di 0.22, ottenuti con le scansioni verticali e angolari.

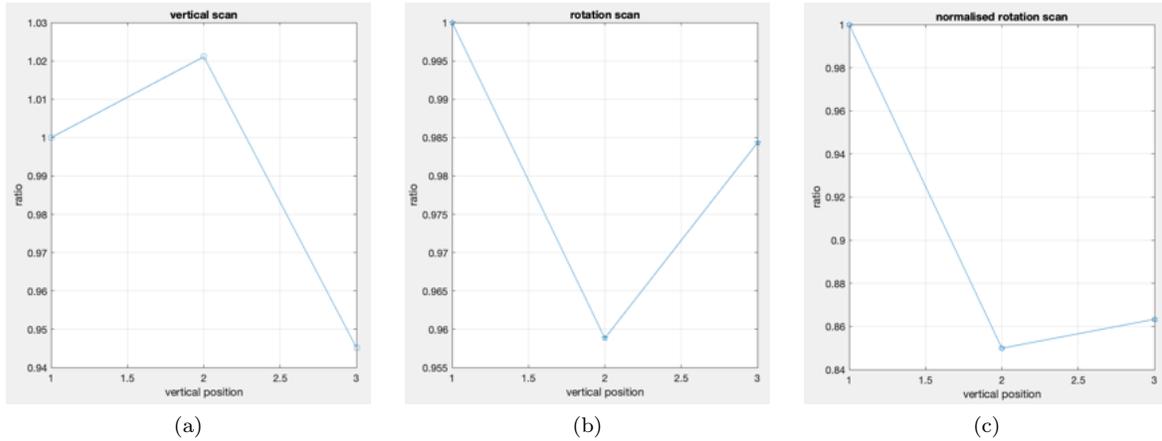


Figura 55: (a) Rapporti tra le cariche delle scanalature ottenuti con le scansioni verticali (ultimo grafico di Fig. 54) e il minimo della carica della scanalatura inferiore. (b) Rapporti tra le cariche delle scanalature ottenuti con le scansioni angolari e il minimo della carica della scanalatura inferiore. (c) Rapporti tra le cariche delle scanalature ottenuti con le scansioni angolari, normalizzati per i rapporti della fibra non irraggiata, e il minimo della carica della scanalatura inferiore.

5.3 Indice di rifrazione

L'indice di rifrazione delle fibre è un valore importante per il calcolo della distanza reale percorsa dalla luce Cherenkov generata dal fascio. Conoscere l'effettiva distanza di propagazione della luce permette di ottenere una correzione per l'irraggiamento delle fibre. A causa dell'inattesa presenza della *dark current*, non è stato possibile ottenere uno studio completo del segnale generato dal fascio in funzione dell'angolo tra le fibre e il fascio stesso. Nonostante ciò, i dati raccolti sono sufficienti per poter calcolare l'indice di rifrazione delle fibre.

5.3.1 Indice di rifrazione utilizzando i minimi del segnale

L'indice di rifrazione delle fibre in quarzo può essere determinato utilizzando la formula che permette di ricavare l'angolo Cherenkov: $\cos\theta_c = 1/(\beta n)$. n è l'indice di rifrazione del materiale, mentre $\beta = v/c$ è il rapporto tra la velocità delle particelle e la velocità della luce. Per le specifiche del fascio di elettroni con cui si è condotto il test team, tale rapporto può essere considerato unitario. Per poter ricavare il valore di n è necessario determinare l'angolo Cherenkov θ_c , ovvero l'angolo tra la direzione di arrivo del fascio di particelle e la superficie del cono su cui si propaga la luce generata dall'interazione col quarzo [Fig. 56].

Il segnale rilevato durante le scansioni angolari raggiunge la sua ampiezza massima quando una parte del cono di luce Cherenkov risulta collineare con la direzione delle fibre, per cui la luce viene trasmessa senza riflessioni. Ciò avviene quando il supporto si trova ruotato di un angolo $\gamma_{max} \approx \pm 45^\circ$ rispetto alla direzione del fascio. Tali angoli sono stati calcolati in corrispondenza del minimo della carica del segnale diretto e riflesso. La metà dell'angolo totale ricavato tra i picchi del segnale diretto e riflesso corrisponde alla semi apertura del cono Cherenkov, ed è complementare all'angolo θ_c . Una volta determinato l'angolo Cherenkov è possibile calcolare l'indice di rifrazione del materiale invertendo la formula precedente, per cui $n = 1/\cos\theta_c$ [Tab. 8].

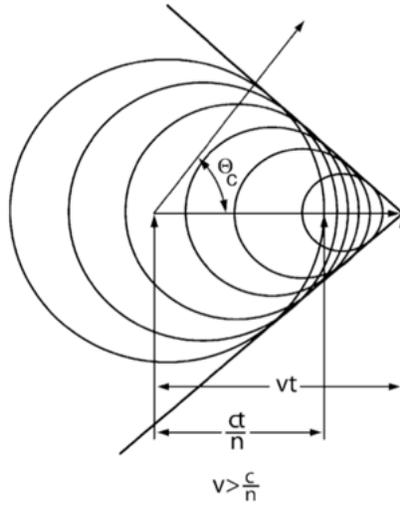


Figura 56: Generazione dell'effetto Cherenkov per il passaggio di una particella nel mezzo, avente una velocità maggiore della velocità di propagazione della luce nel mezzo stesso.

Fibre testate	Scanalatura inferiore	Scanalatura centrale	Scanalatura inferiore
Fibra non irraggiata con apertura numerica di 0.28, PMT R1635	1.3673	1.3786	1.3786
Fibra irraggiata con apertura numerica di 0.28, PMT R760 66	1.4020	1.4267	1.4142
Fibra irraggiata con apertura numerica di 0.22, PMT R7459	1.4396	1.4396	1.4020

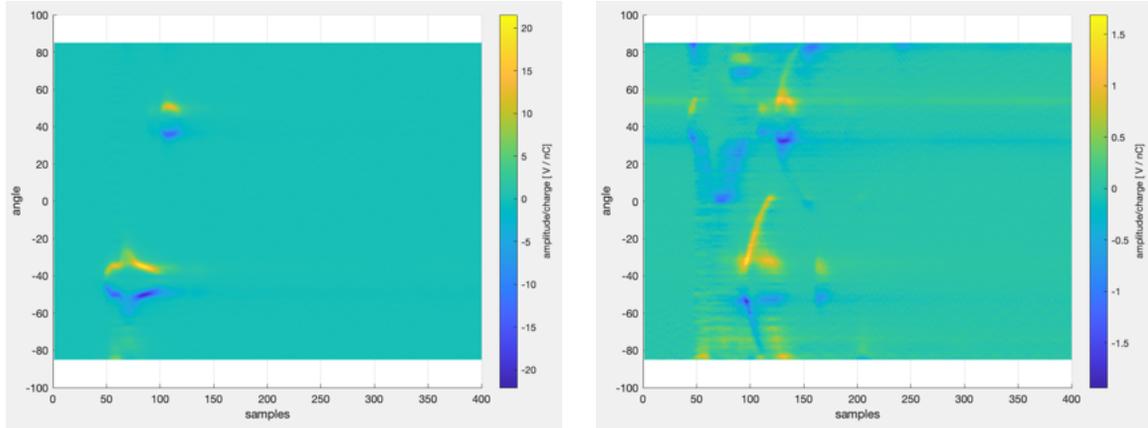
Tabella 8: Indici di rifrazione calcolati con i minimi della carica per le tre fibre testate, utilizzando per ciascuna i dati delle scansioni angolari di ogni scanalatura.

5.3.2 Indice di rifrazione utilizzando il gradiente

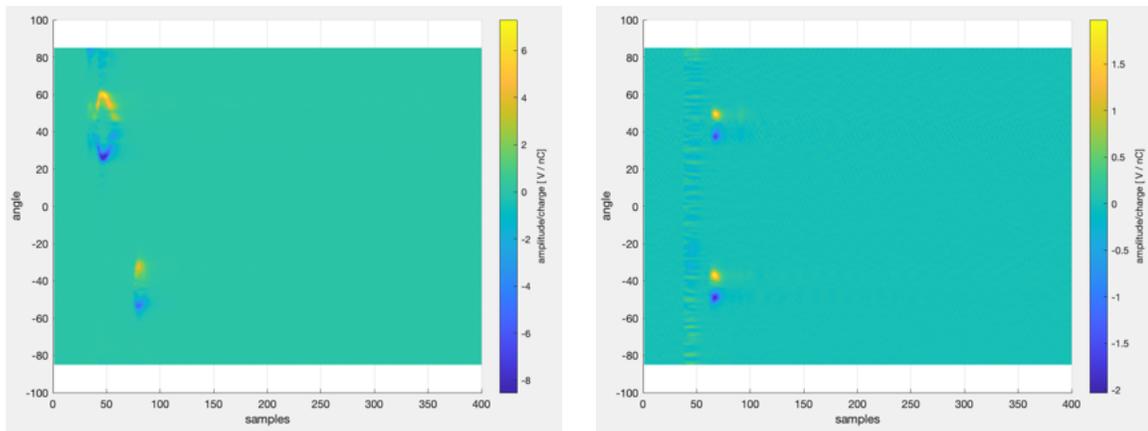
Il calcolo dell'indice di rifrazione grazie al metodo descritto in precedenza non risulta particolarmente accurato, in quanto la determinazione del punto di massimo non è precisa. Per ottenere risultati più accurati si calcola il gradiente del segnale lungo l'asse y [Fig. 57]. Ciò permette di determinare la variazione del segnale in funzione dell'angolo di incidenza tra le fibre e il fascio.

Il gradiente presenta un picco di minimo e un picco di massimo nelle regioni adiacenti alla zona in cui si individua il massimo assoluto del segnale diretto e riflesso. Si individuano quindi gli angoli corrispondenti a tali picchi. L'emissione di luce Cherenkov in entrambe le direzioni di rotazione è un fenomeno simmetrico. Per questo motivo, la differenza tra gli angoli dei due minimi (e massimi) del gradiente è pari all'angolo tra il massimo del segnale diretto e del segnale riflesso. L'angolo Cherenkov θ_c risulta essere il supplementare di tale angolo. Il valore medio dell'angolo Cherenkov per la distribuzione di lunghezze d'onda della luce prodotta nella fibra è pari a $\theta_c = 46.78^\circ$. L'indice di rifrazione può essere determinato con la formula usata in precedenza: $n = 1/\cos\theta_c$ [Tab. 9].

Dal momento che i punti di massimo e minimo del gradiente sono simmetrici rispetto al valore massimo del segnale, tale punto può essere individuato con più precisione calcolandolo come media tra i picchi di minimo e massimo del gradiente.



(a) Fibra irraggiata con apertura numerica di 0.22, PMT R7459. (b) Fibra irraggiata con apertura numerica di 0.28, PMT R760 66.



(c) Fibra non irraggiata con apertura numerica di 0.28, PMT R1635. (d) Circuito di distribuzione dei LED, PMT R760 59.

Figura 57: Gradienti lungo l'asse y del segnale di una scansione angolare, scanalatura centrale.

Fibre testate	Scanalatura inferiore	Scanalatura centrale	Scanalatura inferiore
Fibra non irraggiata con apertura numerica di 0.28, PMT R1635	1.4873	1.4331	1.4331
Fibra irraggiata con apertura numerica di 0.28, PMT R760 66	1.4595	1.4663	1.4595
Fibra irraggiata con apertura numerica di 0.22, PMT R7459	1.4732	1.4595	1.4732

Tabella 9: Indici di rifrazione calcolati con i minimi della carica per le tre fibre testate, utilizzando per ciascuna i dati delle scansioni angolari di ogni scanalatura.

5.3.3 indice di rifrazione utilizzando il tempo di arrivo

Per poter confrontare i valori dell'indice di rifrazione ottenuti con in metodi precedenti, questo è stato calcolato a partire dai risultati del test effettuato in laboratorio [Cap. 4.4], che garantisce una migliore accuratezza del setup sperimentale.

Nel test effettuato tre LED ($\lambda = 340$ nm, $\lambda = 385$ nm, $\lambda = 467.5$ nm) sono stati connessi a un circuito di distribuzione composto da fibre in quarzo. Uno degli output del circuito è stato connesso alla fibra irraggiata con apertura numerica di 0.28, alla cui estremità opposta è stato connesso il PMT R760 66. Il secondo output del circuito è stato connesso al PMT R760 59, in modo da poter rilevare il segnale prodotto dal LED. Entrambi i segnali sono stati letti tramite un oscilloscopio. Dal momento che una parte di luce prodotta si propaga lungo la fibra, il segnale ha un certo ritardo rispetto al segnale del LED.

L'indice di rifrazione è definito come $n = c/v$, dove c è la velocità della luce nel vuoto e v è la velocità della luce nel mezzo considerato. La velocità di propagazione si può esprimere come $v = l/\Delta t$, dove l è la lunghezza della fibra e Δt è la differenza tra il tempo di arrivo del segnale del LED e della fibra. L'indice di rifrazione è quindi ricavato dalla formula $n = \Delta t/l$. Dal momento che variando l'angolo tra il LED e l'estremità della fibra varia il percorso di propagazione della luce, l'indice di rifrazione è stato calcolato quando il LED e la fibra sono allineati. Dai risultati ottenuti, si nota che l'indice di rifrazione aumenta al diminuire della lunghezza d'onda della luce [Tab. 10].

$\lambda = 340$ nm	$\lambda = 385$ nm	$\lambda = 467.5$ nm
1.5473	1.5183	1.4603

Tabella 10: Indice di rifrazione calcolato a partire dal tempo di arrivo del segnale della fibra rispetto al segnale del LED, in funzione della lunghezza d'onda della luce.

5.4 Distanza di propagazione della luce nella fibra

Per poter effettuare una correzione del segnale prodotto dalla luce Cherenkov nelle fibre per l'irraggiamento del materiale, è necessario conoscere la distanza di propagazione della luce nelle fibre stesse. La distanza effettiva è stata ricavata a partire dall'analisi del segnale riflesso, dal momento che il segnale diretto è influenzato da diversi contributi non direttamente correlati alla luce Cherenkov.

I dati acquisiti dal PMT R760 66 mostrano un andamento ad arco del segnale riflesso, che descrive il tempo di arrivo del segnale in funzione dell'angolo tra le fibre e il fascio (γ).

- Il segnale raggiunge la sua massima ampiezza, in valore assoluto, in corrispondenza dell'angolo di incidenza γ_{max} tra il fascio di elettroni e la fibra. In questa configurazione del supporto, una parte del cono di luce Cherenkov risulta collineare con la direzione delle fibre, per cui la luce viene trasmessa senza riflessioni percorrendo la minima distanza possibile. Per questo motivo, la distanza di propagazione della luce nella fibra è pari alla lunghezza l della fibra stessa. La distanza è espressa dalla formula $d_{min} = l = t_{min}(c/n)$, dove t_{min} è il tempo di propagazione e c/n è la velocità di propagazione della luce nel mezzo considerato.
- Quando il supporto si trova a un generico angolo γ rispetto al fascio, la luce all'interno della fibra si riflette con un angolo α rispetto all'asse della fibra stessa. La distanza di propagazione della fibra aumenta, ed è espressa dalla formula $d_{eff} = t(c/n)$. Per ogni posizione angolare del supporto è stato calcolato il tempo di propagazione del segnale riflesso rispetto al tempo di propagazione del picco del segnale. Il fattore Δt è stato ottenuto come differenza tra il *sample* di arrivo del segnale per ogni angolo di incidenza γ , e il *sample* di arrivo del segnale corrispondente all'angolo γ_{max} [Fig. 58]. Dal momento che nella zona attorno a γ_{max} il segnale risulta avere una lunghezza di alcuni campionamenti, per ottenere il *sample* esatto in cui il segnale viene rilevato dal PMT si è considerato il 90% del massimo del segnale per ogni angolo γ . Per evitare i contributi esterni presenti all'estremità dl range di rotazione, si sono considerati gli angoli γ all'interno del range $[\gamma_{max}, 0]$.

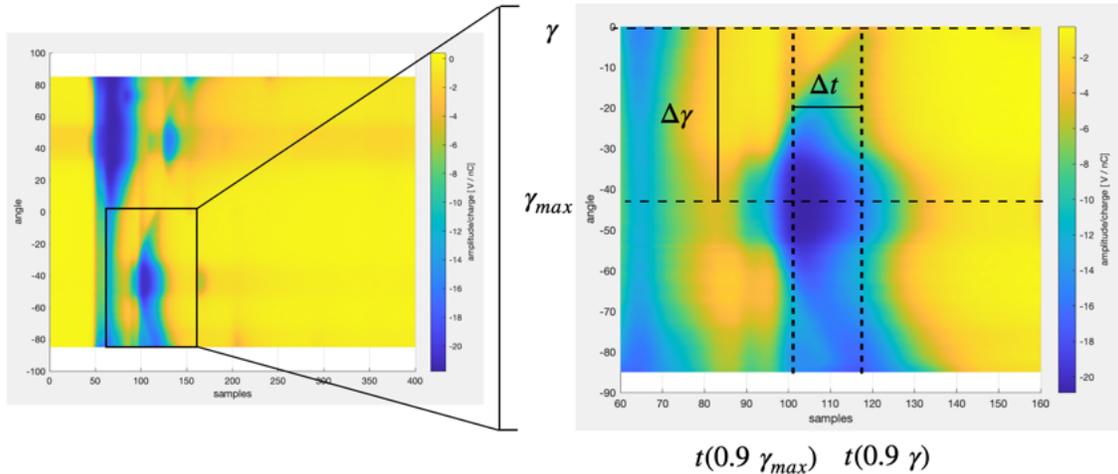


Figura 58: Segnale riflesso della scansione angolare della fibra irraggiata con apertura numerica 0.28 (PMT R760 66), [Fig. 23] con indicati i valori γ_{max} , γ , $\Delta\gamma$, $t(0.9 * \gamma_{max})$, $t(0.9 * \gamma)$, Δt .

- La differenza dei tempi di propagazione calcolata al punto precedente si esprime come $\Delta t = t_{min} - t$. Invertendo le formule della distanza di propagazione si ottiene: $\Delta t = t_{min} - t = d_{min}(n/c) - d_{eff}(n/c) = (l - d_{eff})(n/c)$. Di conseguenza, la distanza di propagazione della luce si esprime in funzione di $\Delta\gamma = \gamma_{max} - \gamma$ attraverso la formula $d_{eff} = l + \Delta t(c/n)$ [Fig. 59]. Come valore di sono stati utilizzati i risultati ottenuti col metodo del gradiente [Cap. 5.3.2].
- A seconda della spira considerata, la lunghezza l tra il punto di generazione della luce Cherenkov e il PMT è espressa come $l = a + b + c$. Il termine a è la distanza tra il punto della fibra colpito dal fascio e l'estremità della fibra connessa ai LED, mentre b si riferisce alla lunghezza complessiva della fibra considerata. Infine, il termine c è pari al doppio della lunghezza delle fibre di distribuzione, dal momento che vengono percorse in entrambe le direzioni.

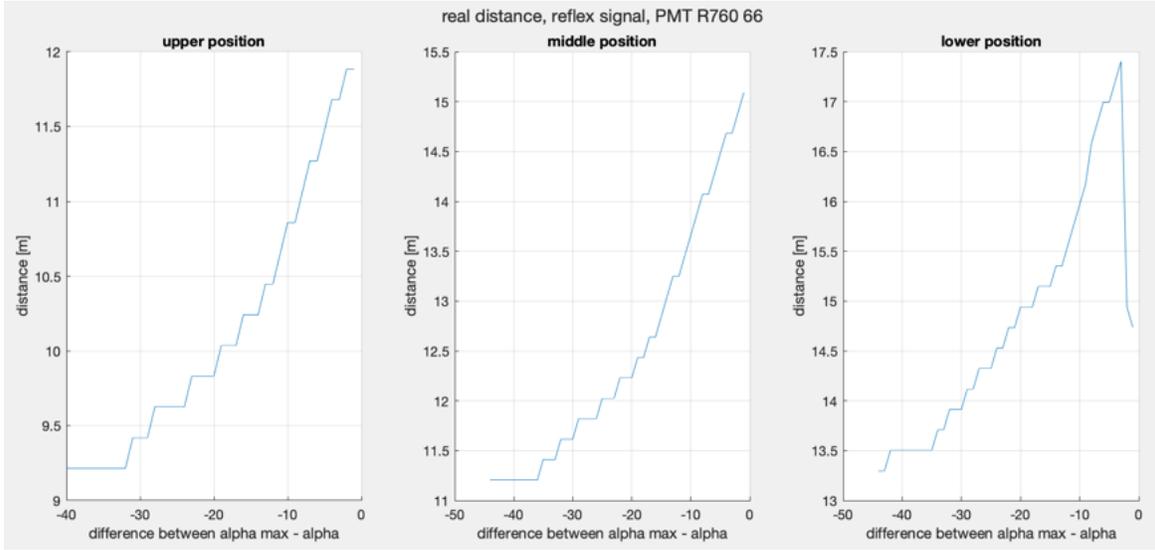


Figura 59: Distanza di propagazione effettiva della luce, per ogni scanalatura della fibra irraggiata con apertura numerica di 0.28 (PMT R760 66).

Modello bidimensionale semplice La riflessione della luce nella fibra che genera le distanze effettive ottenute in precedenza può essere modellizzata attraverso un modello semplice di riflessione bidimensionale. Sommando i diversi contributi di riflessione lungo la fibra, la distanza di propagazione si esprime come $d_{2D} = l/\cos\alpha$, dove l è la lunghezza della fibra [Fig. 60a, 60b].

Per ogni posizione angolare del supporto γ appartenente al range $[\gamma_{max}, 0]$ è stata calcolata la distanza effettiva di propagazione secondo il modello bidimensionale. In corrispondenza dell'angolo di incidenza γ_{max} non è presente alcuna riflessione, per cui $a_{max} = 0$. Si definisce $\Delta\alpha = |\alpha_{max} - \alpha| = \alpha$, da cui si ricava $d_{2D} = l/\cos\alpha = l/\cos\Delta\alpha$. Inoltre, l'angolo di riflessione della luce può essere espresso come $\alpha = \pi/2 - \gamma - \theta_c$, dove γ è l'angolo di incidenza del fascio rispetto alla fibra e θ_c è l'angolo Cherenkov [Fig. 60c]. Dal momento che $\theta_c = cost$, la variazione dell'angolo di riflessione $\Delta\alpha$ corrisponde alla variazione dell'angolo di incidenza $\Delta\gamma$. Si ottiene quindi $d_{2D} = l/\cos\Delta\alpha = l/\cos\Delta\gamma$.

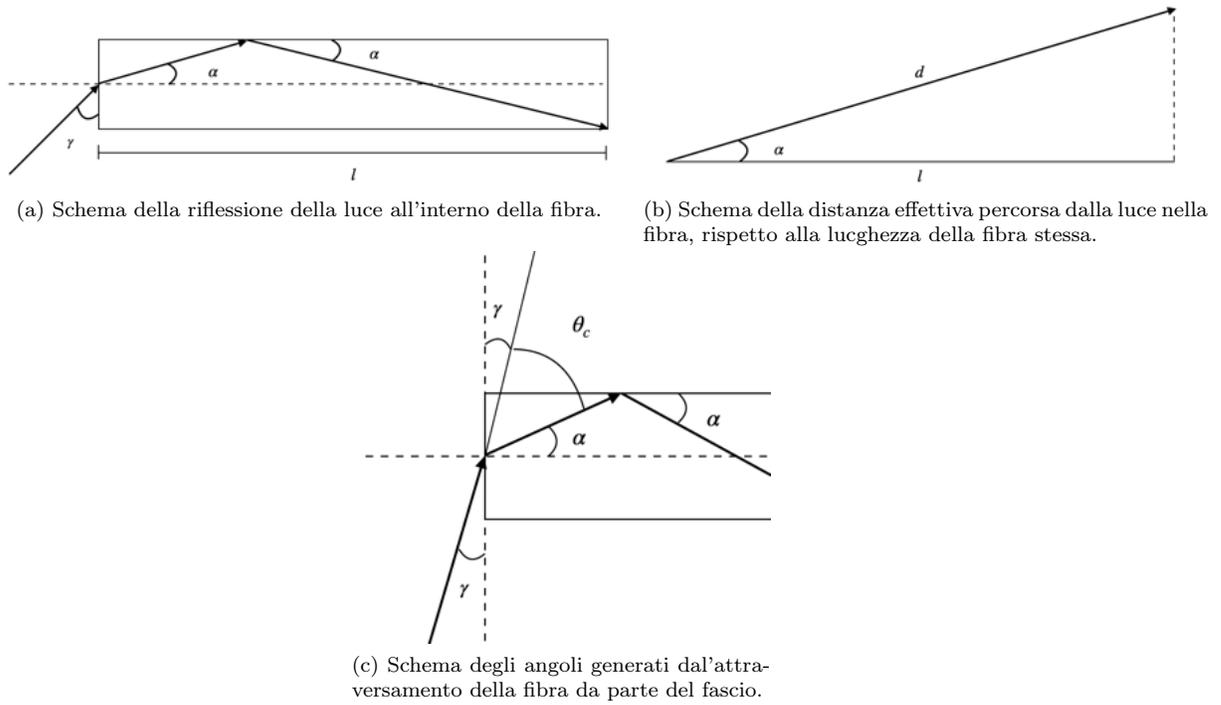
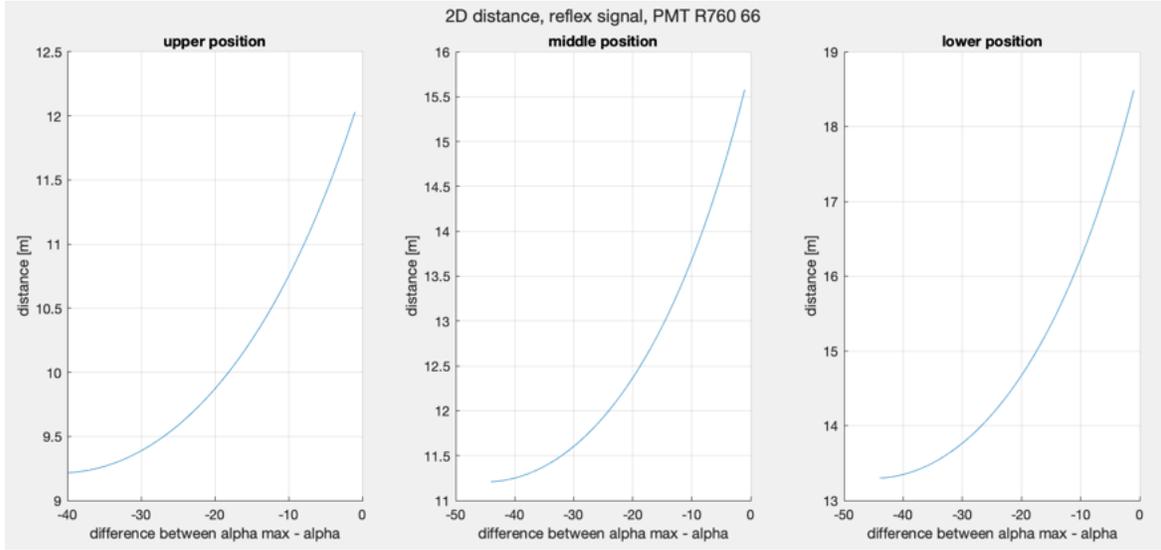
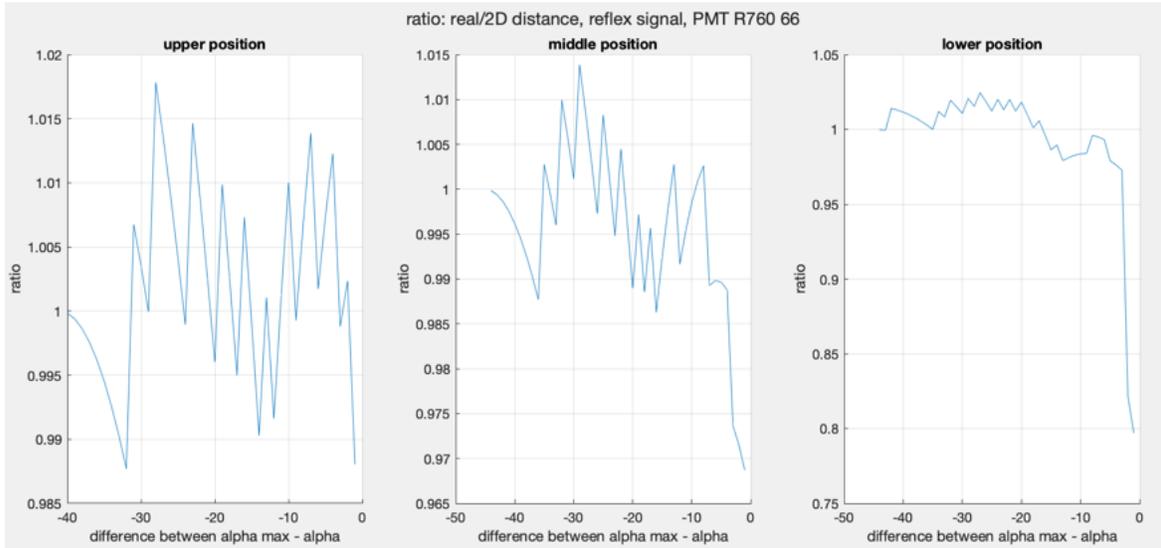


Figura 60: Modello bidimensionale della riflessione della luce nella fibra, generata per effetto Cherenkov dal passaggio delle particelle nella fibra stessa.

Dopo avercalcolato la distanza d_{2D} [Fig. 61a], è stato calcolato il rapporto tra la distanza di propagazione effettiva d_{eff} e la distanza di propagazione d_{2D} ricavata secondo il modello bidimensionale, per verificarne l'accuratezza. I valori di tale rapporto si mantengono vicini al valore unitario, perciò la riflessione interna della luce viene correttamente descritta da questo modello [Fig. 61b].



(a) Distanza di propagazione della luce ottenuta col modello bidimensionale.



(b) Rapporto tra la distanza di propagazione effettiva e la distanza di propagazione ottenuta col modello bidimensionale.

Figura 61: Analisi della distanza di propagazione della luce ottenuta col modello bidimensionale, per ogni scanalatura della fibra irraggiata con apertura numerica di 0.28 (PMT R760 66).

Modello tridimensionale semplice I risultati precedenti indicano che la maggior parte della luce Cherenkov prodotta si propaga seguendo il modello di riflessione bidimensionale. In un modello tridimensionale la luce prodotta tangenzialmente alla superficie della fibra arriverebbe a propagarsi a spirale all'interno del *core* della fibra stessa. Questo è il caso limite di percorso più lungo che la luce può percorrere nel caso di un numero di riflessioni interne che tende a infinito [Fig. 62].

Per quantificare i limiti di questo effetto, si consideri un angolo di incidenza $\gamma = 15^\circ$ che produce un angolo di riflessione interna $\alpha = 30^\circ$. Ponendo D come il diametro della fibra, per il modello bidimensionale precedente si ottiene che la distanza percorsa dalla luce è $d_{2D} = 2D$, mentre la lunghezza della fibra è $l = \sqrt{4D^2 - D^2} = \sqrt{3}D$. Considerando il modello tridimensionale, la luce generata si

propaga a spirale sulla superficie cilindrica della fibra. Immaginando di dispiegare tale superficie, si ottiene un rettangolo di base l e altezza pari alla circonferenza $C = \pi D$. La distanza percorsa dalla fibra si calcola attraverso il teorema di Pitagora e le relazioni precedenti, tramite la formula $d_{3D} = \sqrt{l^2 + C^2} = \sqrt{l^2 + \pi^2 D^2} \approx \sqrt{3D^2 + 10D^2} \approx \sqrt{13}D$ [Fig. 63]. Calcolando il rapporto tra le distanze ottenute coi due modelli, si ottiene $d_{3D}/d_{2D} \approx \sqrt{13}/2 \approx 1.8$. La distanza ottenuta col modello tridimensionale è quindi l'80% maggiore rispetto alla distanza ottenuta col modello bidimensionale, risultando significativamente maggiore rispetto alla distanza effettiva d_{eff} calcolata.

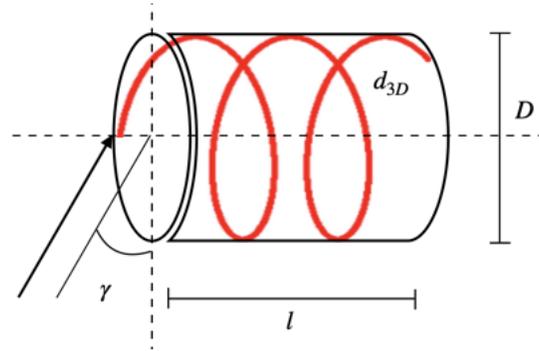


Figura 62: Schema della riflessione tridimensionale della luce sulla superficie cilindrica esterna della fibra.

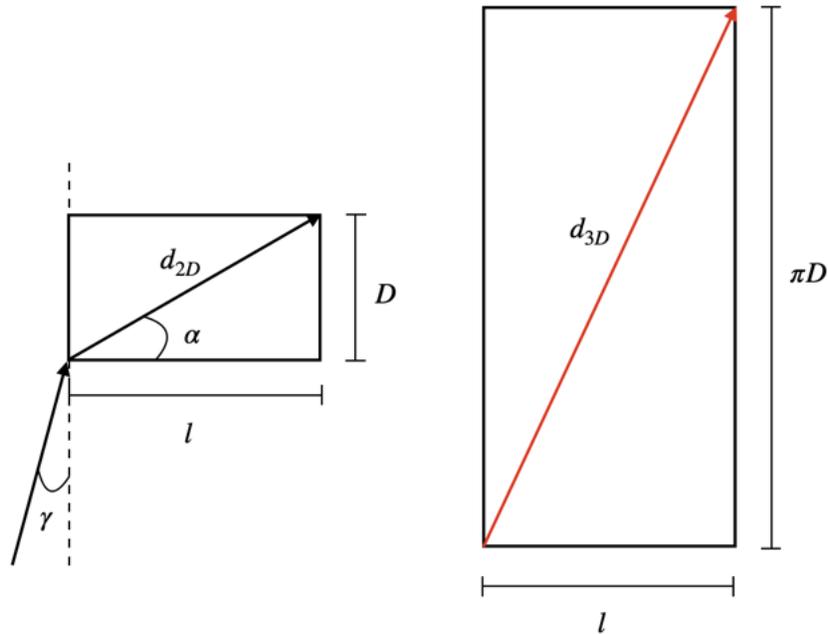


Figura 63: Schema della distanza effettiva percorsa dalla luce nella fibra secondo il modello bidimensionale (sinistra) e tridimensionale (destra), rispetto alla lunghezza della fibra stessa.

Conclusioni

Il nuovo prototipo del rivelatore di luminosità LUCID è composto da fibre ottiche in quarzo in cui, quando attraversate dalle particelle prodotte dalle collisioni, viene prodotta luce Cherenkov. Questa luce si propaga lungo le fibre stesse fino ai PMT che permettono di rivelarla. Il nuovo prototipo permette di posizionare tali PMT in una zona più schermata dalle radiazioni, ma le fibre subiscono un irraggiamento. Per poter utilizzare correttamente i dati acquisiti tramite questo metodo di rivelazione, è necessario effettuare una opportuna correzione. Questa deve tenere conto dell'irraggiamento del quarzo delle fibre e della diversa produzione di luce Cherenkov in funzione dell'angolo di incidenza delle particelle. Per poter studiare questi effetti, è stato svolto un *test beam* utilizzando un fascio di elettroni.

Risultati delle analisi in funzione dell'angolo di incidenza tra il fascio e le fibre

Due fibre precedentemente irraggiate e una fibra non irraggiata sono state fissate su un supporto rotante rispetto al fascio, svolgendo delle scansioni angolari nel range $[-85^\circ, 85^\circ]$ rispetto alla configurazione in cui il supporto si trova perpendicolare al fascio. Dai risultati di queste scansioni, è stato possibile ottenere l'andamento del segnale in funzione dell'angolo di incidenza tra il fascio e le fibre. Inoltre, è stata calcolata la derivata prima della carica del segnale rispetto all'angolo di rotazione del supporto, indicata come $dc/d\gamma$. Per la fibra irraggiata con apertura numerica di 0.28 la derivata è compresa tra 1 e 1.03, nei range angolari interessati dal solo segnale del fascio. A causa della presenza di un segnale continuo di lunga durata, denominato *beam dark current*, i dati rilevati per la fibra irraggiata con apertura numerica di 0.28 non sono attendibili nella regione attorno al massimo del segnale, nel range $[30^\circ, 60^\circ]$. In seguito, sono stati svolti dei test in laboratorio per studiare il comportamento della *dark current*. Gli esperimenti hanno evidenziato come l'influenza della *dark current* sul segnale principale dipenda dalle diverse condizioni al contorno. Sono necessari ulteriori studi per comprendere appieno il fenomeno e modellarlo, in modo da poter effettuare una correzione dei dati presi durante le scansioni angolari soggette a tale effetto.

Durante il *test beam* le tre fibre sono state connesse a tre diversi PMT, e le scansioni angolari ne hanno evidenziato un diverso comportamento. In particolare, i PMT R760 59 e 66 rilevano il segnale per un range di angoli di incidenza del fascio maggiore rispetto ai PMT R1635 e R7459. Uno studio condotto in seguito ha evidenziato che il connettore tra i PMT R760 e la fibra garantisce una distanza minima tra l'estremità della fibra e la finestra del PMT, permettendo di rilevare la luce Cherenkov prodotta da particelle con angoli di incidenza elevati. Utilizzando un LED con inclinazione variabile rispetto all'asse della fibra connessa al PMT, si è verificato per quale range di incidenza il comportamento dei PMT risulta costante. I PMT R760 mostrano un plateau di circa $\pm 17^\circ$ rispetto alla posizione nominale del LED, mentre il PMT R7459 ha un comportamento costante per circa $\pm 10^\circ$. Nei range angolari ottenuti, la variazione di segnale rilevata durante le scansioni angolari dipende solo dalla dipendenza dell'effetto Cherenkov dall'angolo di incidenza del fascio. Al di fuori di queste regioni, la variazione di segnale può essere dovuta anche al comportamento dei PMT, non più costante, e non è stato identificato un metodo per valutarlo con certezza.

Risultati delle analisi in funzione dell'irraggiamento delle fibre

Per effettuare una correzione che tenga in conto dell'irraggiamento delle fibre, durante il *test beam* il fascio ha colpito le fibre in tre punti diversi sulla loro lunghezza. Il primo punto colpito appartiene al segmento iniziale della fibra, alla cui estremità è connesso il PMT. Dal momento che gli estremi

della fibra non sono stati irraggiati, la luce prodotta in tale punto raggiunge il PMT senza aver subito perdite. Al contrario, la luce Cherenkov prodotta nel segmento centrale delle fibre si propaga nel quarzo irraggiato, registrando una certa perdita. Il confronto tra i tre segnali ottenuti ha permesso di determinare la perdita di segnale in funzione dell'irraggiamento. Questa analisi non è stata svolta per la fibra irraggiata con apertura numerica di 0.28 a causa di un errore di montaggio. I risultati per la fibra irraggiata con apertura numerica di 0.22 mostrano una perdita di segnale di circa il 15% rispetto ai segnali corrispondenti della fibra non irraggiata.

Le perdite di segnale ottenute durante il *test beam* possono essere comparate con le perdite registrate durante i test in laboratorio, svolti prima e dopo il *test beam*, utilizzando sei differenti LED alimentati in modo continuo e impulsato. La fibra irraggiata con apertura numerica di 0.22 ha registrato delle perdite comprese tra il 20% e il 0.6% nello spettro UV compreso tra $\lambda = 280$ nm e $\lambda = 385$ nm. È importante notare che a differenza della luce LED, la luce prodotta per effetto Cherenkov è composta da una sovrapposizione di diverse lunghezze d'onda, la maggior parte delle quali appartiene allo spettro UV.

Conoscere l'effettiva distanza di propagazione della luce permette di ottenere una correzione per l'irraggiamento delle fibre. Per il calcolo della distanza è necessario conoscere l'indice di rifrazione del materiale, che è stato misurato tra 1.4331 e 1.4873, utilizzando i dati del fascio. Questi risultati sono da confrontare con quelli ottenuti da un test svolto in laboratorio per tre lunghezze d'onda, tra 340 nm e 467.5 nm. I valori dell'indice aumentano al diminuire di λ : risultano variare tra 1.5473 e 1.4603. Avendo ottenuto l'indice di rifrazione del materiale, è stata calcolata la distanza effettiva percorsa dalla luce all'interno della fibra. Questa è stata ottenuta a partire dall'analisi del segnale riflesso della fibra irraggiata con apertura numerica di 0.28, da cui è possibile individuare la differenza di tempo di arrivo del segnale in funzione dell'angolo di incidenza. La distanza effettiva ottenuta risulta essere compatibile con i risultati di un modello bidimensionale semplice di riflessione interna della luce nella fibra.

Riferimenti bibliografici

- [1] Pettersson, Thomas Sven, P. Lefèvre, *The Large Hadron Collider : conceptual design*. CERN-AC-95-05-LHC (1995).
- [2] The ATLAS collaboration, G. Aad, E. Abat, J. Abdallah, A. A. Abdelalim, A. Ab-desselam, O. Abdinov, et al, *The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider*. Journal of Instrumentation 3, n. 08 (14 agosto 2008): S08003–S08003.
- [3] W.Herr, *Concept of Luminosity*, (CERN 2006-002) 2006, <https://cds.cern.ch/record/941318>, doi: 10.5170/CERN-2006-002.361.
- [4] S. White, *Determination of the absolute luminosity at the LHC*. 2010, <http://cds.cern.ch/record/1308187>.
- [5] P. Grafström, W. Kozanecki, *Luminosity determination at Proton Colliders*, Prog. Part. Null. Phys. 81 (2015) 97-148.
- [6] G. Avoni et al, *The new LUCID-2 detector for luminosity measurement and monitoring in ATLAS*, Journal of Instrumentation 13 (2018) P07017.
- [7] G.L. Alberghi et al, *Choice and characterization of photomultipliers for the new ATLAS LUCID detector*, Journal of Instrumentation 11 (2016) P05014.
- [8] William R. Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments, A How-to Approach*, (1994).
- [9] The ATLAS collaboration, *The LUCID-3 detector for the ATLAS phase-II 2 upgrade*,.CERN-LHCC-2021-016 (2021), LHCC-P-018.
- [10] S. Baccaro, A. Cemmi, *Gamma irradiation Calliope facility at ENEA - Casaccia research centre (Rome, Italy)*, <https://iris.enea.it/retrieve/handle/20.500.12079/6838/587/RT-2019-04-ENEA.pdf>.