

Capitolo 4

Variazione della trasparenza delle superfici dei moduli ottici

Come visto in precedenza, grandi fluttuazioni della trasparenza delle superfici dei moduli ottici possono essere dovute al deposito e/o alla rimozione dei sedimenti sulle sfere. Tali fenomeni, più o meno frequenti a seconda delle condizioni ambientali (intensità e direzione della corrente sottomarina) possono indurre andamenti irregolari nella grandezza $\frac{\Delta T_{resp}}{\Delta t}$, tanto da rendere difficile una sua parametrizzazione.

Riteniamo pertanto conveniente affrontare lo studio di $\frac{\Delta T_{resp}(\theta, t)}{\Delta t}$ analizzando separatamente i dati relativi ai periodi di “stabilità” ed “instabilità” delle correnti, descritti nel capitolo precedente. Abbiamo descritto il fenomeno del biofouling, il set di dati sperimentali ed i criteri utilizzati per la loro analisi. In questo capitolo descriveremo le varie fasi dell’analisi e ne presenteremo i risultati.

Come già discusso in precedenza, dove possibile conviene mediare sulle informazioni fornite da PIN che si trovano alla stessa latitudine, per ridurre le fluttuazioni e permettere di evidenziare le reali “variazioni” di trasparenza nel tempo.

4.1 Risultati ottenuti nel periodo di stabilità delle correnti

Come già accennato nel capitolo 3, iniziamo l'analisi con il set di dati in cui la sorgente posta a $\theta = 0^\circ$ sulla sfera B illumina il PIN posto a $\theta = 0^\circ$ sulla sfera A.

Assumiamo che l'entità dell'oscuramento della superficie del modulo ottico nella regione vicina alla sorgente sia confrontabile con quella dei fotodiodi che si trovano nella zona $-30^\circ \leq \theta \leq 0^\circ$. Indicando con $\frac{\Delta Trasp(-30^\circ \div 0^\circ)}{\Delta t}$ la variazione annua di trasparenza per i fotodiodi che si trovano in questa regione e riferendosi alla 3.4 si ha:

$$\frac{\Delta Trasp(5,6)}{\Delta t} = \frac{\Delta Trasp(sferaA)}{\Delta t} + \frac{\Delta Trasp(sferaB)}{\Delta t} = \quad (4.1)$$

$$2 \cdot \frac{\Delta Trasp(sferaA)}{\Delta t} = 2 \cdot \frac{\Delta Trasp(-30^\circ \div 0^\circ)}{\Delta t} \quad (4.2)$$

dove $\frac{\Delta Trasp(5,6)}{\Delta t}$ è la grandezza misurata sperimentalmente.

Per $\theta = 0^\circ$ nella configurazione 5 (definita a pagina 64), il valore medio della distribuzione è riportato in figura 3.14:

$$\frac{\Delta Trasp(MISURATA5)}{\Delta t} = (-1,31 \pm 0,32) \cdot 10^{-5} \quad (4.3)$$

essendo lo scarto quadratico medio pari a $5,64 \cdot 10^{-5}$ e considerando 318 eventi.

Per ottenere il valore finale della $\frac{\Delta Trasp}{\Delta t}$ per questo valore di θ , bisogna mediarlo con quello ottenuto quando la sorgente è costituita da due LED. In questo caso si ha:

$$\frac{\Delta Trasp(MISURATA6)}{\Delta t} = (-2,99 \pm 0,22) \cdot 10^{-5} \quad (4.4)$$

Il valore finale, espresso in percentuale annua, è dunque:

$$\frac{\Delta Trasp(0^\circ)}{\Delta t} = (-0,889 \pm 0,066 \pm err.sist.)\% \quad (4.5)$$

Analizzando i dati nel modo descritto in precedenza si ha per gli altri angoli intorno all'equatore, in condizioni di stabilità, una variazione di trasparenza annua pari a :

$$\frac{\Delta Trasp(-30^\circ)}{\Delta t} = (-2,067 \pm 0,047 \pm err.sist.)\% \quad (4.6)$$

$$\frac{\Delta Trasp(-15^\circ)}{\Delta t} = (-0,681 \pm 0,072 \pm err.sist.)\% \quad (4.7)$$

I risultati numerici ottenuti per $\theta = 0^\circ$, -15° e -30° sembrano non supportare l'ipotesi assunta all'inizio del paragrafo di uniforme variazione di trasparenza. In effetti le differenze tra i valori numerici ottenuti eccedono gli errori statistici. Come vedremo più avanti per $\theta = -30^\circ$ l'evoluzione del biofouling nel tempo è diversa rispetto a $\theta = -15^\circ$ e $\theta = 0^\circ$. Vedremo inoltre che l'errore sistematico permetterà di spiegare buona parte delle discordanze tra i valori numerici ottenuti. Potremmo indicare per la regione $-30^\circ \leq \theta \leq 0^\circ$ un valore medio di $\frac{\Delta Trasp}{\Delta t} = (-1,45 \pm 0,80(RMS))\%$. Preferiamo mantenere i tre valori distinti proprio in ragione del diverso comportamento, descritto successivamente nel paragrafo 4.4, di $\frac{\Delta Trasp}{\Delta t}$ in funzione del tempo per i tre angoli.

Analizziamo ora i dati raccolti nelle configurazioni 3 e 4, accendendo la sorgente posta sulla sfera C (con $\theta = 45^\circ$) che illumina gli stessi fotodiodi, posti sulla sfera A ($-30^\circ \leq \theta \leq 0^\circ$): si può così calcolare l'oscuramento della sorgente. Si ha infatti:

$$\frac{\Delta Trasp(3,4)}{\Delta t} = \frac{\Delta Trasp(sferaA)}{\Delta t} + \frac{\Delta Trasp(sferaC)}{\Delta t} = \quad (4.8)$$

$$\frac{\Delta Trasp(-30^\circ \div 0^\circ)}{\Delta t} + \frac{\Delta Trasp(45^\circ 60^\circ)}{\Delta t} \quad (4.9)$$

Poiché abbiamo tre valori di $\frac{\Delta Trasp(3,4)}{\Delta t}$, per $\theta = -30^\circ \div 0^\circ$, il valore finale di $\frac{\Delta Trasp(45^\circ 60^\circ)}{\Delta t}$ sarà ottenuto facendo la media, pesata con gli errori, dei valori ottenuti per le tre diverse latitudini, che sono riportati in appendice. In condizioni di stabilità si ha:

$$\frac{\Delta Trasp(45^\circ 60^\circ)}{\Delta t} = (-5,03 \pm 0,22 \pm err.sist.)\%annuo \quad (4.10)$$

Le ultime due configurazioni di acquisizione considerate sono quelle per cui viene accesa la seconda sorgente posta sulla sfera B, che si trova ad una latitudine $\theta = -90^\circ$ (configurazioni 7 e 8).

Illuminando i PIN che si trovano a 60° , la variazione di trasparenza misurata avrà due contributi:

$$\frac{\Delta Trasp(7,8)}{\Delta t} = \frac{\Delta Trasp(sferaB)}{\Delta t} + \frac{\Delta Trasp(sferaC)}{\Delta t} \quad (4.11)$$

Poiché nell'intervallo di $45^\circ \div 60^\circ$ non si verificano grosse variazioni della trasparenza, i valori ottenuti per $\theta = 45^\circ$ e $\theta = 60^\circ$ possono essere usati per ottenere la stessa informazione in modo coerente, dunque la 4.11 diventa:

$$\frac{\Delta Trasp(7,8)}{\Delta t} = \frac{\Delta Trasp(-90^\circ)}{\Delta t} + \frac{\Delta Trasp(45^\circ 60^\circ)}{\Delta t}$$

Avendo già calcolato $\frac{\Delta Trasp(45^\circ 60^\circ)}{\Delta t}$, possiamo calcolare $\frac{\Delta Trasp(-90^\circ)}{\Delta t}$ a partire dai valori misurati con uno e con due LED. Si ha:

$$\frac{\Delta Trasp(7)}{\Delta t} = (-7,56 \pm 0,45) \cdot 10^{-5} \quad (4.12)$$

$$\frac{\Delta Trasp(8)}{\Delta t} = (-8,25 \pm 0,41) \cdot 10^{-5} \quad (4.13)$$

Con il solito procedimento si ottiene:

$$\frac{\Delta Trasp(-90^\circ)}{\Delta t} = (-0,76 \pm 0,56 \pm err.sist.)\%annua \quad (4.14)$$

Considerando ancora i valori ottenuti nelle configurazioni 7 e 8 è possibile calcolare l'oscuramento anche dei PIN posti a $\theta = 70^\circ$ e a $\theta = 75^\circ$, nella sfera C.

Quando il PIN a $\theta = 70^\circ$, che si trova nella sfera C, viene illuminato dal LED posto a $\theta = -90^\circ$ sulla sfera B, si ha:

$$\frac{\Delta Trasp(7,8)}{\Delta t} = \frac{\Delta Trasp(-90^\circ)}{\Delta t} + \frac{\Delta Trasp(70^\circ)}{\Delta t} \quad (4.15)$$

I corrispondenti valori misurati, riferiti ad un intervallo di dodici ore, sono:

$$\frac{\Delta Trasp(7)}{\Delta t} = (-10,73 \pm 0,98) \cdot 10^{-5} \quad (4.16)$$

$$\frac{\Delta Trasp(8)}{\Delta t} = (-10,45 \pm 0,96) \cdot 10^{-5} \quad (4.17)$$

Facendo le operazioni di media e utilizzando la formula precedente si ottiene il valore cercato, espresso in percentuale annua:

$$\frac{\Delta Trasp(70^\circ)}{\Delta t} = (-6,97 \pm 0,75 \pm err.sist.)\%$$

Analogamente per $\theta = 75^\circ$ si ha:

$$\frac{\Delta Trasp(7)}{\Delta t} = (-19,1 \pm 2,2) \cdot 10^{-5} \quad (4.18)$$

$$\frac{\Delta Trasp(8)}{\Delta t} = (-18,8 \pm 2,1) \cdot 10^{-5} \quad (4.19)$$

e quindi

$$\frac{\Delta Trasp(75^\circ)}{\Delta t} = (-13,1 \pm 1,2 \pm err.sist.)\%annuo \quad (4.20)$$

La tabella 4.1, che riassume tutti i risultati già descritti, permette di evidenziare l'andamento

Condizioni stabili ~ 300 acquisizioni	$\frac{\Delta Trasp}{\Delta t} \pm err. stat.$ [% annue]
$\theta = -90^\circ$	$(-0,76 \pm 0,56)\%$
$\theta = -30^\circ$	$(-2,067 \pm 0,047)\%$
$\theta = -15^\circ$	$(-0,681 \pm 0,072)\%$
$\theta = 0^\circ$	$(-0,889 \pm 0,066)\%$
$\theta = 45^\circ \div 60^\circ$	$(-5,03 \pm 0,22)\%$
$\theta = 70^\circ$	$(-6,97 \pm 0,75)\%$
$\theta = 75^\circ$	$(-13,1 \pm 1,2)\%$

Tabella 4.1: Valori della variazione della trasparenza in funzione dell'angolo di zenith sulla sfera, espressi in percentuale annua, ottenuti in condizioni di stabilità delle correnti.

della variazione temporale della trasparenza in funzione dell'angolo di zenith: si nota che, come accennato nel capitolo precedente, la velocità di riduzione della trasparenza delle superfici di vetro aumenta progressivamente, andando dal “Polo Sud” al “Polo Nord” dei moduli ottici. Questo argomento verrà ripreso anche nel paragrafo 4.3.

4.2 Risultati ottenuti in periodi di correnti instabili

Il procedimento usato è quello descritto nel paragrafo precedente e quindi vengono riportati solo i risultati, espressi in percentuale annua, nelle tabelle 4.2 e 4.3.

Restringendo lo studio al solo periodo di instabilità, non è più possibile trovare una relazione

Cond. Instabili (Primo periodo) 260 acquisizioni	$\frac{\Delta T_{rasp}}{\Delta t} \pm \text{err. stat.}$ [% annue]
$\theta = -90^\circ$	$(-4,6 \pm 1,8)\%$
$\theta = -30^\circ$	$(-2,366 \pm 0,088)\%$
$\theta = -15^\circ$	$(-0,87 \pm 0,13)\%$
$\theta = 0^\circ$	$(-1,11 \pm 0,14)\%$
$\theta = 45^\circ \div 60^\circ$	$(-9,1 \pm 1,3)\%$
$\theta = 70^\circ$	$(+3,1 \pm 2,3)\%$
$\theta = 75^\circ$	$(-2,4 \pm 2,6)\%$

Tabella 4.2: Valori della variazione della trasparenza in funzione dell'angolo di zenith sulla sfera, espressi in percentuale annua, riferiti al primo periodo di instabilità delle correnti.

definita tra la variazione di trasparenza e l'angolo θ .

Vista la casualità con cui le correnti si manifestano, alla deposizione di sedimenti sulla superficie esterna del modulo ottico (che causa l'oscuramento dei PIN) possono seguire periodi *favorevoli*, in cui la corrente pulisce i moduli ottici e in cui dunque la $\frac{\Delta T_{rasp}}{\Delta t}$ è positiva.

Cond. Instabili (Secondo periodo)	$\frac{\Delta T_{trasp}}{\Delta t} \pm \text{err. stat.}$
520 acquisizioni	[% annue]
$\theta = -90^\circ$	$(-6,76 \pm 0,51)\%$
$\theta = -30^\circ$	$(-1,291 \pm 0,047)\%$
$\theta = -15^\circ$	$(-0,403 \pm 0,074)\%$
$\theta = 0^\circ$	$(-0,417 \pm 0,071)\%$
$\theta = 45^\circ \div 60^\circ$	$(+0,76 \pm 0,21)\%$
$\theta = 70^\circ$	$(-4,4 \pm 1,2)\%$
$\theta = 75^\circ$	$(-4,41 \pm 0,85)\%$

Tabella 4.3: Valori della variazione della trasparenza in funzione dell'angolo di zenith sulla sfera, espressi in percentuale annua, ottenuti in condizioni di instabilità delle correnti.

4.3 Stime dell'errore sistematico sulle misure di “variazione di trasparenza” dei moduli ottici

Come già visto possiamo stimare l'errore sistematico nella misura di $\frac{\Delta T_{trasp}(\theta)}{\Delta t}$ confrontando misure raccolte con illuminazioni diverse a partire dalla grandezza Σ , così definita:

$$\Sigma = \frac{\left| \frac{\Delta T_{trasp}(1LED)}{\Delta t} - \frac{\Delta T_{trasp}(2LED)}{\Delta t} \right|}{2}$$

infatti, nonostante il rapporto fra la misura della luce raccolta dal PIN in oggetto e il PIN di riferimento renda la grandezza indipendente dalla quantità di luce emessa dalla sorgente, in molti casi i valori ottenuti con le due diverse intensità (un LED e due LED) non sono compatibili, pur essendo i fotodiodi correttamente funzionanti.

Questo effetto, di natura essenzialmente strumentale, è stato da noi interpretato come l'evidenza di un possibile errore sistematico.

Risulterebbe improprio attribuire tale differenza al solo errore sistematico, visto che oltre ad errori di natura strumentale e quindi sistematica, anche le fluttuazioni hanno una grossa influenza

sui risultati.

Consideriamo di nuovo le configurazioni 5 e 6 (descritte a pagina 64): poiché la sorgente e i LED sono uno di fronte all'altro, possiamo assumere che l'errore sistematico sarà lo stesso per le due regioni angolari delle sfere A e B.

La grandezza

$$\Sigma \left(\frac{\Delta Trasp(-30^\circ \div 0^\circ)}{\Delta t} \right) = \left(\frac{\frac{|\frac{\Delta Trasp(1LED)}{\Delta t} - \frac{\Delta Trasp(2LED)}{\Delta t}|}{2}}{2} \right)$$

viene calcolata per i tre intervalli temporali in precedenza descritti e l'errore sistematico sarà stimato come il massimo tra i tre valori ottenuti.

Per questa particolare configurazione, sempre esprimendo il risultato in termini di variazione percentuale annua, otteniamo ad esempio:

- $\Sigma \left(\frac{\Delta Trasp(-30^\circ)}{\Delta t} \right)_1 = 0,32\%$ nel primo periodo di instabilità;
- $\Sigma \left(\frac{\Delta Trasp(-30^\circ)}{\Delta t} \right)_2 = 0,26\%$ nel periodo di stabilità;
- $\Sigma \left(\frac{\Delta Trasp(-30^\circ)}{\Delta t} \right)_3 = 0,029\%$ nel secondo periodo di instabilità.

Assumiamo dunque che l'errore sistematico su

$$\frac{\Delta Trasp(-30^\circ)}{\Delta t}$$

sia pari a:

$$\Sigma \left(\frac{\Delta Trasp(-30^\circ)}{\Delta t} \right) = \max \left(\Sigma \left(\frac{\Delta Trasp(-30^\circ)}{\Delta t} \right)_i, i = 1, 2, 3 \right) = 0,32\%$$

Se sorgente e LED si trovano ad angoli diversi, allora l'analisi per la stima dell'errore sistematico sarà analoga a quella che in precedenza ci ha permesso di calcolare la variazione di trasparenza per ogni intervallo angolare. Si calcola comunque la semidifferenza Σ , come in 3.5, per tutti e tre i periodi e poi per ogni intervallo angolare si prende come errore sistematico il valore massimo ottenuto nei tre periodi.

Nel caso delle configurazioni 3 e 4 ad esempio, parte dell'errore sistematico sarà attribuito alla regione angolare in cui si trova la sorgente e parte all'intervallo in cui è posto il PIN, dunque:

$$\Sigma(3, 4) = \Sigma_{sorgente45^\circ} + \Sigma_{PIN-30^\circ \div 0^\circ}$$

Le tabelle 4.4, 4.5 e 4.6 riassumono i risultati già discussi per la $\frac{\Delta Trasp}{\Delta t}$ per le varie condizioni di corrente, insieme al loro errore sistematico.

In figura 4.1 riportiamo la variazione annua di trasparenza in funzione dell'angolo di zenith, in

Condizioni stabili ~ 300 acquisizioni	$\frac{\Delta Trasp}{\Delta t} \pm \text{err. stat.} \pm \text{err. sist.}$ [% annue]
$\theta = -90^\circ$	$(-0,76 \pm 0,56 \pm 1,10)\%$
$\theta = -30^\circ$	$(-2,067 \pm 0,047 \pm 0,32)\%$
$\theta = -15^\circ$	$(-0,681 \pm 0,072 \pm 0,21)\%$
$\theta = 0^\circ$	$(-0,889 \pm 0,066 \pm 0,31)\%$
$\theta \sim 45^\circ \div 60^\circ$	$(-5,03 \pm 0,22 \pm 1,36)\%$
$\theta = 70^\circ$	$(-6,97 \pm 0,75 \pm 1,0)\%$
$\theta = 75^\circ$	$(-13,09 \pm 1,2 \pm 0,99)\%$

Tabella 4.4: Valori della variazione della trasparenza in funzione dell'angolo di zenith sulla sfera, espressi in percentuale annua, ottenuti in condizioni di stabilità delle correnti, con l'errore sistematico.

condizioni di “stabilità” per le correnti. Si vede che, passando dal “Polo Sud” del modulo ottico ($\theta = -90^\circ$) al “Polo Nord” ($\theta = 90^\circ$) il processo di “oscuramento” è sempre più marcato, fino a raggiungere a $\theta = 75^\circ$ una diminuzione maggiore del 10% annuo. Nel grafico in figura 4.2 sono invece riportati i valori riferiti ai tre periodi e si vede che l'andamento regolare della $\frac{\Delta Trasp}{\Delta t}$ in condizioni “stabili” non è più “visibile” quando, in condizioni di “instabilità”, i fenomeni casuali provocano notevoli variazioni, positive e negative, della trasparenza.

È importante notare che, mentre nella maggior parte dei casi l'effetto delle correnti sottomarine influisce molto sulla $\frac{\Delta Trasp}{\Delta t}$, nella zona del modulo ottico che si trova vicino all'equatore la va-

Cond. Instabili (Primo Periodo) 260 acquisizioni	$\frac{\Delta T_{trasp}}{\Delta t} \pm \text{err. stat.} \pm \text{err. sist.}$ [% annue]
$\theta = -90^\circ$	$(-4,6 \pm 1,8 \pm 1,1)\%$
$\theta = -30^\circ$	$(-2,366 \pm 0,088 \pm 0,32)\%$
$\theta = -15^\circ$	$(-0,87 \pm 0,13 \pm 0,21)\%$
$\theta = 0^\circ$	$(-1,11 \pm 0,14 \pm 0,31)\%$
$\theta \sim 45^\circ \div 60^\circ$	$(-9,1 \pm 1,3 \pm 1,4)\%$
$\theta = 70^\circ$	$(3,1 \pm 2,3 \pm 1,0)\%$
$\theta = 75^\circ$	$(-2,4 \pm 2,6 \pm 0,99)\%$

Tabella 4.5: Valori della variazione della trasparenza per unità di tempo in funzione dell'angolo di zenith θ , espressi in percentuale annua, riferiti al primo periodo di acquisizione, in cui le correnti non sono stabili.

riazione di trasparenza per unità di tempo non risente di apprezzabili variazioni: si vede infatti che per le tre latitudini $-30^\circ \leq \theta \leq 0^\circ$ i valori di $\frac{\Delta T_{trasp}}{\Delta t}$ riferiti ai tre periodi sono compatibili tra loro.

Come già visto nell'introduzione, la crescita delle colonie di batteri sulla superficie di un oggetto posto in mare e alle profondità caratteristiche di un telescopio sottomarino per neutrini, è molto veloce se confrontata con la durata di questa presa dati.

Sarebbe dunque lecito aspettarsi nella prima parte dell'acquisizione una variazione della trasparenza più marcata.

È chiaro che tale ipotesi va confrontata con i dati sperimentali solo per quegli intervalli angolari ($-90^\circ \leq \theta \leq 0^\circ$) nei quali la deposizione o la rimozione di sedimenti non comporta grosse fluttuazioni dei risultati. I dati per $\theta = -90^\circ$ hanno errori troppo grandi per confermare l'ipotesi e dunque questo fenomeno non emerge in modo chiaro dai risultati in quanto, ad angolo fissato, le misure sui tre periodi sono spesso compatibili.

Gli errori sono più piccoli per $-30^\circ \leq \theta \leq 0^\circ$: in questo caso si deduce che l'apparato sperimentale è sufficientemente sensibile per evidenziare questo processo, in quanto le misure sem-

Cond. Instabili (Secondo Periodo)	$\frac{\Delta T_{trasp}}{\Delta t} \pm \text{err. stat.} \pm \text{err. sist.}$
520 acquisizioni	[% annue]
$\theta = -90^\circ$	$(-6,76 \pm 0,51 \pm 1,10)\%$
$\theta = -30^\circ$	$(-1,291 \pm 0,047 \pm 0,32)\%$
$\theta = -15^\circ$	$(-0,403 \pm 0,074 \pm 0,21)\%$
$\theta = 0^\circ$	$(-0,417 \pm 0,071 \pm 0,31)\%$
$\theta \sim 45^\circ \div 60^\circ$	$(0,76 \pm 0,21 \pm 1,36)\%$
$\theta = 70^\circ$	$(-4,4 \pm 1,2 \pm 1,0)\%$
$\theta = 75^\circ$	$(-4,41 \pm 0,85 \pm 0,99)\%$

Tabella 4.6: Valori della variazione della trasparenza in funzione dell'angolo di zenith sulla sfera, espressi in percentuale annua, riferiti al secondo periodo in cui le correnti non sono stabili.

brano essere in accordo con una diminuzione della “velocità di oscuramento” della superficie dei moduli ottici in funzione del tempo. Questo argomento verrà discusso più in dettaglio nel prossimo paragrafo.

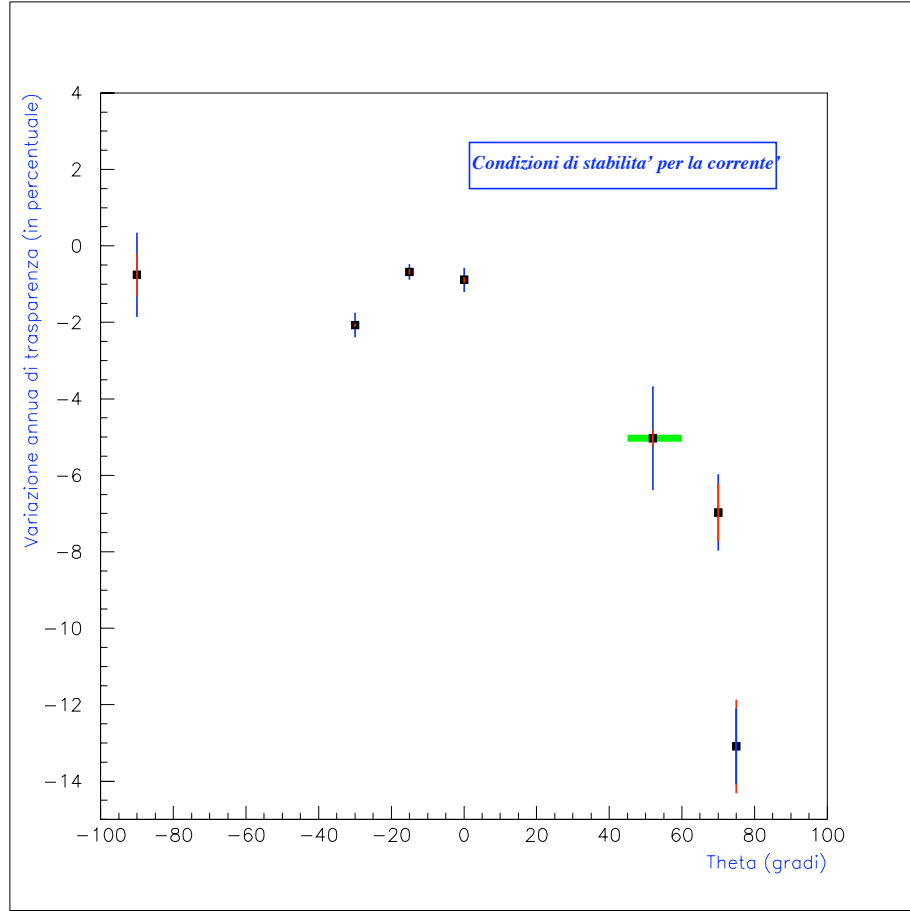


Figura 4.1: Andamento della variazione di trasparenza per unit  di tempo $\frac{\Delta T_{trasp}}{\Delta t}$, espressa in percentuale annua, in funzione dell'angolo di zenith in condizioni di stabilit  delle correnti. In blu   rappresentato l'errore sistematico e in rosso l'errore statistico. La striscia verde che delimita un certo intervallo angolare indica che il valore di $\frac{\Delta T_{trasp}}{\Delta t}$ corrispondente   ottenuto mediando i valori appartenenti a quell'intervallo.

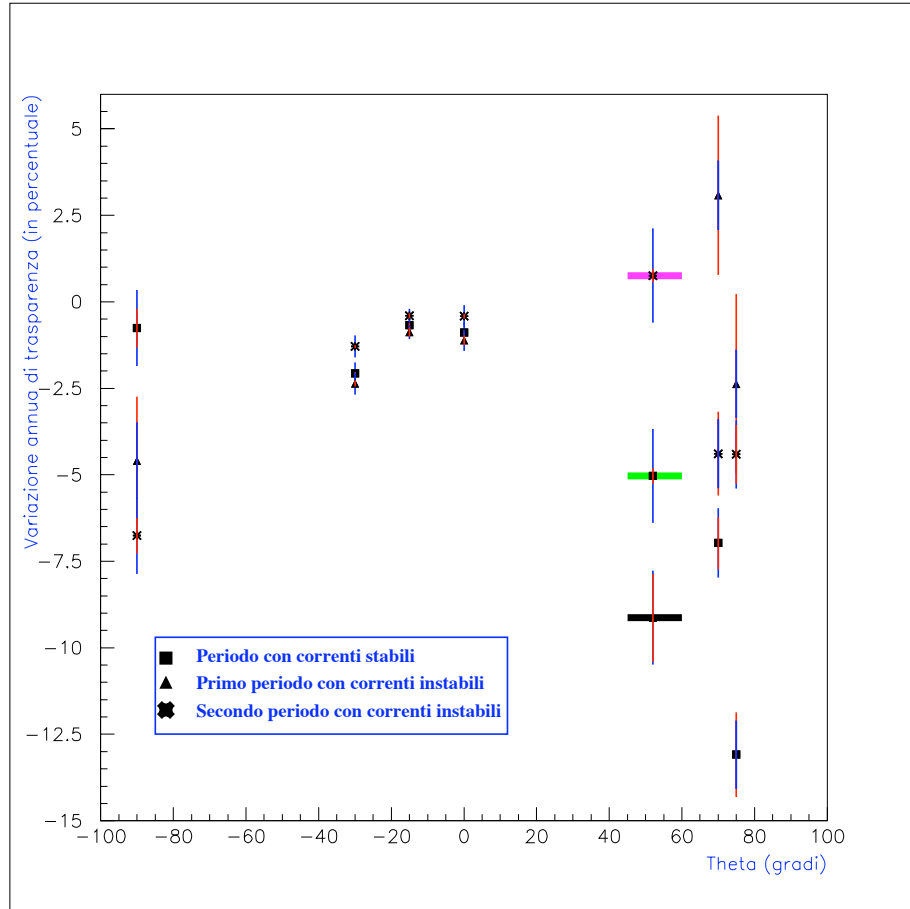


Figura 4.2: Andamento della grandezza $\frac{\Delta T_{trasp}}{\Delta t}$, espressa in percentuale annua, in funzione dell'angolo di zenith per i tre periodi con diverse correnti. In blu è rappresentato l'errore sistematico e in rosso l'errore statistico. Le strisce orizzontali verde, nera e rosa che delimitano alcuni intervalli angolari indicano che il valore di $\frac{\Delta T_{trasp}}{\Delta t}$ corrispondente è ottenuto mediando i valori appartenenti a quell'intervallo, rispettivamente in condizioni stabili, nel primo e nel secondo periodo di instabilità.

4.4 Parametrizzazione della variazione della trasparenza dei moduli ottici

Abbiamo affrontato lo studio del fenomeno del biofouling sulle superfici ottiche esposte a fenomeni di origine biologica che avvengono sui fondali marini, con lo scopo di valutare la variazione dell'efficienza di un rivelatore ottico su scale temporali di diversi anni. Si vuole dunque trovare un modo di rappresentare l'andamento temporale della variazione di trasparenza, ossia la “velocità di oscuramento” $\frac{\Delta T_{trasp}}{\Delta t}$, sull'intero periodo di acquisizione, senza fare distinzioni sui valori delle correnti sottomarine.

Alla luce di quanto visto finora, è possibile stabilire che la superficie intorno all'equatore del modulo ottico ($-30^\circ \leq \theta \leq 0^\circ$) mostra un andamento regolare della variazione della trasparenza, senza nessuna evidente dipendenza dalla presenza di correnti sottomarine.

Nelle figure 4.3 e 4.4 è rappresentato l'andamento temporale delle “velocità di oscuramento” $\frac{\Delta T_{trasp}}{\Delta t}$ misurate in questa regione, nella configurazione di acquisizione in cui i fotodiodi vengono illuminati da una sorgente che si trova alla loro stessa latitudine ($\theta_{sorgente} = 0^\circ$) e che subisce quindi presumibilmente gli stessi effetti di “oscuramento” da parte di biofilm e sedimenti. Le figure mostrano che la variazione di trasparenza per unità di tempo per tali fotodiodi decresce in modo regolare per l'intero periodo, a parte delle modeste fluttuazioni nelle parti iniziale e finale dell'acquisizione (periodi di instabilità).

Le figure 4.5 e 4.6 si riferiscono invece alle misure effettuate con gli stessi fotodiodi, posti sulla sfera A ad una latitudine $-30^\circ \leq \theta \leq 0^\circ$, che vengono però illuminati da una sorgente posta a $\theta = 45^\circ$ sulla sfera C.

Nel primo periodo l'attività di “oscuramento” è massima all'inizio e diminuisce velocemente nel tempo. Dopo circa due mesi e mezzo dall'inizio dell'acquisizione sembra che la velocità di oscuramento iniziale si sia ridotta notevolmente, mentre nei due mesi successivi è evidente un effetto di “pulitura” delle superfici. Poiché questo effetto non è presente nell'andamento temporale di $\frac{\Delta T_{trasp}}{\Delta t}$ misurato quando gli stessi fotodiodi venivano illuminati da una diversa sorgente

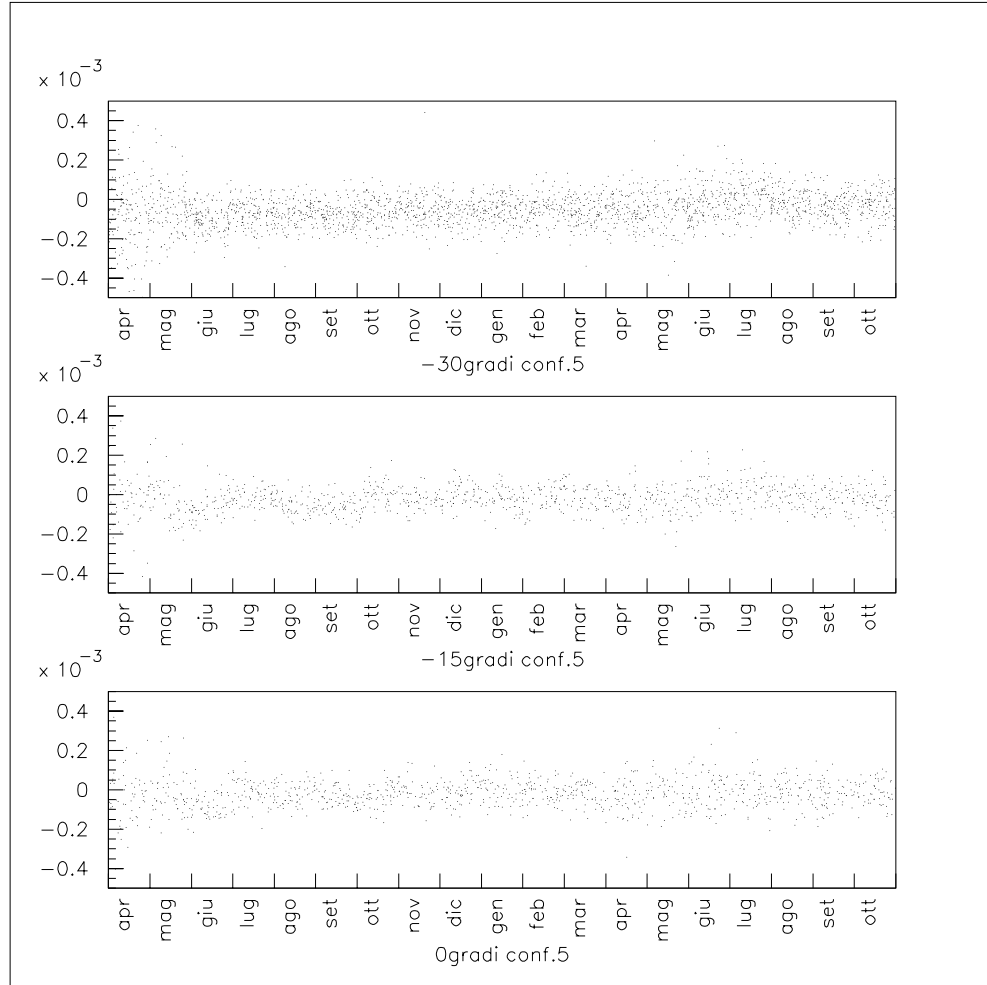


Figura 4.3: Configurazione 5: andamenti temporali della variazione di trasparenza per unità di tempo nei fotodiodi che si trovano,rispettivamente, nella sfera A a $\theta = -30^\circ, \theta = -15^\circ, \theta = 0^\circ$. I dati sono relativi al caso in cui i PIN vengono illuminati da una sorgente, composta da un solo LED, che si trova alla latitudine $\theta = 0^\circ$ nella sfera B. I valori si riferiscono alle variazioni su dodici ore.

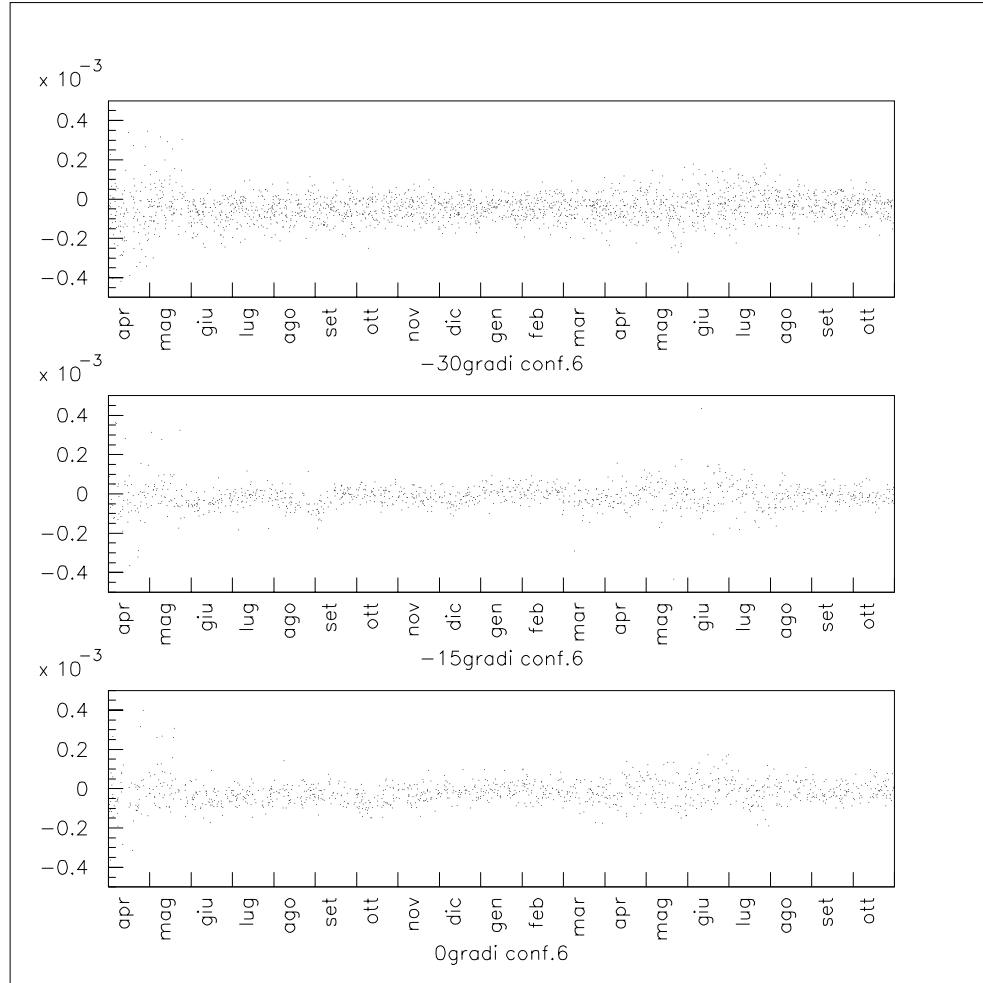


Figura 4.4: *Configurazione 6: andamenti temporali della variazione di trasparenza per unità di tempo nei fotodiodi che si trovano, rispettivamente, nella sfera A a $\theta = -30^\circ$, $\theta = -15^\circ$, $\theta = 0^\circ$. I dati sono relativi al caso in cui i PIN vengono illuminati da una sorgente, composta da due LED, che si trova alla latitudine $\theta = 0^\circ$ nella sfera B. I valori si riferiscono alle variazioni su dodici ore.*

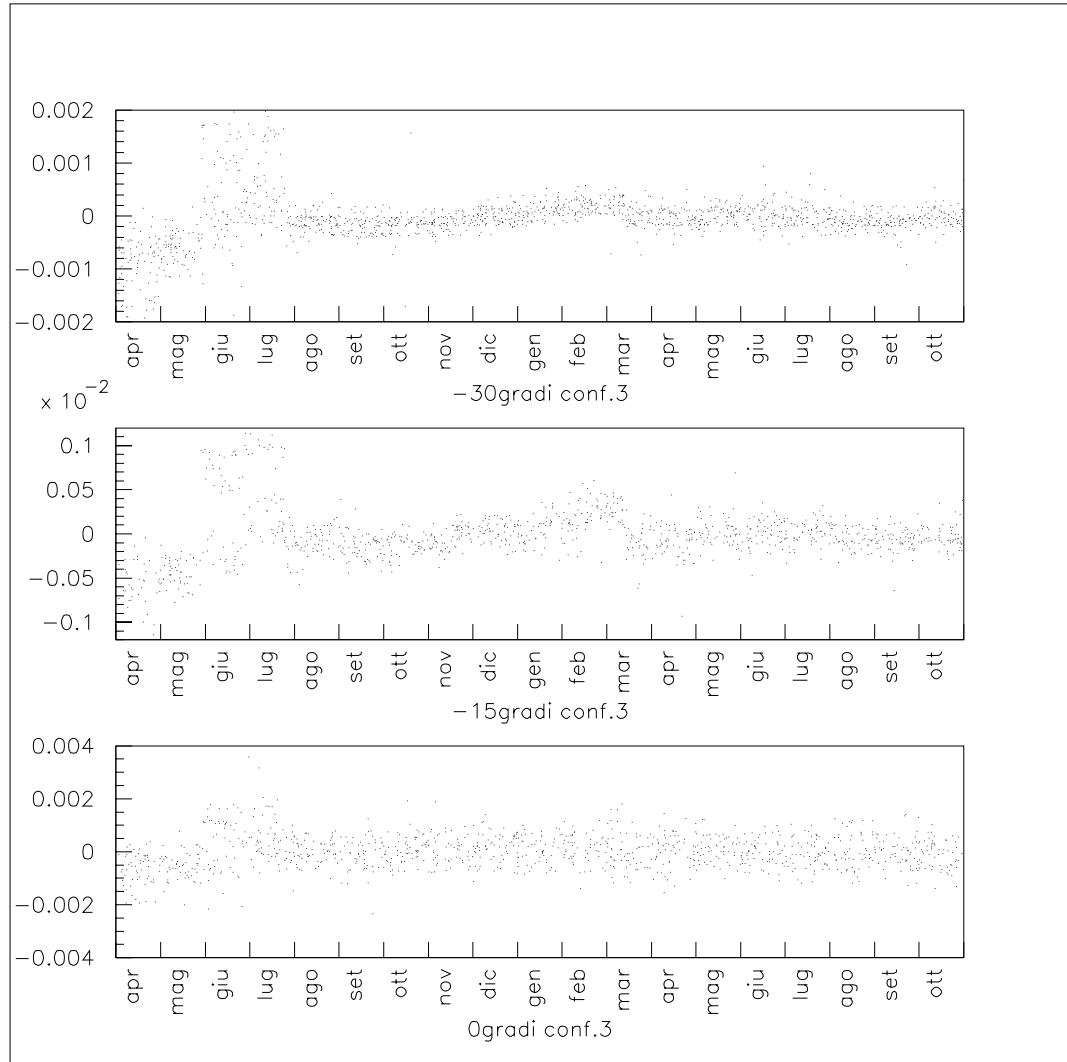


Figura 4.5: *Configurazione 3: andamenti temporali della variazione di trasparenza per unità di tempo nei fotodiodi che si trovano, rispettivamente, sulla sfera A a $\theta = -30^\circ$, $\theta = -15^\circ$, $\theta = 0^\circ$. I dati sono relativi al caso in cui i PIN vengono illuminati da una sorgente, composta da un LED, che si trova alla latitudine $\theta = 45^\circ$ nella sfera C. I valori si riferiscono alle variazioni su dodici ore.*

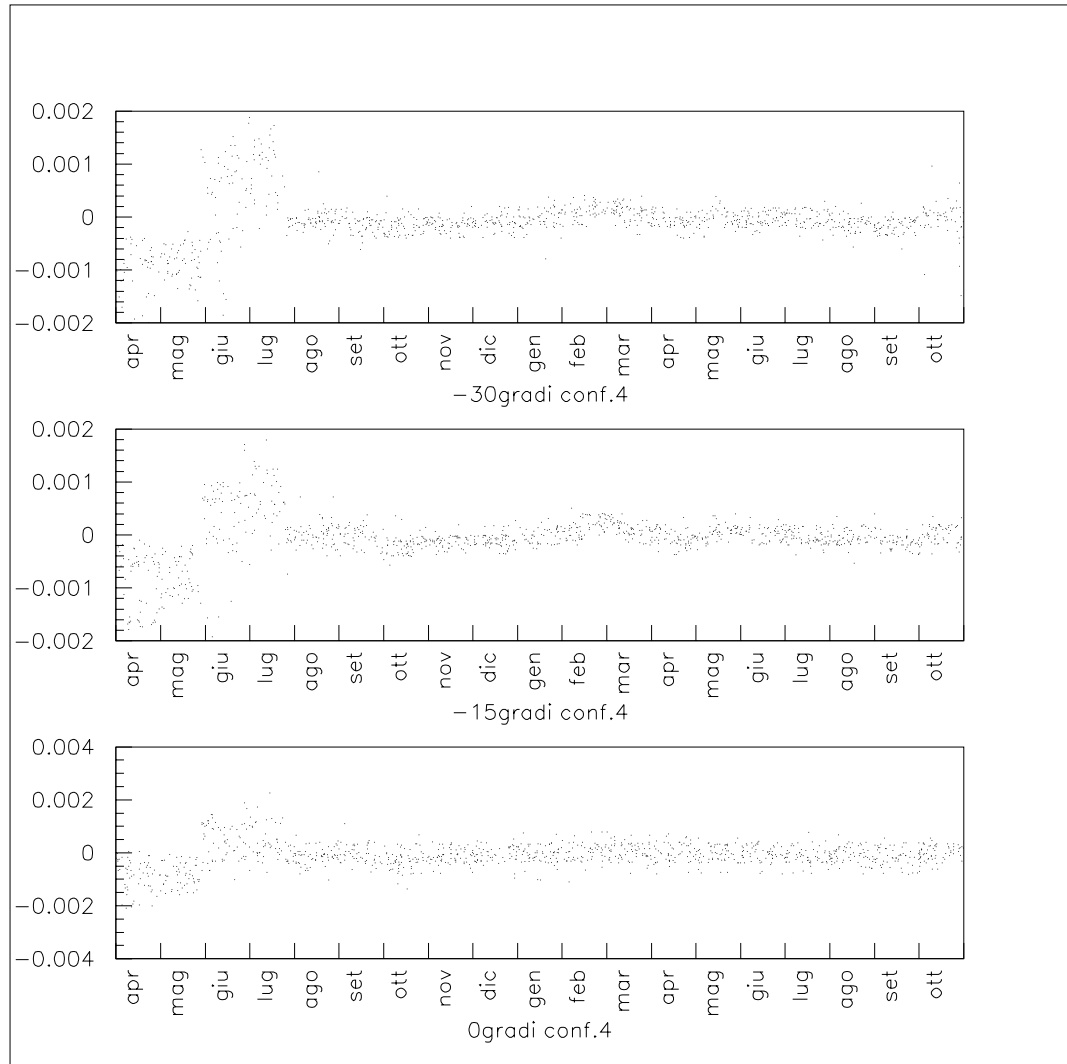


Figura 4.6: Configurazione 4: andamenti temporali della variazione di trasparenza per unità di tempo nei fotodiodi che si trovano a $\theta = -30^\circ, \theta = -15^\circ, \theta = 0^\circ$ sulla sfera C. I dati sono relativi al caso in cui i PIN vengono illuminati da una sorgente, composta da un LED, che si trova alla latitudine $\theta = 45^\circ$ nella sfera C. I valori si riferiscono alle variazioni su dodici ore.

(le figure 4.3 e 4.4 descritte precedentemente), possiamo dire che queste variazioni coinvolgono maggiormente la zona del modulo ottico in cui si trova la sorgente ($\theta = 45^\circ$) sulla sfera C.

Le figure 4.7 e 4.8 si riferiscono invece alle misure fatte nelle configurazioni 7 e 8, in cui la sorgente è posta sulla sfera B a $\theta = -90^\circ$ e i fotodiodi si trovano sulla sfera C con $\theta = 60^\circ, 70^\circ$ e 75° . Si notano in questo caso le stesse fluttuazioni iniziali riscontrate anche nelle figure 4.5 e 4.6, che confermano il fatto che il comportamento della superficie della sfera C nell'intervallo $45^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$ è uniforme, ed è dunque lecito mettere insieme i valori ottenuti con i fotodiodi appartenenti a tale intervallo.

Nell'ultima metà delle acquisizioni si nota un'ulteriore alternanza tra periodi nei quali l'attività di “oscuramento” aumenta rapidamente e periodi nei quali subentrano effetti di “pulitura” delle superfici (o di una delle due). Queste ultime variazioni non possono però essere attribuite con certezza né alla superficie di vetro in corrispondenza dei fotodiodi, né a quella che si trova in corrispondenza della sorgente, poiché mancano le conferme sperimentali.

La “velocità di oscuramento” $\frac{\Delta T_{\text{trasp}}}{\Delta t}$ ha dunque in alcuni periodi un andamento molto regolare nel tempo: la distribuzione dei valori sperimentali di $\frac{\Delta T_{\text{trasp}}}{\Delta t}$ è ben assimilabile ad una gaussiana, come si vede in figura 4.9. Poiché però si presentano frequentemente casi in cui la “velocità di oscuramento” non è costante (l'oscuramento risulta dunque “accelerato” o “rallentato”) queste variazioni producono sulla distribuzione delle fluttuazioni ulteriori, delle code che ne modificano il profilo, non rendendola più rappresentabile con una singola distribuzione gaussiana.

Essendo comunque queste fluttuazioni di natura casuale, dovute probabilmente all'accumulo di sedimenti sulle superfici dei moduli ottici in corrispondenza dei fotodiodi o dei LED, ci aspettiamo che siano a loro volta caratterizzate da un andamento gaussiano e dunque la distribuzione complessiva della variazione di trasparenza per unità di tempo possa essere rappresentata come la somma di due gaussiane indipendenti: una che contiene gli eventi la cui “velocità di oscuramento” è lentamente variabile e l'altra che rappresenta eventi che comportano variazioni più rapide delle caratteristiche della superficie trasparente. In figura 4.10, ad esempio, sono rappre-

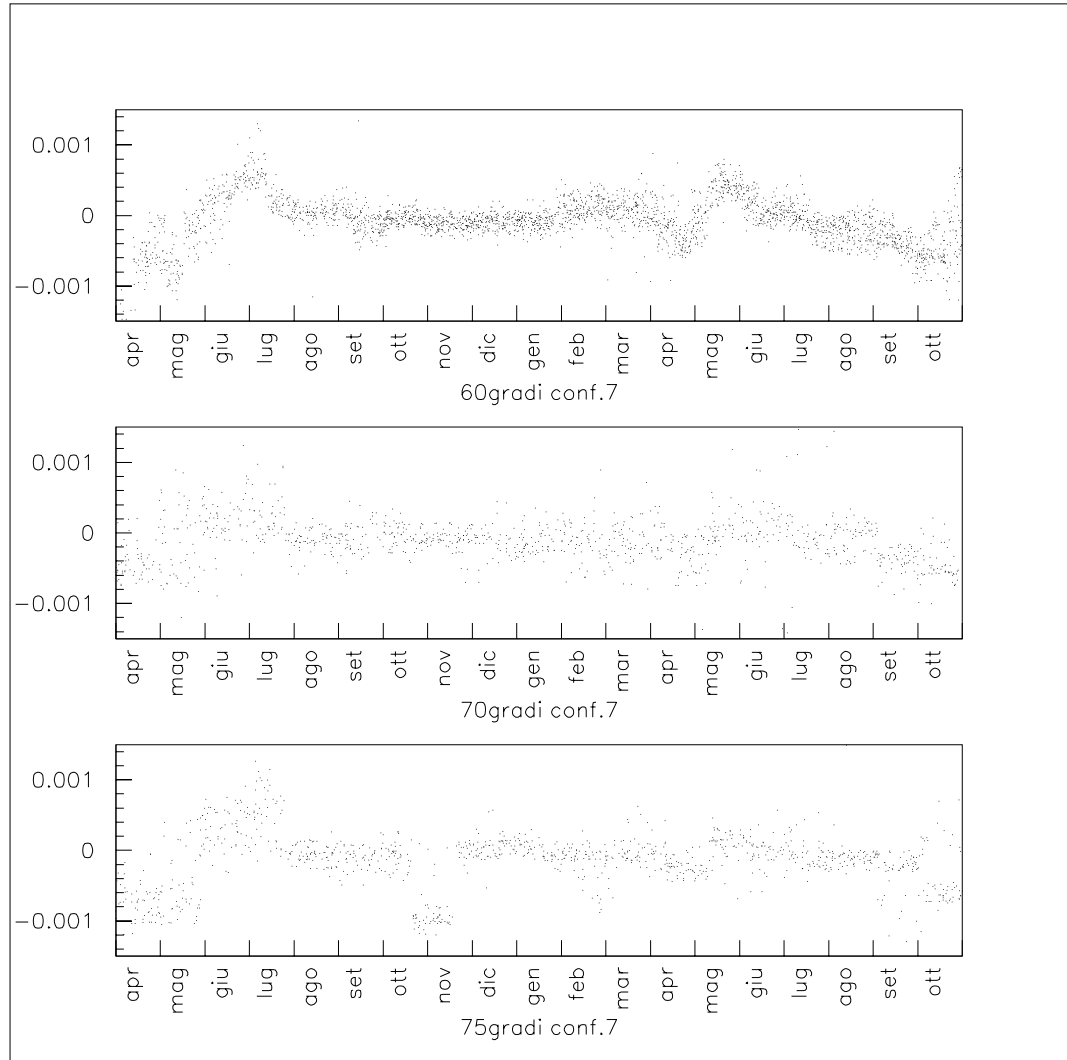


Figura 4.7: Configurazione 7: andamenti temporali della variazione di trasparenza per unità di tempo nei fotodiodi che si trovano, rispettivamente, sulla sfera C a $\theta = 60^\circ$, $\theta = 70^\circ$, $\theta = 75^\circ$. In dati sono relativi al caso in cui i PIN vengono illuminati da una sorgente, composta da un solo LED, che si trova ad una latitudine $\theta = -90^\circ$ sulla sfera B.

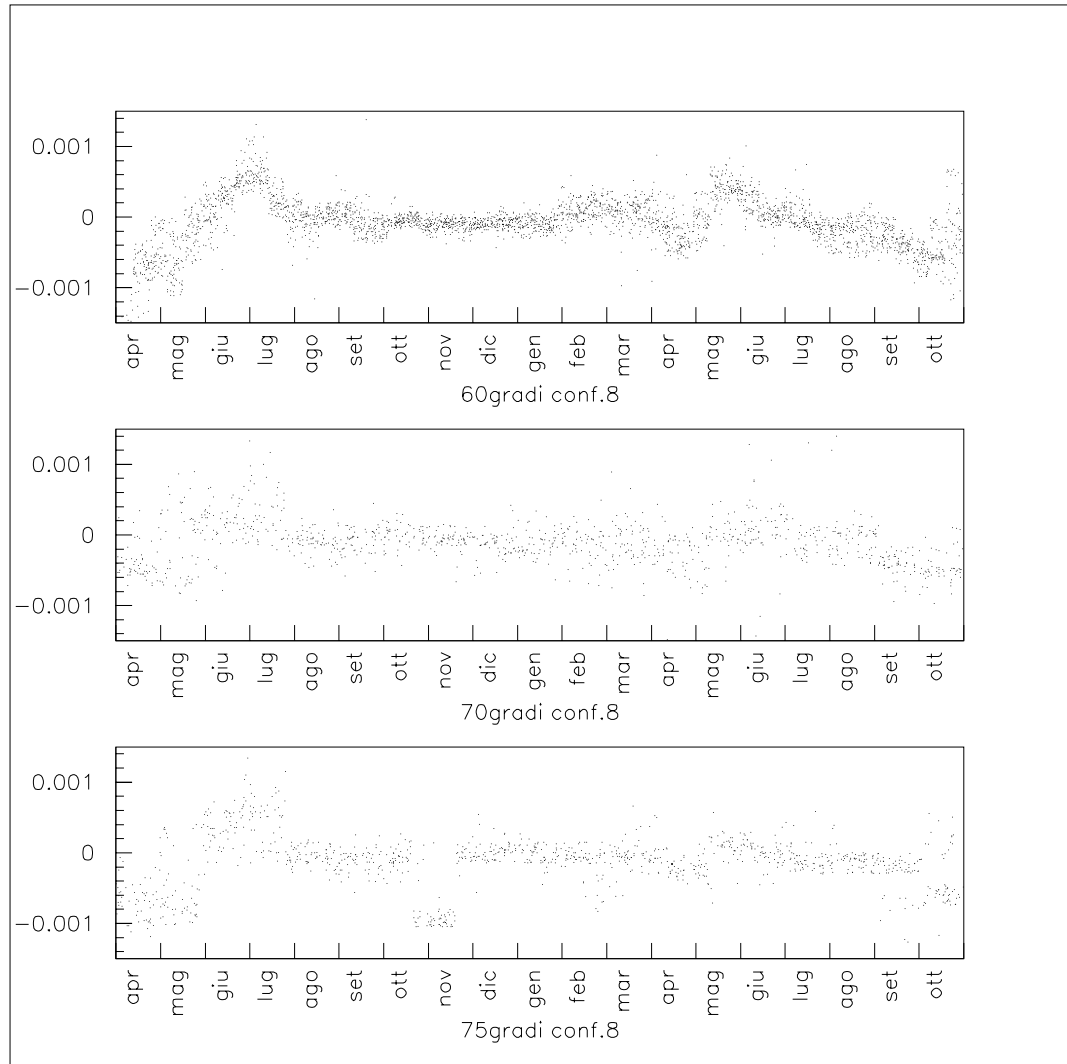


Figura 4.8: *Configurazione 8: andamenti temporali della variazione di trasparenza per unità di tempo nei fotodiodi che si trovano, rispettivamente, sulla sfera C a $\theta = 60^\circ$, $\theta = 70^\circ$, $\theta = 75^\circ$. In dati sono relativi al caso in cui i PIN vengono illuminati da una sorgente, composta da due LED, che si trova ad una latitudine $\theta = -90^\circ$ sulla sfera B.*

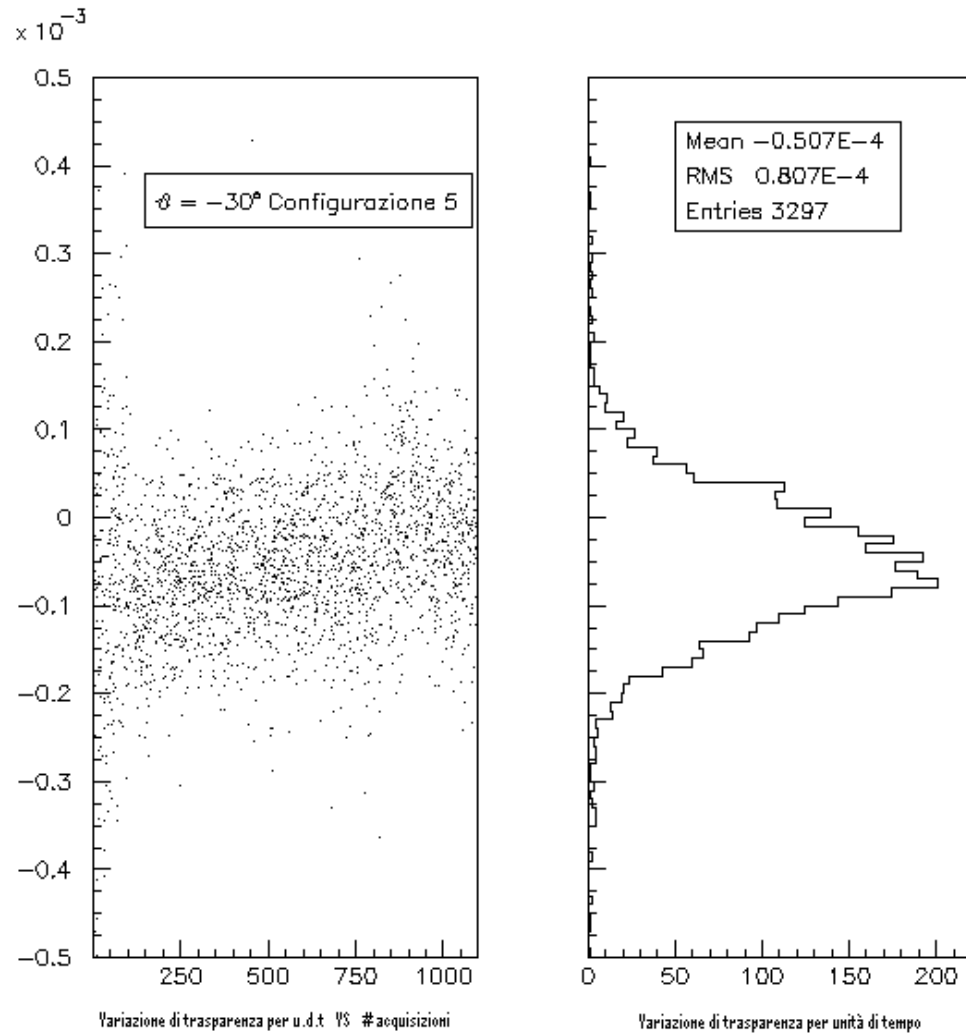


Figura 4.9: Configurazione 5: andamento della variazione di trasparenza per unità di tempo rappresentata per i PIN che si trovano a $\theta = -30^\circ$, quando vengono illuminati dal LED posto sulla sfera B. A sinistra si ha l'andamento temporale su tutto il periodo di acquisizione (sull'asse orizzontale è rappresentato il numero di acquisizioni), a destra si ha la distribuzione dei valori della $\frac{\Delta Trasp}{\Delta t}$.

sentate le distribuzioni dei valori di $\frac{\Delta T_{r asp}}{\Delta t}$, riferiti all'intera presa dati, per il PIN che si trova a $\theta = -15^\circ$ sulla sfera A, quando questo viene illuminato dai LED posti sulla sfera C, a $\theta = 45^\circ$. Si nota dai valori del χ^2/N (N rappresenta il numero di gradi di libertà) che, almeno in questo caso, l'ipotesi che le distribuzioni siano rappresentabili con la somma di due gaussiane è favo-

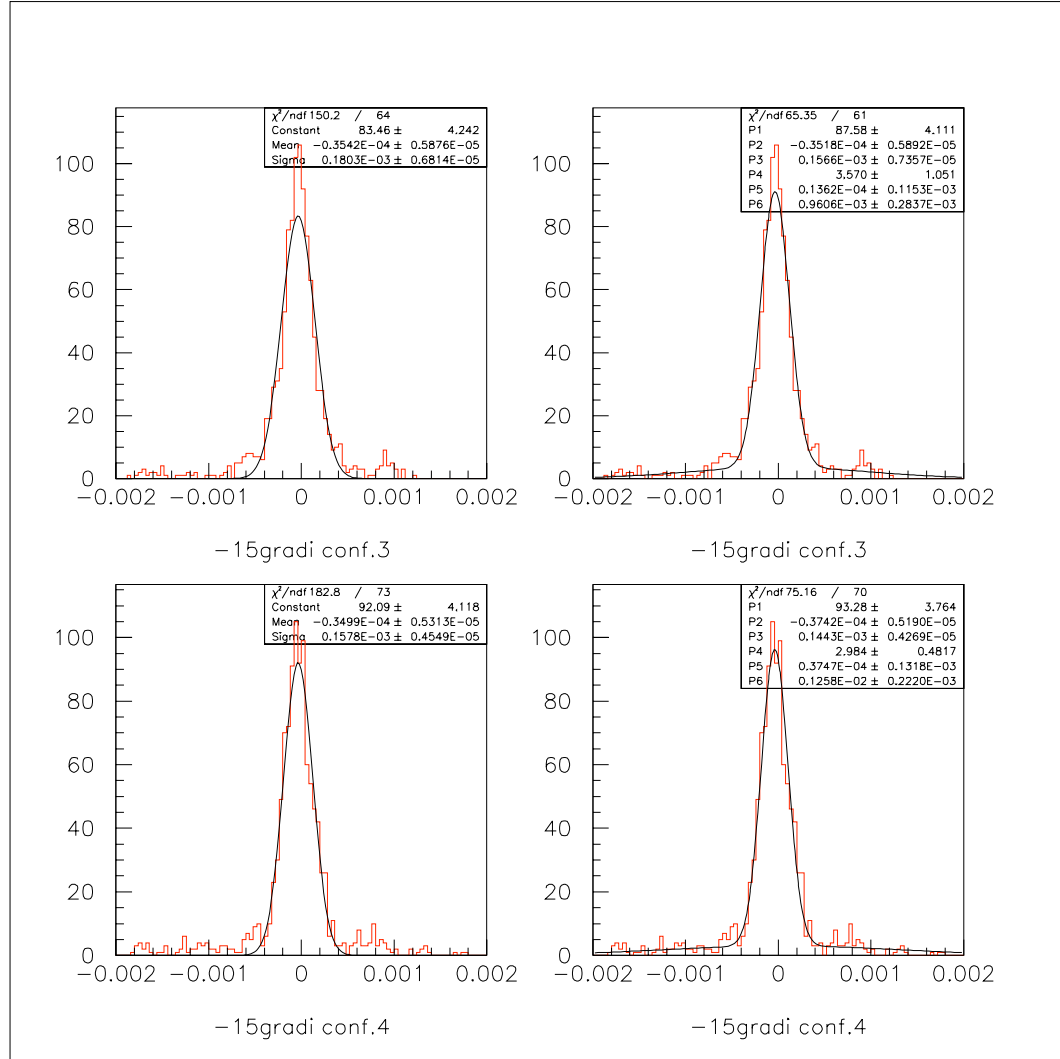


Figura 4.10: Distribuzioni dei valori, riferiti all'intera presa dati, di $\frac{\Delta T_{r asp}}{\Delta t}$ per il PIN che si trova sulla sfera A a $\theta = -15^\circ$, illuminato con uno e due LED, posti (a $\theta = 45^\circ$) sulla sfera C (configurazioni 3 e 4). Si cerca di approssimare le distribuzioni sperimentali con una (figura a sinistra) o con due gaussiane (a destra).

rita dai dati sperimentali, in quanto la seconda gaussiana, molto più larga della prima, consente

di descrivere anche quegli eventi più rari che “popolano” le code di queste distribuzioni.

Per ottenere il valore finale della variazione di trasparenza per unità di tempo per un dato angolo bisognerà quindi procedere nel seguente modo, dopo aver calcolato per ogni acquisizione e per ogni configurazione la grandezza $\frac{\Delta Trasp}{\Delta t}$, come nella formula 3.2:

- per ogni distribuzione fare un fit con la funzione $G(t)$ che è la somma di due gaussiane indipendenti.

$$G(t) = G_1(t) + G_2(t) \quad (4.21)$$

- calcolare, per ogni PIN e in entrambe le condizioni di illuminazione, il valore medio $\mu(G)$ e l'area $A(G)$ delle due gaussiane e la grandezza

$$\frac{\mu(G_1)A(G_1) + \mu(G_2)A(G_2)}{A(G_1) + A(G_2)} \quad (4.22)$$

che rappresenta il valore medio della distribuzione complessiva.

- esprimere i valori calcolati, che si riferiscono ad una variazione su dodici ore, in percentuali annuali.
- mediare tra loro i valori ottenuti con le due diverse illuminazioni.

L'area di ogni gaussiana è calcolata integrando la distribuzione

$$\int C e^{\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx \quad (4.23)$$

i cui parametri C , μ e σ sono ottenuti dal fit delle distribuzioni sperimentali. I valori della variazione di trasparenza per ogni intervallo angolare verranno calcolati a partire dai valori misurati, secondo le modalità descritte nel paragrafo precedente.

Ad esempio, se si considerano i fotodiodi che si trovano ad una latitudine $\theta = -30^\circ$, quando questi vengono illuminati con uno o due LED da una sorgente posta all'“equatore” della sfera B (configurazioni 5 e 6), l'andamento temporale della grandezza $\frac{\Delta Trasp}{\Delta t}$ è rappresentato nelle figure 4.3 e 4.4.

Nel caso in cui la sorgente è composta da un solo LED (configurazione 5), la distribuzione è caratterizzata dai seguenti parametri:

$$C_{1CONF5} = 180,2 \pm 4,5$$

rappresenta l'altezza della prima gaussiana (quella più alta)

$$C_{2CONF5} = 1,36 \pm 0,35$$

rappresenta l'altezza della seconda gaussiana

$$\mu_{1CONF5} = (-5,11 \pm 0,13) \cdot 10^{-5}$$

rappresenta il valore medio della prima gaussiana

$$\mu_{2CONF5} = (-1,2 \pm 1,1) \cdot 10^{-4}$$

rappresenta il valore medio della seconda gaussiana

$$\sigma_{15} = (6,97 \pm 0,11) \cdot 10^{-5}$$

rappresenta la larghezza della prima gaussiana.

$$\sigma_{25} = (8,43 \pm 0,99) \cdot 10^{-4}$$

rappresenta la larghezza della seconda gaussiana.

Nel caso in cui la sorgente è composta da due LED si ha:

$$C_{16} = 180,2 \pm 4,5$$

$$C_{26} = 6,2 \pm 2,8$$

$$\mu_{16} = (-4,31 \pm 0,11) \cdot 10^{-5}$$

$$\mu_{26} = (-5,6 \pm 1,3) \cdot 10^{-5}$$

$$\sigma_{16} = (5,15 \pm 0,14) \cdot 10^{-5}$$

$$\sigma_{26} = (1,58 \pm 0,35) \cdot 10^{-4}$$

Il rapporto tra l'area di una singola gaussiana e l'area totale della distribuzione, può essere interpretato come la probabilità che un evento appartenga all'una o all'altra gaussiana.

Nel caso in cui la sorgente è costituita da un solo LED, si ha:

$$\frac{A(G_1)}{A(G_1) + A(G_2)} = 0,92$$

$$\frac{A(G_2)}{A(G_1) + A(G_2)} = 0,08$$

Mentre nella configurazione 6, si ha:

$$\frac{A(G_1)}{A(G_1) + A(G_2)} = 0,90$$

$$\frac{A(G_2)}{A(G_1) + A(G_2)} = 0,10$$

Si vede dunque che in entrambi i casi l'area della gaussiana G_1 , che contiene il maggior numero di eventi e che in generale è più stretta, è molto maggiore dell'area della seconda gaussiana, che contiene le “code” delle distribuzioni. Questo conferma l'ipotesi che la seconda gaussiana serva a descrivere quegli eventi “sporadici” in cui le variazioni di trasparenza sono più grandi del solito: i PIN che si trovano nella zona intorno all'equatore hanno andamenti regolari e dunque è corretto aspettarsi, per questa particolare configurazione, che la distribuzione possa essere descritta anche con una sola gaussiana.

Seguendo la catena di operazioni descritta in precedenza e indicando $\mu(G_1) = \langle \frac{\Delta Trasp(G_1)}{\Delta t} \rangle$ e $\mu(G_2) = \langle \frac{\Delta Trasp(G_2)}{\Delta t} \rangle$ si ha:

$$\frac{\Delta Trasp}{\Delta t} = \frac{\langle \frac{\Delta Trasp(G_1)}{\Delta t} \rangle A(G_1) + \langle \frac{\Delta Trasp(G_2)}{\Delta t} \rangle A(G_2)}{A(G_1) + A(G_2)} \simeq \langle \frac{\Delta Trasp(G_1)}{\Delta t} \rangle \quad (4.24)$$

dato che, in questo particolare caso $A(G_1) \gg A(G_2)$. Si ha dunque

$$\frac{\Delta Trasp(1LED)}{\Delta t} = (-5, 11 \pm 0, 13) \cdot 10^{-5}$$

$$\frac{\Delta Trasp(2LED)}{\Delta t} = (-4, 39 \pm 0, 10) \cdot 10^{-5}$$

Questi sono valori misurati ogni dodici ore, per passare al valore equivalente che si avrebbe su un anno, si deve fare la seguente conversione:

$$\frac{\Delta Trasp(12ore)}{\Delta t} \times 2 \times 365 = \frac{\Delta Trasp(1anno)}{\Delta t}$$

Il valore finale è dunque

$$\frac{\Delta Trasp(-30^\circ)}{\Delta t} = \frac{1}{2} \frac{\Delta Trasp(5, 6)}{\Delta t} = (-1, 704 \pm 0, 029)\%$$

Lo stesso procedimento viene applicato per tutti gli altri angoli, anche se ovviamente non sempre è possibile fare le approssimazioni fatte in questo caso.

In figura 4.11 è rappresentata la variazione di trasparenza per unità di tempo in funzione della latitudine sul modulo ottico, calcolata con la formula 4.22, e in tabella 4.7 vengono riportati i

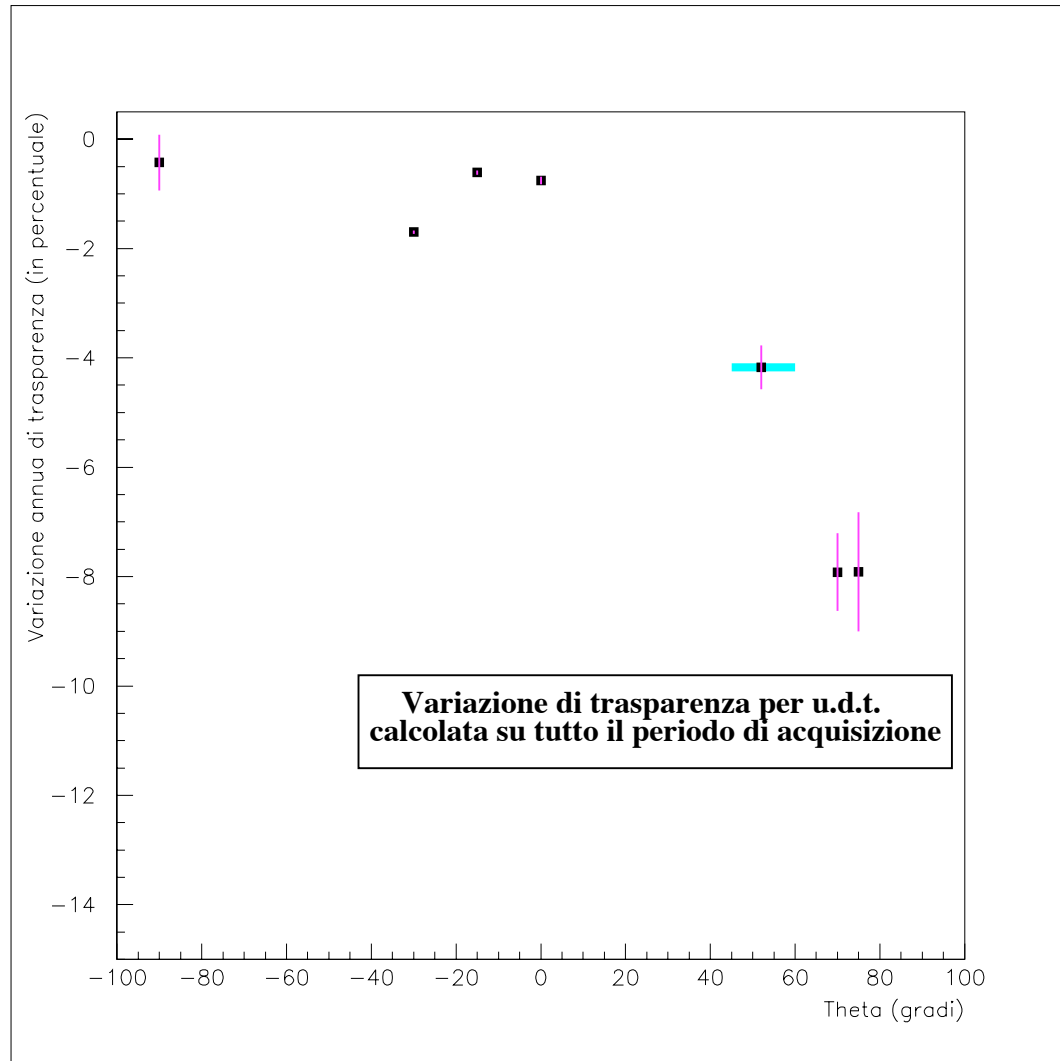


Figura 4.11: $\frac{\Delta T_{trasp}}{\Delta t}$ in funzione dell'angolo θ , che individua la latitudine sul modulo ottico, calcolata considerando tutti i dati, senza distinguere in base alle correnti. Gli errori sistematici non sono indicati, ma sono riportati nelle tabelle 4.4, 4.5 e 4.6.

relativi valori.

	$\frac{\Delta T_{trasp}}{\Delta t} \pm \text{err. stat.}$ [% annua]
$\theta = -90^\circ$	$(-0,43 \pm 0,51)\%$
$\theta = -30^\circ$	$(-1,704 \pm 0,029)\%$
$\theta = -15^\circ$	$(-0,611 \pm 0,038)\%$
$\theta = 0^\circ$	$(-0,764 \pm 0,067)\%$
$\theta = 45^\circ \div 60^\circ$	$(-4,17 \pm 0,39)\%$
$\theta = 70^\circ$	$(-7,92 \pm 0,71)\%$
$\theta = 75^\circ$	$(-7,9 \pm 1,1)\%$

Tabella 4.7: Valori della grandezza $\frac{\Delta T_{trasp}}{\Delta t}$ calcolati su tutto il periodo di acquisizione.

Il processo di “oscuramento” subito dalle superfici dei moduli ottici nella zona dell’equatore continua a dimostrare un andamento regolare e poco dipendente dall’effetto delle correnti sottomarine: in questa zona la componente che maggiormente influisce sulla diminuzione dell’efficienza del modulo ottico è dunque costituita dalla sottile pellicola biologica che si sviluppa con il tempo su di esso.

Dato il rapido sviluppo delle colonie di batteri sulle superfici immerse in acqua, ci si aspetterebbe nel primo periodo di acquisizione una variazione di trasparenza maggiore rispetto ai periodi successivi.

Per studiare la possibile dipendenza dal tempo della velocità di oscuramento suddividiamo il campione di dati in sette periodi di uguale durata (circa due mesi e mezzo) e analizziamo separatamente i vari periodi. Per ognuno dei sette periodi vengono fatte le analisi descritte in precedenza e i risultati ottenuti (la velocità media della variazione di trasparenza) sono mostrati nelle figure 4.12, 4.13 e nelle tabelle 4.8 e 4.9.

La variazione di trasparenza $\frac{\Delta T_{trasp}}{\Delta t}$ (in generale negativa) decresce in valore assoluto in funzione del tempo per tutta la prima parte (i primi nove mesi) dell’acquisizione: la decrescita

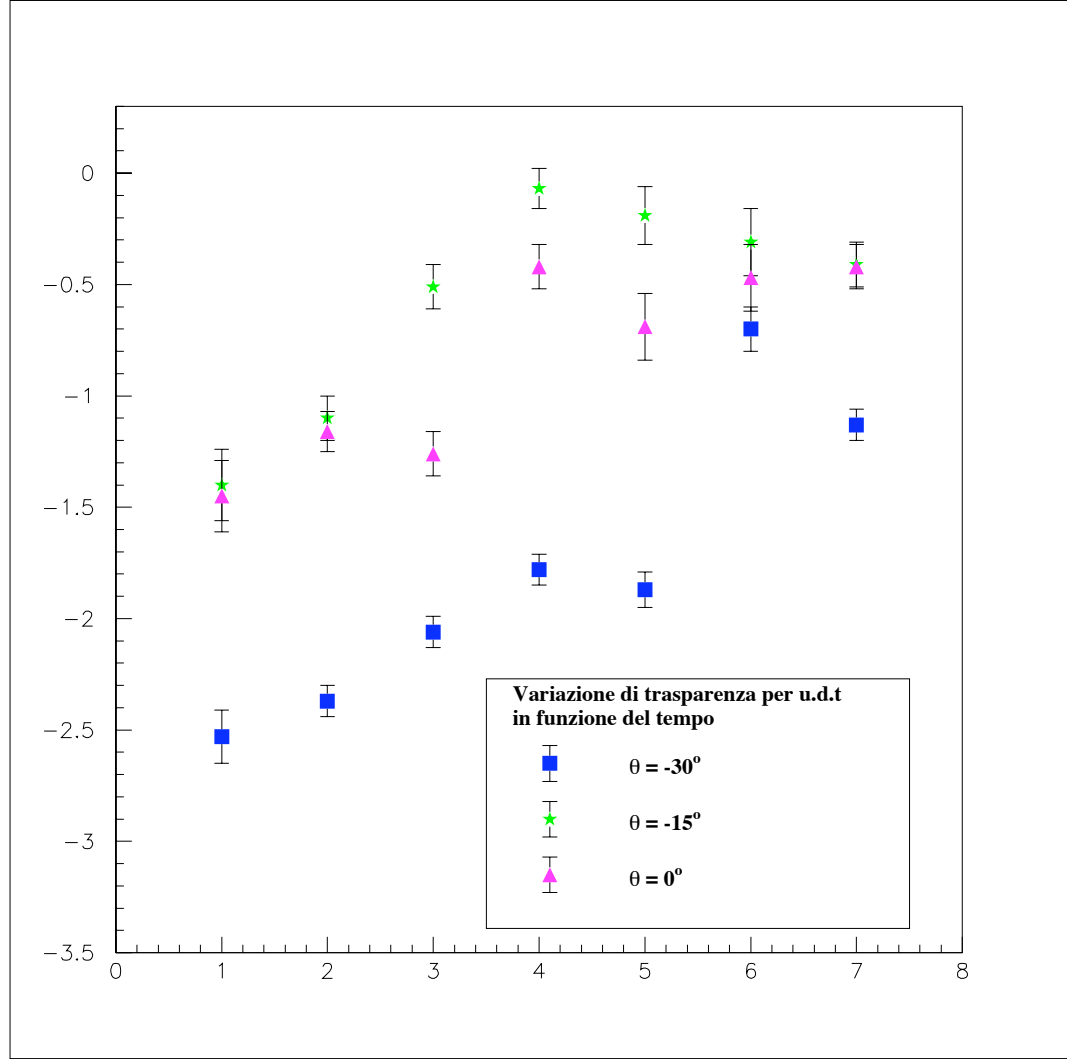


Figura 4.12: $\frac{\Delta Trasp}{\Delta t}$ in funzione del tempo, per i PIN che si trovano nella zona dell'equatore del modulo ottico, riferita ai sette periodi in cui è stata suddivisa l'acquisizione e calcolata con la formula 4.22. Gli errori sistematici non sono indicati, ma sono riportati nelle tabelle 4.4, 4.5 e 4.6.

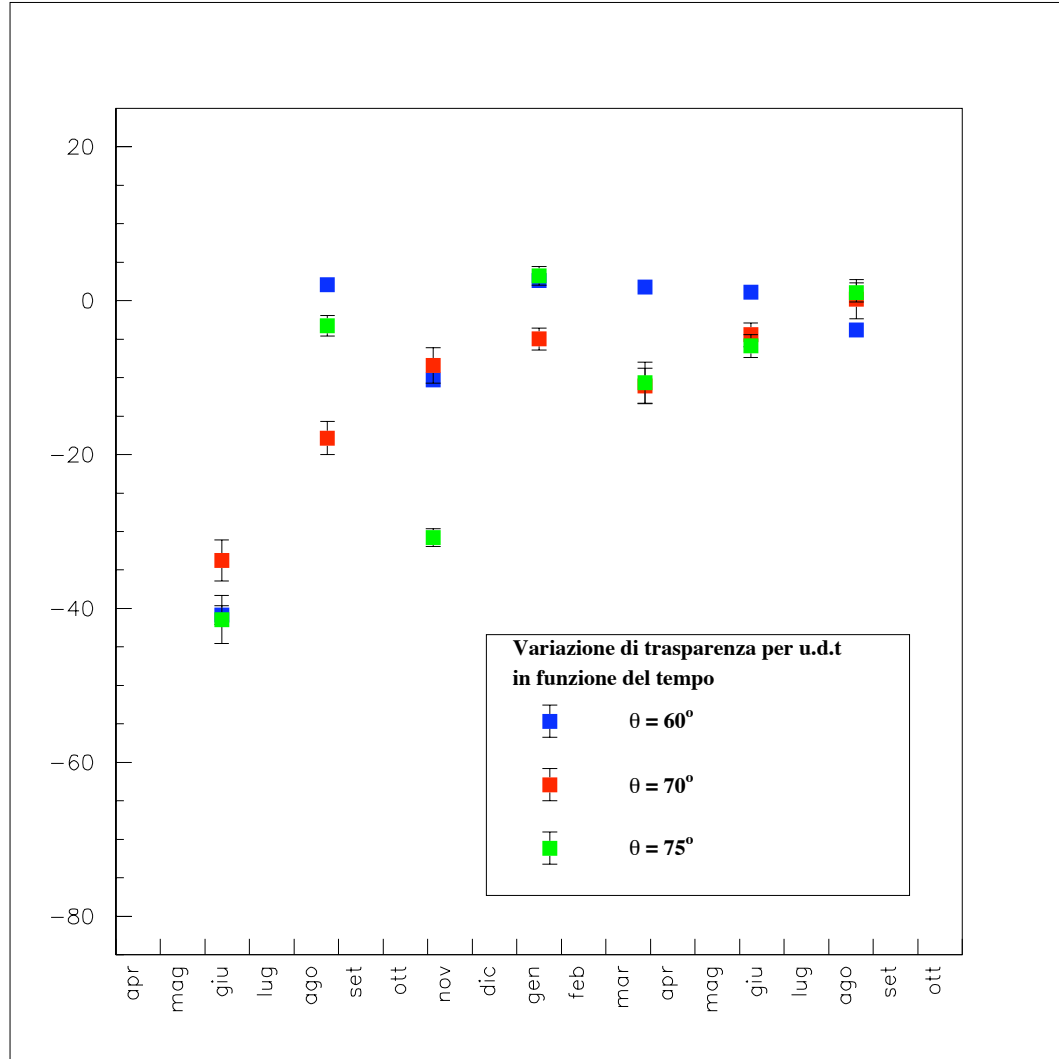


Figura 4.13: $\frac{\Delta Trasp}{\Delta t}$ in funzione del tempo, per i PIN che si trovano ad una latitudine di 60° , 70° , 75° sul modulo ottico, riferita ai sette periodi in cui è stata suddivisa l'acquisizione e calcolata con la formula 4.22. Gli errori sistematici non sono indicati, ma sono riportati nelle tabelle 4.4, 4.5 e 4.6.

	$\frac{\Delta Trasp(-30^\circ)}{\Delta t} \pm \text{err. stat.}$ [% annua]	$\frac{\Delta Trasp(-15^\circ)}{\Delta t} \pm \text{err. stat.}$ [% annua]	$\frac{\Delta Trasp(0^\circ)}{\Delta t} \pm \text{err. stat.}$ [% annua]
Primo periodo	$(-2,53 \pm 0,12)\%$	$(-1,40 \pm 0,16)\%$	$(-1,45 \pm 0,16)\%$
Secondo periodo	$(-2,366 \pm 0,074)\%$	$(-1,10 \pm 0,11)\%$	$(-1,159 \pm 0,094)\%$
Terzo periodo	$(-2,064 \pm 0,074)\%$	$(-0,514 \pm 0,099)\%$	$(-1,260 \pm 0,096)\%$
Quarto periodo	$(-1,781 \pm 0,068)\%$	$(-0,070 \pm 0,095)\%$	$(-0,422 \pm 0,098)\%$
Quinto periodo	$(-1,875 \pm 0,083)\%$	$(-0,19 \pm 0,13)\%$	$(-0,69 \pm 0,15)\%$
Sesto periodo	$(-0,70 \pm 0,10)\%$	$(-0,31 \pm 0,15)\%$	$(-0,47 \pm 0,15)\%$
Settimo periodo	$(-1,131 \pm 0,068)\%$	$(-0,41 \pm 0,12)\%$	$(-0.42 \pm 0,10)\%$

Tabella 4.8: Valori della grandezza $\frac{\Delta Trasp}{\Delta t}$ calcolati su tutti i periodi di acquisizione per $-30^\circ \leq \theta \leq 0^\circ$, espressi in percentuale annua.

di $|\frac{\Delta Trasp}{\Delta t}|$ nel tempo è grossomodo lineare nella zona del modulo ottico che si trova intorno all’“equatore”, che continua a mostrarsi regolare. L’andamento si mantiene anche nelle altre zone angolari, anche se risulta meno evidente nella zona del modulo ottico più vicina al “Polo Nord”, a causa delle fluttuazioni, come già visto nelle figure 4.5 e 4.6. Nella seconda parte del campione di dati si osserva invece un progressivo “rallentamento” del processo: in alcuni casi l’oscuramento è compensato o rimosso dalla pulitura dei moduli ottici. Questa “saturazione” della $\frac{\Delta Trasp}{\Delta t}$ rappresenta in modo soddisfacente l’evoluzione temporale aspettata per la crescita delle colonie di batteri sulle superfici poste in acqua.

La figura 4.12 mostra che, per la zona intorno all’equatore è possibile cercare di parametrizzare l’evoluzione temporale di tale processo. Abbiamo cercato di parametrizzare la funzione che rappresenta l’evoluzione nel tempo di $\frac{\Delta Trasp(t)}{\Delta t}$ con la seguente funzione a tre parametri:

$$\frac{\Delta Trasp(t)}{\Delta t} = p_1(1 - e^{-\frac{t}{p_2}}) - p_3 \quad (4.25)$$

Per $\theta = -15^\circ, 0^\circ$ la funzione ben approssima i dati sperimentali, come si può vedere nelle figure 4.14 e 4.15, mentre

	$\frac{\Delta T_{r asp}(45^\circ \div 60^\circ)}{\Delta t} \pm \text{err. stat.}$ [% annua]	$\frac{\Delta T_{r asp}(70^\circ)}{\Delta t} \pm \text{err. stat.}$ [% annua]	$\frac{\Delta T_{r asp}(75^\circ)}{\Delta t} \pm \text{err. stat.}$ [% annua]
Primo periodo	$(-40,8 \pm 1,2)\%$	$(-33,7 \pm 2,7)\%$	$(-41,4 \pm 3,1)\%$
Secondo periodo	$(2,09 \pm 0,82)\%$	$(-17,9 \pm 2,1)\%$	$(-3,3 \pm 1,3)\%$
Terzo periodo	$(-10,32 \pm 0,48)\%$	$(-8,4 \pm 2,3)\%$	$(-30,8 \pm 1,1)\%$
Quarto periodo	$(2,64 \pm 0,79)\%$	$(-4,9 \pm 1,4)\%$	$(3,2 \pm 1,2)\%$
Quinto periodo	$(1,77 \pm 0,54)\%$	$(-11,1 \pm 2,3)\%$	$(-10,6 \pm 2,7)\%$
Sesto periodo	$(1,08 \pm 0,45)\%$	$(-4,4 \pm 1,5)\%$	$(-5,9 \pm 1,5)\%$
Settimo periodo	$(-3,82 \pm 0,47)\%$	$(-0,2 \pm 2,5)\%$	$(1,1 \pm 1,3)\%$

Tabella 4.9: Valori della grandezza $\frac{\Delta T_{r asp}}{\Delta t}$ calcolati su tutti i periodi di acquisizione per $45^\circ \leq \theta \leq 75^\circ$, espressi in percentuale annua.

per $\theta = -30^\circ$ (figura 4.16) l'andamento temporale è uniformemente crescente: è presumibile che l'eventuale valore asintotico sia raggiunto oltre il termine della presa dati. L'andamento è quindi rappresentabile meglio con una retta con pendenza positiva.

L'andamento esponenziale descritto finora si adatta bene anche ad angoli di zenith maggiori, anche se in questo caso è possibile fare tali considerazioni solo a livello qualitativo, per via delle fluttuazioni sui valori ottenuti.

I risultati ottenuti sull'andamento temporale della “velocità di oscuramento”, insieme a quelli sulla $\frac{\Delta T_{r asp}}{\Delta t}$ in funzione di θ , rappresentati in figura 4.11, sono stati utilizzati per simulare con un semplice programma “MonteCarlo” l'andamento osservato sperimentalmente dell'evoluzione temporale della trasparenza delle superfici di vetro dei moduli ottici.

Le distribuzioni dei valori misurati di $\frac{\Delta T_{r asp}}{\Delta t}$, ottenute illuminando i PIN con uno o due LED, come abbiamo visto in precedenza, non sono coincidenti.

Le due distribuzioni, a parità di angolo e configurazione di acquisizione, hanno area A e larghezza σ confrontabili; l'esistenza di un eventuale errore sistematico ha infatti l'effetto di traslarne semplicemente il centro: di conseguenza i valori medi delle due distribuzioni possono essere

	$\frac{\Delta T_{r asp}(-90^\circ)}{\Delta t} \pm \text{err. stat.}$ [% annua]
Primo Periodo	$(22,4 \pm 2,5)\%$
Secondo Periodo	$(14,2 \pm 1,1)\%$
Terzo Periodo	$(2,06 \pm 0,84)\%$
Quarto Periodo	$(-3,80 \pm 0,97)\%$
Quinto Periodo	$(-2,2 \pm 1,1)\%$
Sesto Periodo	$(4,1 \pm 1,0)\%$
Settimo Periodo	$(-24,9 \pm 1,2)\%$

Tabella 4.10: Valori della grandezza $\frac{\Delta T_{r asp}}{\Delta t}$ calcolati su tutti i periodi di acquisizione per $\theta = -90^\circ$, espressi in percentuale annua.

non confrontabili, come è stato già discusso.

L'andamento temporale della trasparenza, per le varie latitudini sui moduli ottici, sarà dunque ricostruito a partire dalle distribuzioni dei valori misurati della $\frac{\Delta T_{r asp}}{\Delta t}$, utilizzando come valore medio il risultato della media pesata dei valori ottenuti con le due diverse illuminazioni (1 LED o 2 LED), mentre area e forma della distribuzione saranno quelle ottenute quando la sorgente è costituita, ad esempio, da un solo LED.

A partire dai dati sperimentali, i valori utilizzati nella simulazione sono stati ottenuti facendo le operazioni che saranno spiegate qui di seguito.

I valori medi delle gaussiane, con le quali sono stati fatti i fit delle distribuzioni di $\frac{\Delta T_{r asp}}{\Delta t}$ ottenute nelle due condizioni di illuminazione, sono stati mediati tra loro e poi trattati usando la formula 3.4.

Considerando le varie “aree relative” come una misura della frequenza con cui un evento appartiene ad una o all'altra gaussiana, è possibile stabilire quali sono le probabilità che la trasparenza abbia un comportamento “regolare”, oppure caratterizzato da fluttuazioni comunque gaussiane, ma più grandi, relativamente ai singoli valori di θ .

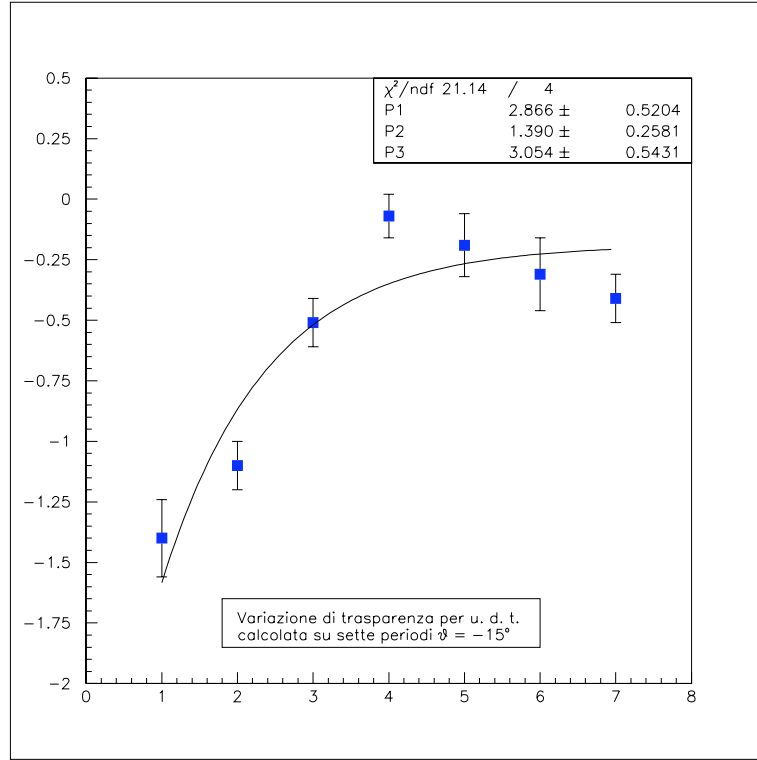


Figura 4.14: Andamento di $\frac{\Delta T_{trasp}}{\Delta t}$, calcolata con la formula 4.22, nei sette periodi in cui è stata suddivisa l'acquisizione, per $\theta = -15^\circ$: sull'andamento è stato fatto il fit con la funzione 4.25. Gli errori sistematici non sono indicati, ma sono riportati nelle tabelle 4.4, 4.5 e 4.6.

Data ad esempio l'area della seconda gaussiana della distribuzione di $\frac{\Delta T_{trasp}}{\Delta t}$ riferita a valori misurati si ha:

$$P_{irr}(MISURATA) = \frac{A_2(MISURATA)}{A_1(MISURATA) + A_2(MISURATA)} \quad (4.26)$$

dove P_{irr} indica la frequenza con cui un evento appartiene alla seconda gaussiana, quella che contiene gli eventi più "irregolari".

In ogni caso valgono le seguenti relazioni

$$P_{irr} = 1 - P_{reg} \quad (4.27)$$

$$P_{irr}(MISURATO) = P_{irr}(LED)P_{reg}(PIN) + P_{irr}(PIN)P_{reg}(LED) + .. \quad (4.28)$$

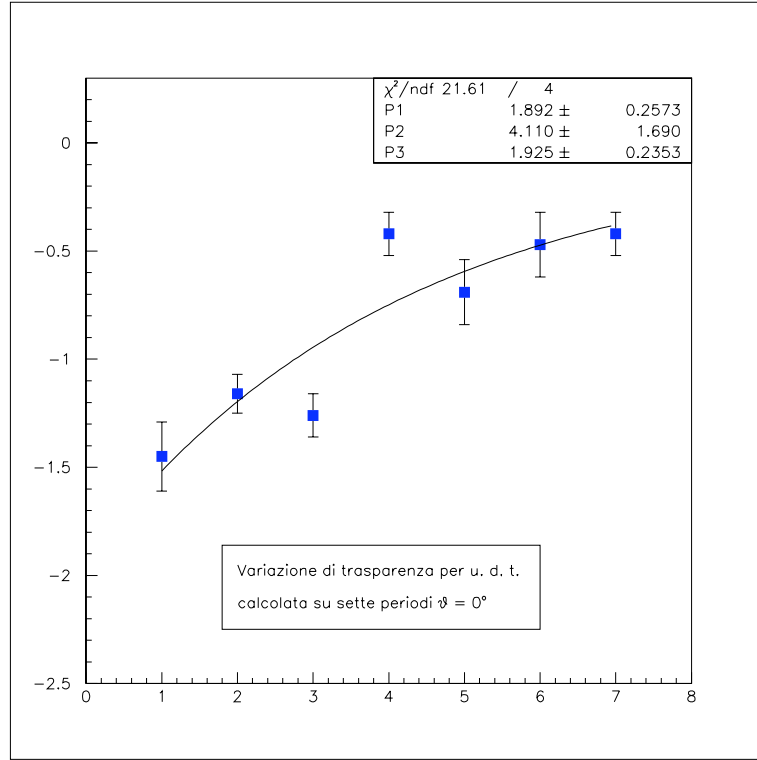


Figura 4.15: Andamento di $\frac{\Delta T_{trasp}}{\Delta t}$, calcolata con la formula 4.22, nei sette periodi in cui è stata suddivisa l'acquisizione, per $\theta = 0^\circ$: sull'andamento è stato fatto il fit con la funzione 4.25. Gli errori sistematici non sono indicati, ma sono riportati nelle tabelle 4.4, 4.5 e 4.6.

trascurando i termini al secondo ordine in P_{irr} e P_{reg} , si ha:

$$P_{irr}(MIS.) = P_{irr}(LED) (1 - P_{irr}(PIN)) + (1 - P_{irr}(LED)) P_{irr}(PIN) + \quad (4.29)$$

trascurando di nuovo tutti i termini al secondo ordine in P si ottiene:

$$P_{irr}(MIS.) = P_{irr}(PIN) + P_{irr}(LED) \quad (4.30)$$

Nelle configurazioni 5 e 6 si ha $P_{irr}(PIN) = P_{irr}(LED)$, per il fatto che LED e PIN sono a latitudini molto vicine, dunque $P_{irr}(PIN) = \frac{1}{2}P_{irr}(MISURATO)$.

Le larghezze delle distribuzioni per i vari valori di θ sono state calcolate a partire da quelle delle larghezze misurate, nel seguente modo:

$$\sigma_{MIS} = \sqrt{\sigma_{LED}^2 + \sigma_{PIN}^2} \quad (4.31)$$

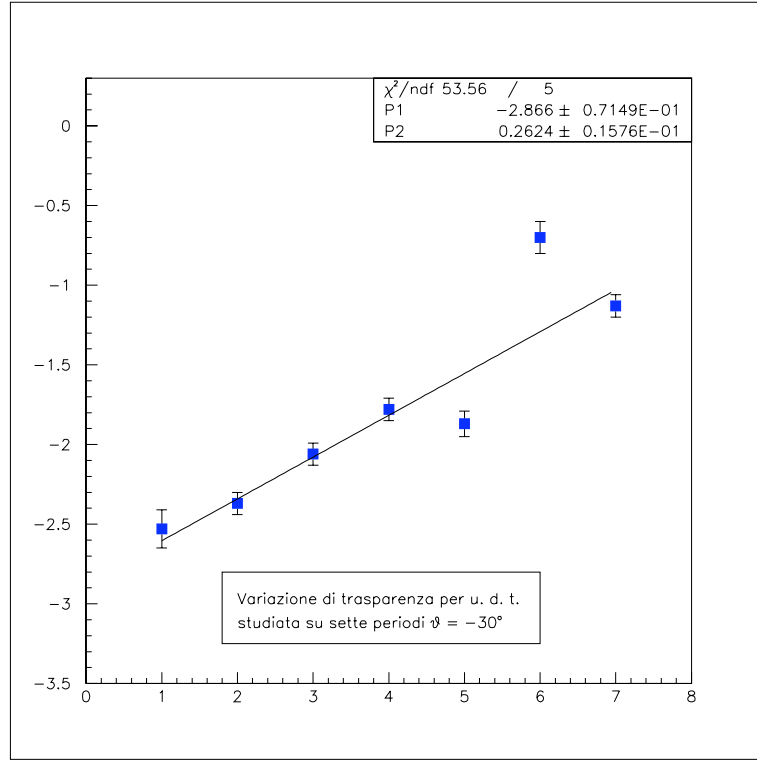


Figura 4.16: Andamento di $\frac{\Delta T_{trasp}}{\Delta t}$, calcolata con la formula 4.22, nei sette periodi in cui è stata suddivisa l'acquisizione, per $\theta = -30^\circ$: sull'andamento è stato fatto il fit con una retta. Gli errori sistematici non sono indicati, ma sono riportati nelle tabelle 4.4, 4.5 e 4.6.

I valori così ottenuti sono riportati nella tabella in figura 4.17. Inserendo tali valori all'interno della simulazione è stato possibile riprodurre l'andamento voluto, per varie latitudini.

Nella simulazione viene generata una variabile random, detta y , che serve ad assegnare all'evento una certa probabilità, a seconda che y sia maggiore o minore alla grandezza a_2 , che sta ad indicare la probabilità massima con cui un evento appartiene alla gaussiana che contiene le fluttuazioni maggiori e meno frequenti. Una seconda variabile random, a , viene generata per attribuire delle fluttuazioni casuali all'andamento della trasparenza, con la seguente funzione:

$$\frac{\Delta T_{trasp}(t)}{\Delta t} = \begin{cases} \bar{x}_{g1} + a \cdot \sigma_{g1} & \text{se } y > a_2 \\ \bar{x}_{g2} + a \cdot \sigma_{g2} & \text{se } y \leq a_2 \end{cases} \quad (4.32)$$

θ	$\frac{A_1}{A_{TOT}}$	$\mu_1 \pm \text{err. stat.}$	σ_1	$\frac{A_2}{A_{TOT}}$	$\mu_2 \pm \text{err. stat.}$	σ_2
-90°		$(-5,9 \pm 7,0) \cdot 10^{-6}$				
-30°	0,96	$(-2,326 \pm 0,042) \cdot 10^{-5}$	$4,93 \cdot 10^{-5}$	0,04	$(-2,87 \pm 0,65) \cdot 10^{-5}$	$5,94 \cdot 10^{-4}$
-15°	0,99	$(-8,274 \pm 0,061) \cdot 10^{-6}$	$4,33 \cdot 10^{-5}$	0,01	$(1,20 \pm 0,55) \cdot 10^{-5}$	$9,17 \cdot 10^{-6}$
0°	0,98	$(-1,039 \pm 0,097) \cdot 10^{-5}$	$4,63 \cdot 10^{-5}$	0,02	$(-3,89 \pm 0,75) \cdot 10^{-6}$	$4,89 \cdot 10^{-5}$
60°	0,86	$(-2,55 \pm 0,21) \cdot 10^{-5}$	$3,47 \cdot 10^{-4}$	0,14	$(-2,72 \pm 0,34) \cdot 10^{-4}$	$5,74 \cdot 10^{-4}$
70°	0,79	$(-0,94 \pm 0,84) \cdot 10^{-5}$	$8,53 \cdot 10^{-5}$	0,21	$(-3,45 \pm 0,41) \cdot 10^{-4}$	$3,02 \cdot 10^{-4}$

Figura 4.17: Aree, valori medi e larghezze delle gaussiane con le quali sono state calcolate la variazioni di trasparenza su tutto il periodo di acquisizione, per diversi angoli di zenith.

e quindi

$$Trasp(t) = Trasp(0) + \int_0^t \frac{\Delta Trasp(t)}{\Delta t} dt \quad (4.33)$$

L'evoluzione temporale di $\frac{\Delta Trasp(t)}{\Delta t}$ per $\theta = -15^\circ$ e 0° è stata parametrizzata con un andamento esponenziale, mentre per $\theta = -30^\circ$ è stata parametrizzata con un andamento lineare.

Questi andamenti sono stati utilizzati per simulare la trasparenza dei moduli ottici alle corrispondenti latitudini, per quegli eventi che mostrano un comportamento “regolare”, appartengono cioè al caso in cui $y > a_2$.

Gli andamenti riprodotti si adattano bene ai valori ottenuti sperimentalmente, per gli angoli vicini all'equatore, che mostrano poche fluttuazioni.

Nel caso degli angoli più distanti dall'equatore, la simulazione riesce a riprodurre il valore medio di $Trasp(t)$, ma non è in grado di descrivere esattamente l'andamento temporale della trasparenza e in particolare delle grandi fluttuazioni che si verificano nella prima parte dell'acquisizione, essendo la grandezza $Trasp(t)$ simulata a partire da valori mediati su tutto il periodo di acquisizione.

Tale simulazione si adatta dunque abbastanza bene a descrivere l'andamento della trasparenza su tempi lunghi, poiché considera solo le fluttuazioni medie e non le fluttuazioni brevi che, se pur importanti per stimare la variazione dell'efficienza, non hanno grande rilevanza su scale temporali dell'ordine di anni.

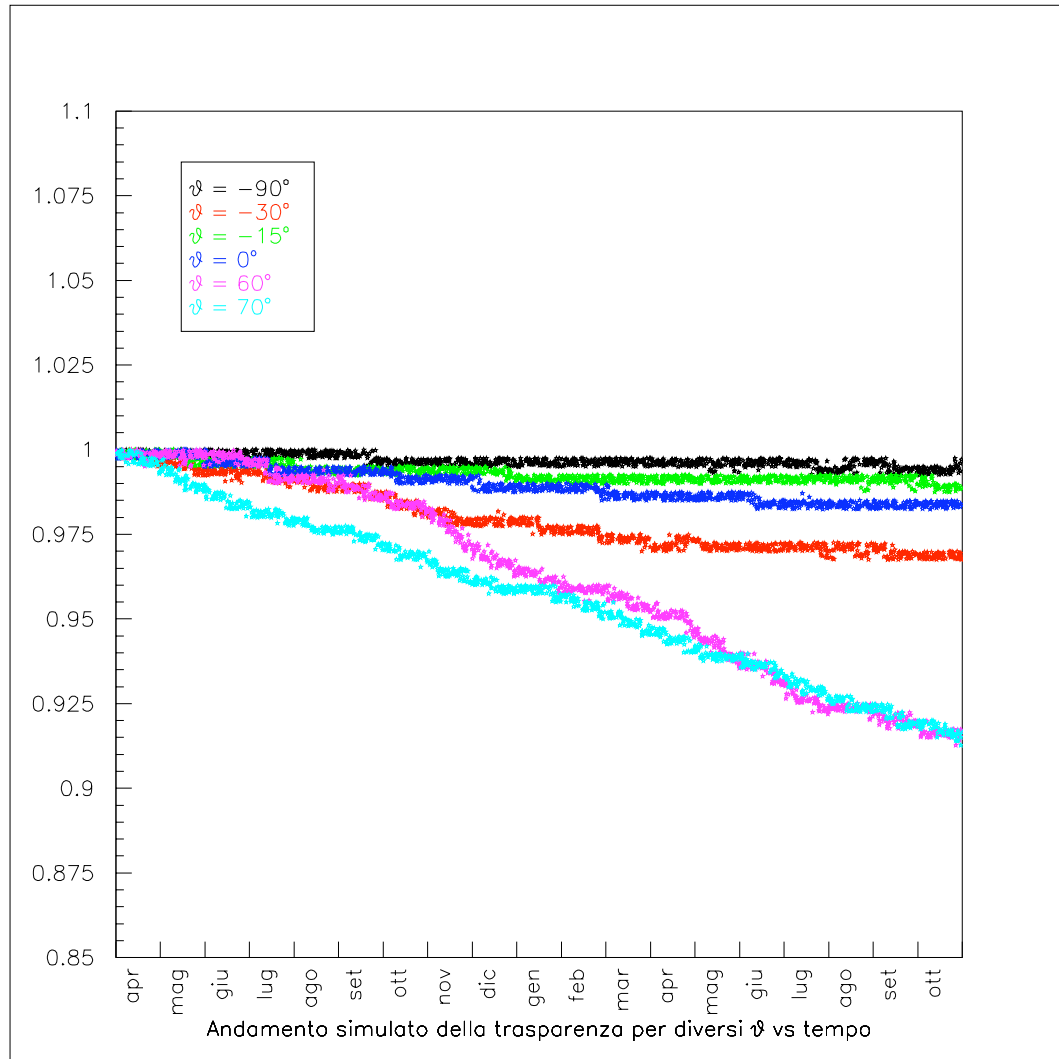


Figura 4.18: Andamento simulato della trasparenza, per varie latitudini sul modulo ottico.