

Relazione Progetto STAR

Partecipanti all'Unità INAF

L'unità INAF che partecipa al progetto STAR è composta da membri di staff dell'Osservatorio di Arcetri (Piero Salinari, Luciano Miglietta, Piero Ranfagni) e da due Assegniste di Ricerca (Giovanna Benvenuti, Laura Magrini).

Introduzione

Durante questa prima fase del progetto STAR l'unità INAF si è dedicata allo studio degli specchi che verranno utilizzati per la realizzazione del concentratore solare. Di seguito sono descritte le attività svolte principalmente da Ranfagni, Benvenuti e Magrini; seguirà relazione del lavoro di Salinari e Miglietta.

Il principale scopo di questa fase è stato di valutare la disponibilità e le possibilità offerte dal mercato in fatto di specchi che potessero soddisfare le caratteristiche tecniche richieste ed inoltre l'error-budget del progetto STAR.

Il nostro lavoro ha analizzato:

1. le varie possibilità presenti sul mercato per quanto riguarda la scelta degli specchi, considerando specchi creati con metodo di stiramento e con metodo float, ed i vari tipi di argentatura (a bagno, a spruzzo, a pennello);
2. la scelta del materiale di supporto per gli specchi;
3. i vari tipi di colla e i vari sistemi di incollaggio.

Inoltre abbiamo eseguito test di qualità sugli specchi, sia prima che dopo l'incollaggio:

1. Test di rugosità
2. Test di planarità

Infine abbiamo messo a punto un software da utilizzare per il sistema di puntamento che ci consente di ottenere la posizione del sole con la precisione richiesta dall'error-budget del progetto.

Nelle prossime sezioni verranno analizzati in dettaglio i singoli punti trattati. In Sezione 1 verrà descritta la scelta degli specchi, in Sezione 2 sono indicati i vari tipi di colla e i metodi di incollaggio, mentre in Sezione 3 si tratteranno i materiali di supporto degli specchi. Nelle sezioni successive, Sez. 4 e 5, sono descritti i test eseguiti sugli specchi: test di rugosità e test di planarità. Infine in Sez. 6 è descritto il software per il sistema di puntamento, ed in Sez.7 la valutazione dei costi e benefici. Le nostre conclusioni ed i principali risultati ottenuti sono descritti in Sez.8.

1. Scelta specchi

Per ottenere rendimenti tecnico-qualitativi elevati, si utilizzano specchi di spessore ultrasottile (0,85 - 0,87 mm) riducendo al massimo la possibilità di assorbimento.

VETRI ULTRASOTTILI	
Dimensioni	
Float (spessore mm)	Misure (cm)
0,85	60 x 160
1	60 x 160

Lo specchio in esame si ottiene a seguito del trattamento di argentatura del vetro: consiste cioè, nella formazione di un sottile strato d'argento sulla superficie di una lastra di vetro dalle caratteristiche in

tabella, immersa in una soluzione di nitrato d'argento, successivamente alla ramatura galvanica per la protezione dello strato d'argento e applicazione di una vernice protettiva, a base di una miscela di resine alchidiche-melamminiche, può essere di due tipi: termoindurente con pigmenti di piombo o senza.

2. Scelta del tipo di colla e tecnica delle modalità di incollaggio

Per la realizzazione dello specchio primario (su schiuma di vetro) e , nel caso, del secondario (su lastra di alluminio) sono state effettuate prove con varie tipologie di colle bicomponenti.

Rendere maggiormente uniforme la distribuzione della colla, qualunque essa sia, significa ridurre le imperfezioni di planarità dello specchio e perciò si è proceduto con vari metodi.

- 1) **ARALDITE 2010** (Resina bicomponente)epossidica semi-trasparente con viscosità (25°) di circa 150 mPa-s, peso specifico di 1,10 kg/l, tempo di lavorabilità $\approx$ 10 ore. I due componenti devono essere miscelati con una proporzione 50:50.

La colla è stata distribuita uniformemente (spessore di circa 1 mm) con una spatola dentellata sia su una lastra di schiuma di vetro che una lastra di Al spessa 6 mm entrambe di dimensione coincidente con gli specchi (10X15 cm); vi è stato sovrapposto lo specchio dal lato argentato e infine, per una corretta essiccazione, è stato applicato un peso di 3 kg e su una piastra di vetro (0,85 mm) e gommapiuma (circa 4 cm) per uniformare la distribuzione del peso.

Questa tecnica però ha portato ad un risultato non troppo positivo in quanto, a seguito di una semplice prova di riflessione del sole negli specchi, in entrambi i casi, si notano qualitativamente delle anomalie. Di seguito si riportano i risultati fotografici.

2) EPO 150 (EX EPO-INJ) Resina epossidica pura per iniezioni: è un prodotto a base di resine epossidiche molto fluide reticolabili a freddo mediante un indurente a base di ammine cicloalifatiche. Caratteristiche: trasparente con viscosità (25°) di circa 500 - 800 mPa-s, peso specifico di 1,04 kg/l, tempo di lavorabilità $\approx$ 30 - 50 min e con buone caratteristiche di resistenza a trazione, flessione e compressione. I due componenti devono essere miscelati con una proporzione 100:25; polimerizza senza ritiro e, ad indurimento avvenuto, è impermeabile all'acqua.

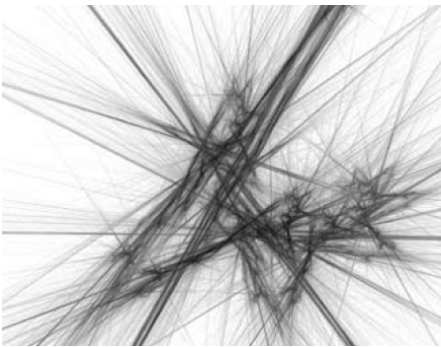
Questo tipo di colla, grazie alla caratteristica di essere estremamente fluida, ha permesso di eseguire in vari modi la sua applicazione, utilizzando sempre entrambi i tipi di supporto (schiuma di vetro o alluminio); di seguito si descrivono tra i metodi quelli che hanno prodotto risultati migliori.

A. La colla è stata disposta sullo specchio lato argentato col metodo "goccia a goccia" e successivamente vi è stato posto il supporto.

B. La colla è stata disposta sul materiale di supporto dello specchio con un pennello a modo di rendere uniforme lo strato (tecnica valida soprattutto nel caso di utilizzo della schiuma di vetro, poichè si sono ben riempite le cavità)

C. Sfruttando la gravità e l'alto valore di fluidità si sono distribuite tre macro gocce sullo specchio lato argentato, si è aspettato qualche minuto dandogli il modo di distribuirsi uniformemente e vi abbiamo applicato il supporto.

3) La ditta RONDA, fornitrice per ENEL degli specchi del progetto Archimede, ha proposto l'utilizzo di un'ulteriore tipo di colla monocomponente superfluida. Sarà nostro impegno testare, non appena possibile, la validità della tecnica di incollaggio proposta dalla ditta Ronda. Tale ditta ha proposto di utilizzare un adesivo strutturale per l'accoppiamento dello specchio sottile al pannello di supporto. Questo adesivo polimerizza senza creare tensione tra specchio e pannello, caratteristica principale richiesta.



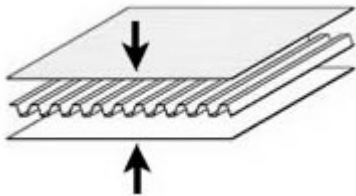
3. Scelta dei materiali di supporto specchio primario e secondario

Di seguito si riportano le proposte di materiali per la realizzazione del supporto allo specchio primario.

- Inizialmente il materiale prescelto per il supporto degli specchi era la schiuma di vetro poiché, come si vede dalla Tabella, ha circa lo stesso coefficiente termico del vetro dello specchio ed inoltre ha un buon coefficiente di resistenza.



- Le alternative proposte sono state:
 - un supporto in alluminio/acciaio di tipo Doluflex cioè una lamiera grecata ottenuta in linea con un sistema di formatura a freddo



Densità	~120 kg/m ³
Conduttività termica λ_D (EN ISO 10456)	0,040 W/mK
Resistenza alla compressione Resistenza alla compressione media a zona di fiducia 95%	0,63–0,66 N/mm ²
Fractile 7,5% a livello di fiducia 95% (valore che ha 7,5% di probabilità di non essere raggiunto)	0,45 N/mm ²
Fractile 2,5% a livello di fiducia 95% (valore che ha 2,5% di probabilità di non essere raggiunto)	0,37 N/mm ²
costrizione di compressione ammissibile sotto carico nominale	
– nel caso di elementi portanti ¹⁾	0,21 N/mm ²
– nel caso di collocazione sotto soletta di ripartizione ²⁾	0,25 N/mm ²
Coefficiente di dilatazione lineare	$9 \times 10^{-4}/K$
Calore specifico	0,84 kJ/kgK
Diffusività termica	$4,2 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{sec.}$
Modulo di elasticità (si riferisce alla costrizione di compressione)	75 N/mm ² nel bitume caldo senza manti impermeabili bituminosi
Campi di applicazione	FOAMGLAS® Tetti e terrazze compatte Isolamento di pavimenti Muri Soffitti

Descrizione delle resistenze alla compressione (σ_{zul} , [N/m²])
¹⁾ quale parte della struttura portante, sotto la fondazione
²⁾ sotto la soletta flottante e la soletta di ripartizione, gli eventuali aumenti per effetti dinamici essendo inclusi

Tabella 1 Dati tecnici della schiuma di vetro

- Pannelli in Honeycomb: pannelli la cui forma geometrica è quella tipica del nido d'ape formato da celle esagonali, realizzati con alluminio Al 3003.

Descrizione	Pannello in nido d'ape di alluminio con finitura in vetroresina
Dimensioni standard	3100 x 1200mm
Spessori	6 – 8 – 10 – 12 – 15 – 20 – 25mm
Peso medio	2,5 kg/m ² per lo spessore 15mm
Dimensione cella	6,35mm 9,52mm 12,70mm 19,05mm
Densità	80kg/m ³ per cella da 6,35mm; 53kg/m ³ per cella da 9,52mm; 40kg/m ³ per cella da 12,70mm; 26,5kg/m ³ per cella da 19,05mm.
Resistenza a flessione	Catas 4978/5 Mpa medio 24,8
Resistenza agli sbalzi di temperatura	UNI 9429/89 8 e 15 cicli senza difetti
Reazione al fuoco	DM 26.06.1984 – UNI 9176/87, classe 1
Resistenza alla fiamma	CSE RF 2/75/A, categoria 1
Pannello radiante	CSE RF 3/77, categoria 1
Resistenza alla compressione	ASTM D 297-298, carico massimo medio 5287N, resistenza media 0,77 N/mm ²
Resistenza alle condizioni atmosferiche	ASTM G 26/83. La scala di valutazione per le seguenti proprietà va da 0 per "ottimo" a 5 per "scarso". Rigonfiamento – ISO 4628-2 0 Micro-rotture – ISO 4628-4 0 Rottura a scaglie – ISO 4628-5 0 Sforinamento – ISO 4628-6 0

Entrambe le soluzioni sono state considerate in dettaglio ma non si sono rivelate del tutto adeguate per la loro caratteristica di rigidità che non permette di piegare e lavorare la struttura finale specchio+supporto.

- Infine è stata considerata la possibilità offerta dalla ditta Ronda High-Tech, che propone un pannello già composto realizzato con uno stampo personalizzabile. Il materiale utilizzato per realizzare il pannello di supporto è una formulazione speciale di preimpregnato termoindurente SMC low-profile, a ritiro zero. Il raggiungimento di valori di CTE prossimi a quelli del vetro è fondamentale sia per non tensionare il vetro stesso fino a valori prossimi o superiori a quelli di rottura durante le escursioni termiche cui è sottoposto durante l'esercizio, sia per prevenire fenomeni di distacco del vetro dal supporto (delaminazione), sia infine per garantire una stabilità di forma adeguata al variare della temperatura ambiente. A questo proposito la Ronda ha sottoposto il pannello a prove in camera climatica per la verifica della compatibilità con le temperature di esercizio attraverso cicli di temperatura su di un range più ampio di quello operativo previsto (-10, +60) senza riportare danneggiamenti o deformazioni permanenti.

4. Test di rugosità

Il procedimento di misura della rugosità consiste nella registrazione del profilo della superficie ottenuto lungo una determinata linea di misura; tale profilo viene poi analizzato definendo un parametro numerico che costituisce la misura della rugosità. Parte fondamentale del processo di calcolo dei vari parametri di rugosità è l'operazione di filtraggio che consente di ottenere una misura della sola qualità della superficie, depurata dagli effetti che gli errori di geometria del pezzo hanno sul profilo misurato.

La misura della rugosità **Ra**, espressa in micron, è il valore medio aritmetico degli scostamenti del profilo reale della superficie



rispetto alla linea media. Il valore Ra non è però sufficiente per definire completamente le caratteristiche morfologiche della superficie, in quanto profili dagli andamenti differenti dallo stesso scostamento medio aritmetico presenteranno lo stesso valore di Ra; per tale motivo si sono valutati ulteriori parametri, come **Rq**, media quadratica degli scostamenti dei punti del profilo dalla linea media.

Per misurare e valutare le microirregolarità degli specchi in esame si è utilizzato il rugosimetro mod. TR200 che è uno strumento in grado di misurare con una precisione del millesimo di micron.

Tale strumento è composto dalle seguenti parti:

- Tastatore che è la parte a diretto contatto con la superficie da misurare e interpreta le variazioni di altezza misurate lungo l'asse di acquisizione come variazioni di tensione e posizione del raggio riflesso sulla superficie da tastare.
- Unità elettronica che gestisce la movimentazione dell'unità di traslazione e il trattamento dei dati rilevati tramite il tastatore.
- Unità di traslazione (traslatore) che è un'unità motorizzata fissata tramite apposito supporto al **tastatore** che provvede a muovere quest'ultimo lungo l'asse di misura orizzontale per poter acquisire i dati della superficie.

PRECISAZIONI TECNICHE

Parametri di misurazione del tester	Parametri calcolati: Ra - Rz - Ry- Rq - Rp - Rm - Rt - R3z - Rmax - Sk - S - Sm - tp
Campi di misurazione	Ra, Rq: 0,005 ... 16,00 μm Rz, Rt: 0,020 ... 160,0 μm
Risoluzione	0,001 μm fino al valore di misura di 10 μm 0,01 μm fino al valore di misura di 100 μm 0,1 μm per un valore di misura superiore a 100 μm
Precisione	classe 2 secondo la normativa DIN 4772 ($> \pm 10\%$)
Unità	μm / μinch (selezionabile)
Display	LCD, altezza delle cifre di 10 mm con illuminazione dello sfondo
Lunghezza delle onde limite (3) (cutt-off length)	0,25 mm; 0,8 mm e 2,5 mm con avviso automat. se si seleziona una lunghezza d'onda erranea
Velocità di palpazione	0,135 mm/s con una lunghezza d'onda limite: 0,25 mm 0,5 mm/s con una lunghezza d'onda limite: 0,8 mm 1 mm/s con una lunghezza d'onda limite: 2,5 mm Velocità di retrocesso 1 mm/s
Filtro digitale	RC: filtro a 2 stadi differenti PC-RC: metodo RC e correzione della fase GAUSS D-P: profilo non filtrato (algor. dei minimi quadrati)

Sono state effettuate prove su 12 campioni di specchio sottile (0.85 mm), fornito dalla ditta FastGlass s.r.l. di Longoni B. in varie condizioni, di seguito si riporta in breve i risultati ottenuti dei parametri più significativi:

CAMPIONE 1 = prova su specchio semplice - Filtro RC - tastatore posizionato al centro

CAMPIONE 2 = specchio incollato su schiuma di vetro - tastatore posizionato al centro

CAMPIONE 3= specchio incollato su schiuma di vetro - tastatore posizionato su lato corto (filobordo)

CAMPIONE 4 = specchio incollato su schiuma di vetro sorretto manualmente

CAMPIONE 5 = specchio incollato su lastra di Al - tastatore posizionato su lato corto (filobordo)

CAMPIONE 6 = specchio incollato su lastra di Al - tastatore posizionato su lato lungo (filobordo)

CAMPIONE 7 = prova su specchio semplice - tastatore posizionato lungo il lato corto

CAMPIONE 8 = specchio incollato su lastra di Al - Filtro GAUSS

CAMPIONE 9 = specchio incollato su lastra di Al - tastatore posizionato al centro

CAMPIONE 10 = specchio incollato su schiuma di vetro - tastatore posizionato al centro - Filtro GAUSS

CAMPIONE 11 = specchio incollato su schiuma di vetro - tastatore posizionato al bordo - Filtro GAUSS

CAMPIONE 12 = prova su specchio semplice - tastatore al centro - Filtro GAUSS

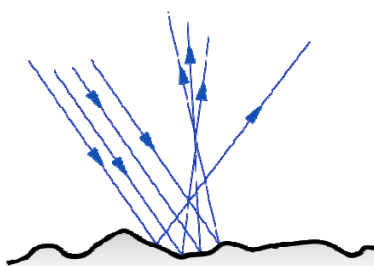
		CAMPIONI					
PARAMETRI		1	2	3	4	5	6
μm	Ra deviazione aritmetica	0.001	0.005	0.002	0.018	0.001	0.002
	Rq scost. quadratico medio	0.004	0.010	0.004	0.024	0.003	0.003
	Rz media dei 5 valori max e min	0.000	0.006	0.002	0.004	0.008	0.003
	Ry max dist. tra picco e valle	0.20	0.04	0.027	0.122	0.0024	0.15
	Rt max lungo x tra picco e valle	0.029	0.119	0.004	0.2	0.0029	0.23
mm	S spaziatura media tra i picchi (dal vertice)	0.0069	0.002	0.0266	0.11	0.003	0.14
	Sm spaziatura media tra i picchi (media)	0.625	2	1.3	2.8	0.4	0.5
	Sk asimmetria del profilo	2.774	3.08	2.027	1.066	2.54	1.8

		CAMPIONI					
PARAMETRI		7	8	9	10	11	12
μm	Ra deviazione aritmetica	0.005	0.007	0.001	0.005	0.007	0.004
	Rq scost. quadratico medio	0.001	0.005	0.004	0.010	0.034	0.007
	Rz media dei 5 valori max e min	0.002	0.004	0.006	0.006	0.002	0.004
	Ry max dist. tra picco e valle	0.20	0.04	0.874	0.089	0.051	0.013
	Rt max lungo x tra picco e valle	0.029	0.119	0.069	0.004	0.026	0.037
mm	S spaziatura media tra i picchi (dal vertice)	0.002	0.007	0.003	0.14	0.06	0.08
	Sm spaziatura media tra i picchi (media)	0.04	0.095	0.4	0.5	0.23	0.09
	Sk asimmetria del profilo	2	1.047		1.98	2.74	2.06

Tutti i campioni di specchio prodotto con vetro float si sono quindi rivelati adeguati per quanto riguarda la microrugosità superficiale, indipendentemente dai processi di incollaggio e dalla tecnica di misurazione.

5. Test di planarità dei singoli specchi

In uno specchio piano un fascio di raggi luminosi paralleli viene deviato, ma si mantiene il parallelismo dei raggi; ciascun raggio che colpisce lo specchio viene riflesso di un angolo che è identico a quello di incidenza.



Per verificare questo fenomeno, e quindi la planarità degli specchi, si è eseguita una prova simile al Test di Hartmann con qualche variazione.

La strumentazione utilizzata è stata disposta su un tavolo ottico e risulta costituita, in successione, da:

- da una sorgente di luce posta a 90° rispetto all'asse ottico;
- da un reticolo di fori di circa 1 - 1.5 mm ottenuti da un cartone nero che ricopre interamente la fonte luminosa ad una distanza tra loro irregolare ma mediamente di circa 0.5 - 1.5 cm disposti in maniera casuale;
- da un sistema camera Reflex con relativo zoom fotografico (formato di output: RAW¹);
- da un sistema di ancoraggio meccanico per lo specchio e cavalletto di sostegno per la camera fotografica.

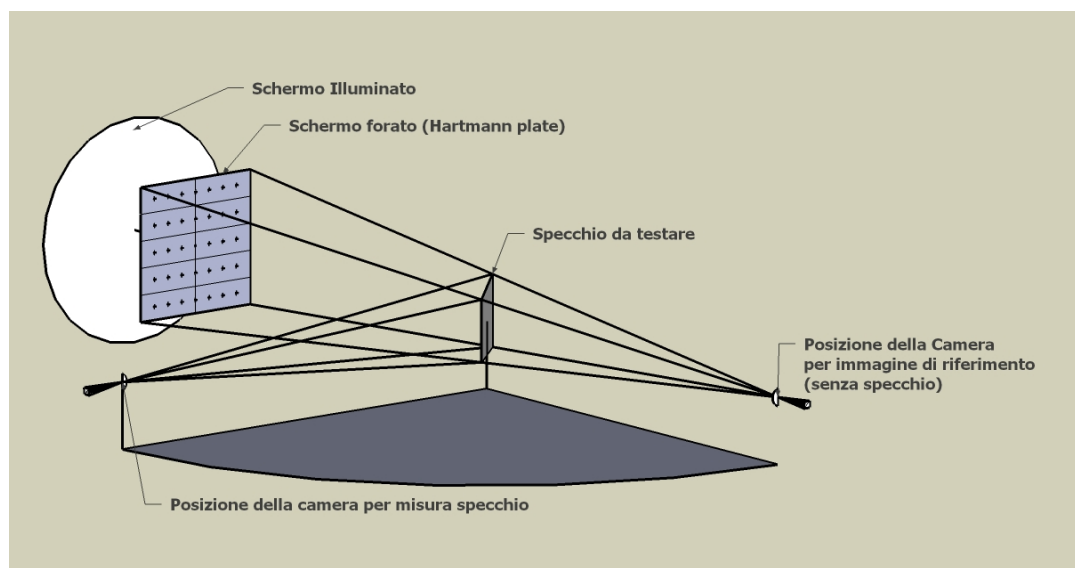


Figura 1 Configurazione ottica per il test di planarità degli specchi

¹ Il formato .RAW, che significa grezzo, non ancora lavorato, fa riferimento all'immagine non ancora elaborata proveniente direttamente dal sensore della macchina digitale memorizzando direttamente i dati provenienti dal sensore nella scheda di memoria oltre che garantire una definizione del colore superiore perchè i dati sono memorizzati a 16 bit contro gli 8 bit del formato jpg.

L'ambiente software scelto per analizzare le immagini ottenute dalle prove è IRAF Image Reduction and Analysis Facility poichè è uno dei migliori package per effettuare l'elaborazione fotometrica di immagini ed in particolare di campi stellari; in realtà l'immagine che si ottiene fotografando lo schermo forato (Hartmann plate) può tecnicamente assomigliarvi e quindi facilmente essere paragonato ad essi.

Di seguito si riportano alcune delle immagini ottenute del campo di riferimento e di quelle riflesse dallo specchio

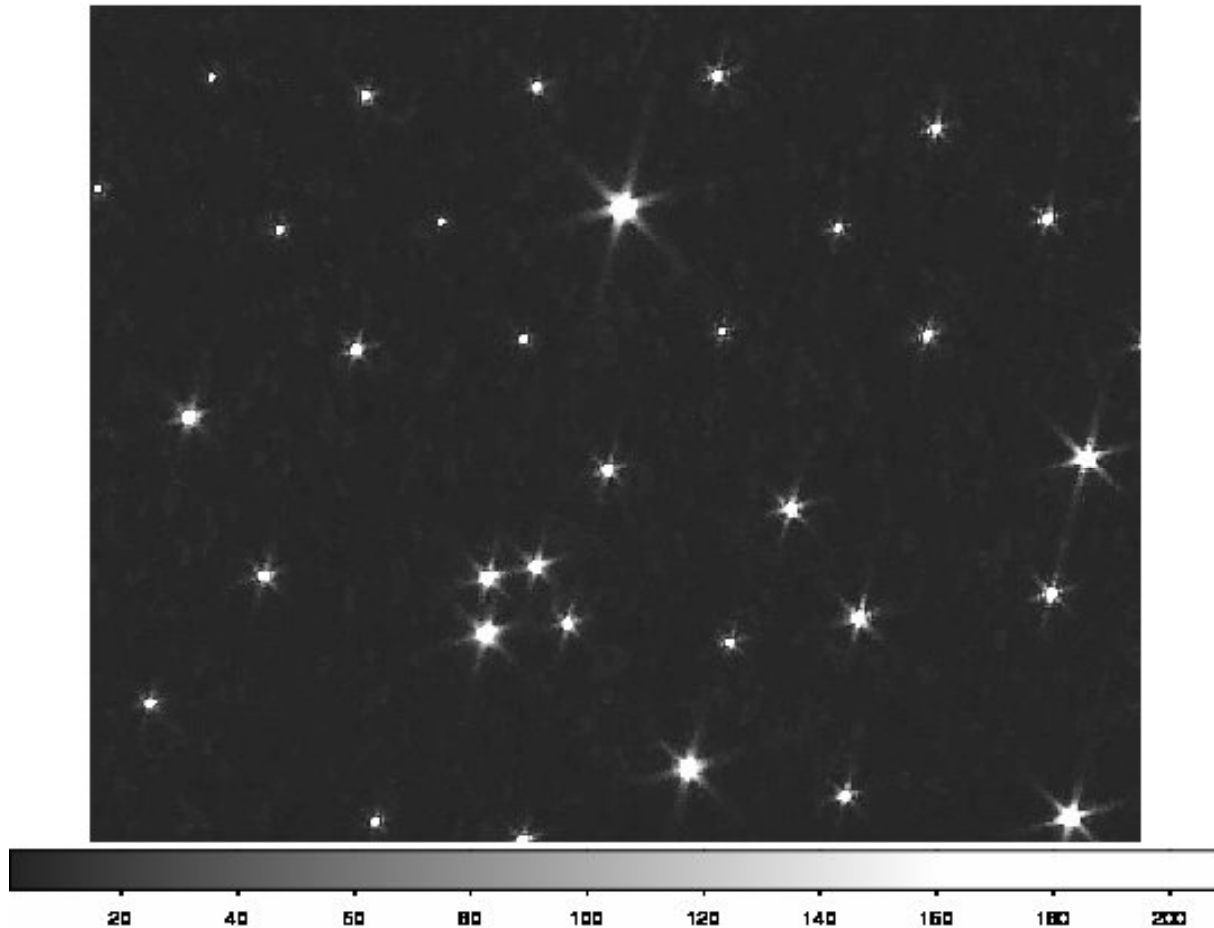


Figura 2: Immagine diretta del campo di riferimento

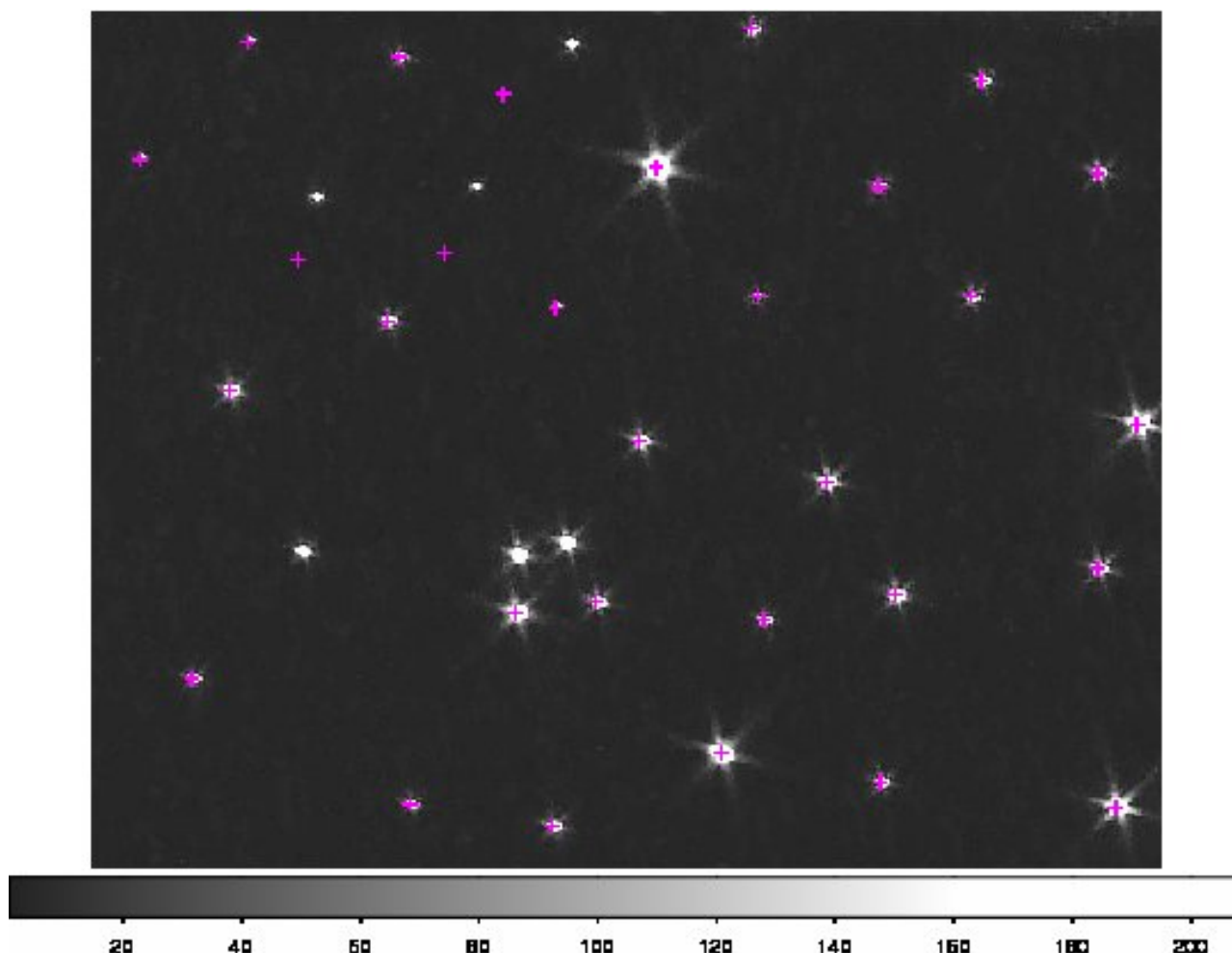


Figura 3: Immagine del campo di riferimento riflessa dalla specchio in analisi. Im magenta sono evidenziati i punti luminositi del campo di riferimento identificati dopo l’inserimento dello specchio.

Le immagini del campo di riferimento ottenute con la camera fotografica, con e senza riflessione sulla specchio, sono state trattate con il software di analisi astronomica IRAF. Per essere analizzate con IRAF sono state convertite nel formato fits.

In particolare abbiamo utilizzato i tools dedicati alla fotometria (digiphot), identificando i punti luminosi in entrambe le immagini come se fossero stelle.

La prima identificazione dei punti luminosi nell’immagine di riferimento e’ stata fatta mediante la task DAOFIND che permettere di individuare automaticamente sorgenti in un’immagine. Il file contenente le coordinate dei punti luminosi di riferimento e’ stato utilizzato per identificare gli stessi nell’immagine di riflessione, preventivamente invertita lungo l’asse Y. I punti luminosi nell’immagine di riflessione sono stati individuati con la task PHOT (si veda Figura).

Abbiamo poi calcolato mediante la task GEOMAP la funzione di trasformazione da un sistema di coordinate all'altro individuando così eventuali non linearità nella riflessione dello specchio.

Effetti geometrici quali rotazioni, traslazioni ed ingrandimenti sono stati considerati separatamente perché non dovuti alla riflessione sullo specchio ma al posizionamento della camera fotografica nelle due configurazioni, con e senza specchio.

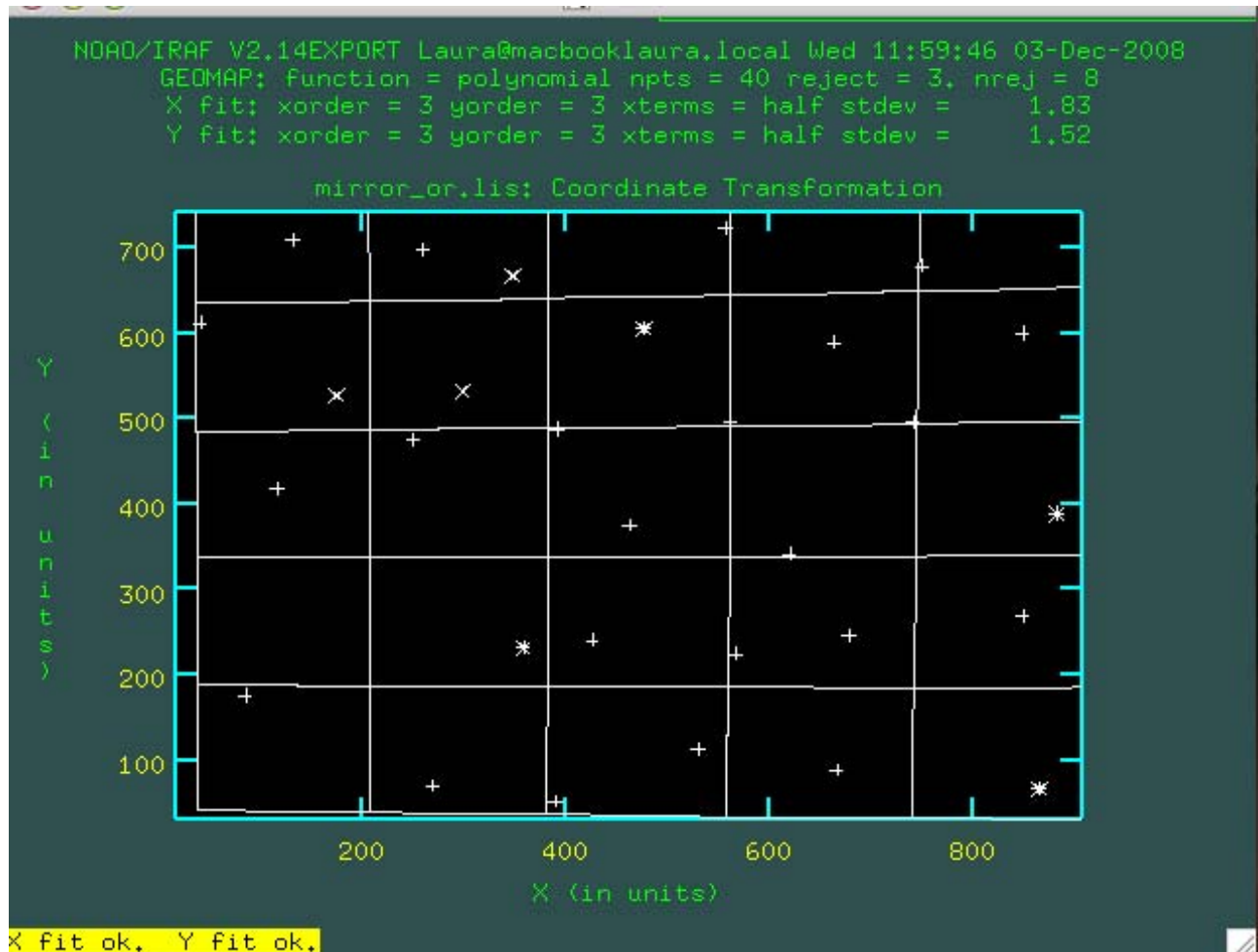


Figure 4: Analisi della funzione di trasformazione tra le coordinate nel sistema di riferimento con e senza lo specchio.

Le coordinate dell'immagine riflessa vengono trasformate nelle coordinate dell'immagine di riferimento mediante due funzioni, f e g , la prima per le coordinate x e la seconda per le y , entrambe composte da una serie di polinomi.

Nel nostro caso abbiamo utilizzato polinomi di ordine massimo due.

Le funzioni di trasformazione possono essere espresse dalle seguenti relazioni, in cui le coordinate dell'immagine riflessa dallo specchio (x_{in} e y_{in}) vengono trasformate nelle coordinate dell'immagine originale (x_{ref} e y_{ref}):

Eq. 1) $x_{in} = a_{11} + a_{21} * x_{ref} + a_{12} * y_{ref} + a_{31} * x_{ref} ** 2 + a_{22} * x_{ref} * y_{ref} + a_{13} * y_{ref} ** 2$

Eq. 2) $y_{in} = a_{11}' + a_{21}' * x_{ref} + a_{12}' * y_{ref} + a_{31}' * x_{ref} ** 2 + a_{22}' * x_{ref} * y_{ref} + a_{13}' * y_{ref} ** 2$

Esempio di risultato ottenuto per la funzione di trasformazione:

Coordinate mapping status

Xin and Yin fit rms: 1.256477 0.8947578

Coordinate mapping parameters

Mean Xref and Yref: 472.7473 348.1491

Mean Xin and Yin: 492.6192 379.7028

X and Y shift: 24.87345 30.13312 (xin yin)

X and Y scale: 0.9927479 1.014245 (xin / xref yin / yref)

X and Y axis rotation: 359.61896 0.32719 (degrees degrees)

I coefficienti di relazioni vengono dati dal programma GEOMAP. Per uno specchio essenzialmente piano ci si aspetta che i coefficienti dei termini di ordine superiore siano trascurabili. Un'analisi dettagliata di alcuni campioni di specchi e' attualmente in corso.

Esempio di coefficienti polinomiali ottenuti per il fit:

X fit		Yfit	
a11	15.43727	a11'	10.61837
a21	-0.07368	a21'	-0.0236
a31	7.13E-05	a31'	5.15E-06
a12	-0.01524	a12'	-0.03016
a22	2.36E-05	a22'	5.42E-05
a13	4.51E-06	a13'	6.66E-06

I termini di secondo grado sono a31, a22 e a13 e sono dell'ordine di 10-5-10-6, mentre i termini di primo grado a12 e a21 sono dell'ordine di 10-2. Considerando la dimensione in pixel dell'immagine riflessa (900 x 750) abbiamo che la massima variazione della funzione di trasformazione dall'immagine di riferimento a quella riflessa per i termini di primo e secondo ordine è di circa 1.5 pixel lungo l'asse x e di circa 0.6 pixel lungo l'asse y. Quindi l'immagine riflessa è variata rispetto all'immagine di riferimento per termini non lineari di circa lo 0.2% lungo x e di 0.1% lungo y. Lo specchio in analisi può essere considerato quindi piano

6. Il sistema di puntamento degli specchi

Per progettare e realizzare il sistema di puntamento degli specchi è necessario conoscere con un'ottima accuratezza la posizione del sole durante l'anno in funzione sia della latitudine e longitudine del luogo, sia dei parametri atmosferici, come temperatura e pressione atmosferica. Nell'ambito dell'error-budget del progetto STAR accuratezze del secondo d'arco sono più che sufficienti. Abbiamo comunque deciso di costruire le tabelle di posizione solare utilizzando un algoritmo di posizione solare che fornisce un'accuratezza di $0.003''$ perché contiene tutti i termini astronomici e di fisica dell'atmosfera necessari.

In particolare il sistema di specchi in corso di progettazione lavorerà anche nella prima ed ultima ora della giornata, al contrario dei concentratori solari attualmente in uso. Quindi una speciale cura è stata posta nell'analisi della rifrazione atmosferica, e delle variazioni dei parametri atmosferici e meteorologici per l'isola di Pianosa, forniti dall'Unità Ibimet partecipante al progetto STAR, che affetta principalmente la posizione solare all'orizzonte.

Il codice utilizzato per la realizzazione delle look-up tables è stato scritto in linguaggio di programmazione PERL per la sua versatilità e portabilità nei vari tipi di macchine e di sistemi operativi. Una messa a punto finale del codice e delle tabelle verrà fatto in seguito al momento della completa definizione delle specifiche del sistema di puntamento.

6.1 L'algoritmo per la posizione solare: SPA.C

Uno dei migliori algoritmi scritti a questo scopo è quello sviluppato dal National Renewable Energy Laboratory (NREL).

Il Solar Position Algorithm (SPA) permette di calcolare gli angoli di zenith e di azimuth con incertezze dell'ordine di $0.0003''$ in un lungo periodo temporale, dal anno 2000 all'anno 6000. La procedura su cui si basa è stata sviluppata inizialmente da Bretagnon (1982) e successivamente modificata da Bretagnon e Franco (1987).

Come base per calcolare le tabelle di posizione solare per il progetto STAR abbiamo utilizzato il codice fornito da NREL, scritto in linguaggio C.

Questo codice calcola la posizione del sole istante per istante.

I parametri di ingresso sono:

- a) i parametri temporali (anno, mese, giorno, ora, minuto, secondo),
- b) i parametri del luogo (latitudine, longitudine, altezza sul livello del mare, fuso orario),
- c) i parametri atmosferici (pressione, temperatura, rifrazione atmosferica)

Inoltre sono necessari altri parametri che possono essere considerati in prima approssimazione costanti come ad esempio la differenza tra la rotazione della terra e il tempo terrestre. Questo parametro è derivato dalle osservazioni soltanto ed è riportato nel bollettino alla seguente pagina web:
<http://maia.usno.navy.mil/ser7/ser7.dat>

In uscita il codice spa.c fornisce l'azimuth e lo zenith locale del sole all'istante inserito in ingresso. E' possibile ottenere anche i valori dell'angolo di incidenza, dell'alba, e del tramonto.

Quello che è necessario nel sistema di puntamento degli specchi non è la posizione solare per un singolo istante, ma una tabella che fornisca la posizione del sole per ciascun giorno dell'anno.

6.2 Estensione di spa.c

Per questa ragione abbiamo esteso il programma spa.c con un codice perl in modo da poter calcolare direttamente tabelle di azimuth e zenith per ciascun giorno dell'anno.

I parametri del luogo sono stati fissati ed identificati nella latitudine, longitudine e fuso orario dell'isola di Pianosa:

```
spa.timezone = +1.0;
```

```
spa.longitude = +010.0806;
```

```
spa.latitude = 43.582476;
```

I parametri temporali ed atmosferici sono stati lasciati liberi, in modo da poterli cambiare secondo i dati forniti da IBIMET durante le varie stagioni.

Il codice perl, allegato al termine di questo documento permettere di fornire in ingresso la data, nel formato anno, mesi, giorno, la temperatura, e la pressione atmosferica.

Da shell il comando per ottenere una tabella giornaliera è il seguente:

```
makespadays.pl YEAR MONTH DAY TEMP PRES
```

L'uscita di questo programma è una tabella che contiene le seguenti informazioni, ad intervalli di 10 minuti:

```
fprintf(f,"%4i ",spa.year);  
  
fprintf(f,"%2i ",spa.month);  
  
fprintf(f,"%2i ",spa.day);  
  
fprintf(f,"%2i ",spa.hour);  
  
fprintf(f,"%2i ",spa.minute);  
  
fprintf(f,"%2i ",spa.second);  
  
fprintf(f,"%10f ",spa.azimuth);  
  
fprintf(f,"%10f ",spa.zenith);  
  
fprintf(f,"%6f ",spa.incidence);  
  
fprintf(f,"%4f ",spa.pressure);  
  
fprintf(f,"%4f ",spa.temperature);  
  
fprintf(f,"%6f ",spa.sunrise);  
  
fprintf(f,"%6f\n",spa.sunset);
```

La tabella ha un nome univoco che puo' essere facilmente interpretabile:

```
spaYEAR-MONTH-DAY-TEMP-PRES
```


6.3 Valutazione dei parametri atmosferici

Una questione importante è quanto sia necessario conoscere pressione e temperatura atmosferica giorno per giorno per calcolare accuratamente la posizione solare. Per questo abbiamo fatto alcuni test, calcolando la posizione solare per lo stesso giorno in diverse condizioni di temperatura e di pressione atmosferica.

Abbiamo considerato due casi tipici di pressione e di temperatura, che possono essere associati a condizioni estive (alta pressione, 1022 mbar, alta temperatura 30 gradi) e condizioni invernali (bassa pressione 960 mbar e bassa temperatura, 10 gradi). Abbiamo considerato sia la variazione di uno solo dei due parametri, che la variazione di entrambi.

Test 1: Variazione della pressione atmosferica, a temperatura costante

Per la stessa data e lo stesso luogo è stata calcolata la posizione del sole con una pressione di 960 mbar e con una pressione di 1022 mbar. Nel pannello superiore di Figura a) è riportata l'altezza del sole (zenith) in funzione dell'azimuth. Nel pannello inferiore è riportata la differenza tra lo zenith a pressione 1022 mbar e pressione 960 mbar. Si noti che si hanno differenze consistenti solo nei primi 5 gradi e negli ultimi 5 gradi di azimuth, che corrispondono all'alba e al tramonto.

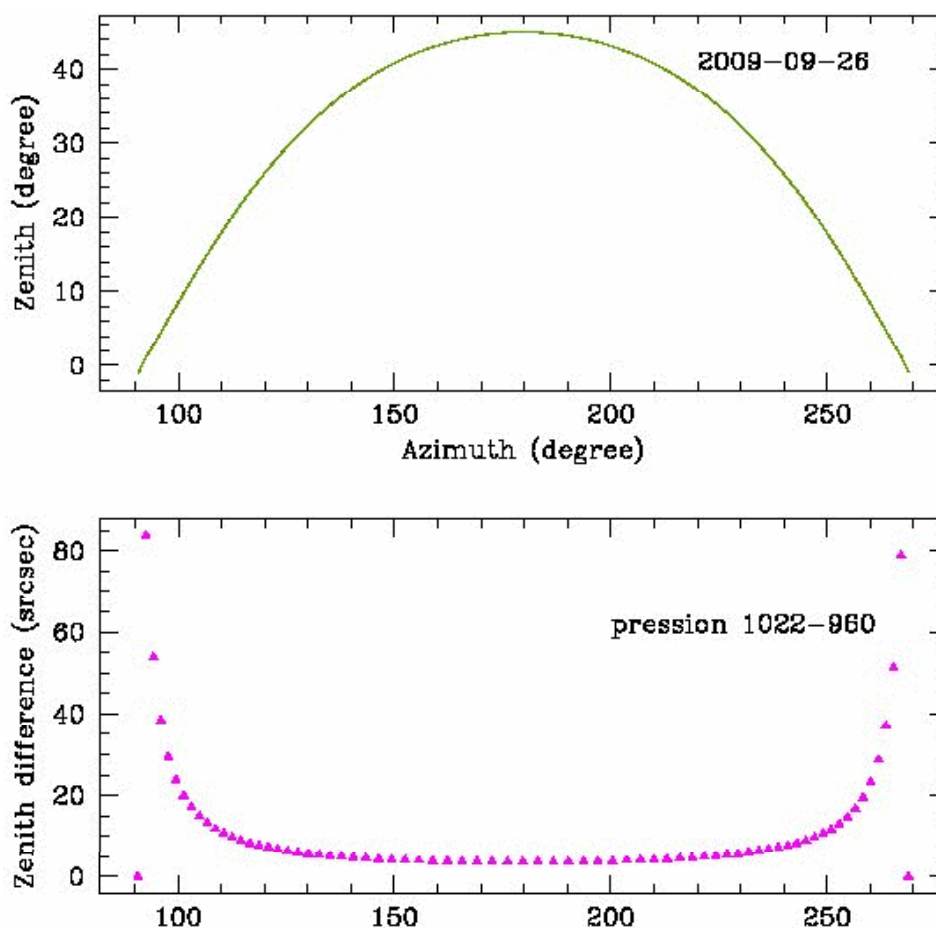


Figura a)

Test 2: Variazione della temperatura, a pressione costante

Per la stessa data e lo stesso luogo è stata calcolata la posizione del sole con una temperatura di 10 e di 30 gradi centigradi, mantenendo la pressione costante.

Nel pannello superiore di Figura b) è riportata lo zenith in funzione dell' azimuth. Nel pannello inferiore di Fig.2 è riportata la differenza tra lo zenith a temperatura 10° e temperatura 30°. Si noti che, come nel caso precedente, si hanno differenze consistenti solo nei primi 5 gradi e negli ultimi 5 gradi di azimuth.

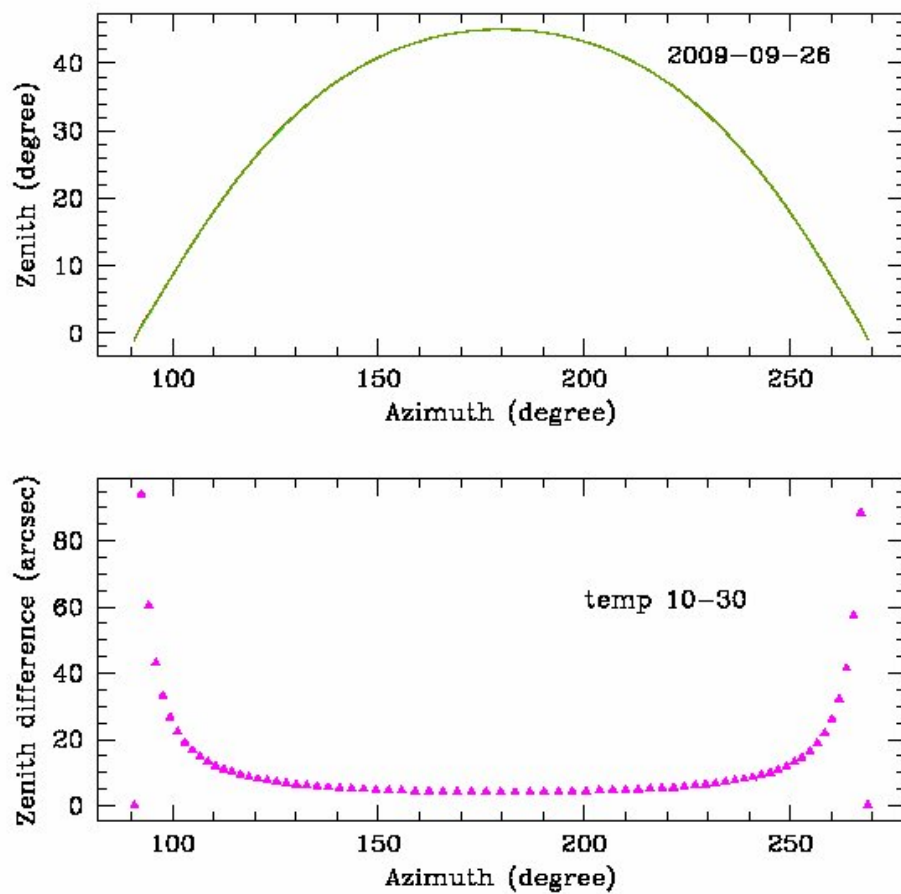


Figura b)

Test 3: Variazione della temperatura e della pressione

Il caso piu' completo e' una variazione di entrambe le quantita', supponendo che ad una variazione di pressione sia associata anche una variazione di temperatura.

Per la stessa data e lo stesso luogo è stata calcolata la posizione del sole con una temperatura di 10° e pressione di 960 mbar, e per temperatura 30° , mantenendo la pressione costante.

Nel pannello superiore di Figura 3 è riportata lo zenith in funzione dell' azimuth.

Nel pannello inferiore di Fig.3 è riportata la differenza tra lo zenith nelle due condizioni $10^{\circ}/960$ mbar e $30^{\circ}/1022$ mbar. La prima condizione puo' essere approssimata al caso invernale, mentre la seconda al caso estivo. Si noti che in questo caso gli effetti di pressione e temperatura si compensano ed abbiamo piccolissime variazioni, dell'ordine al massimo di 3-4" nella posizione solare anche all'alba e al tramonto.

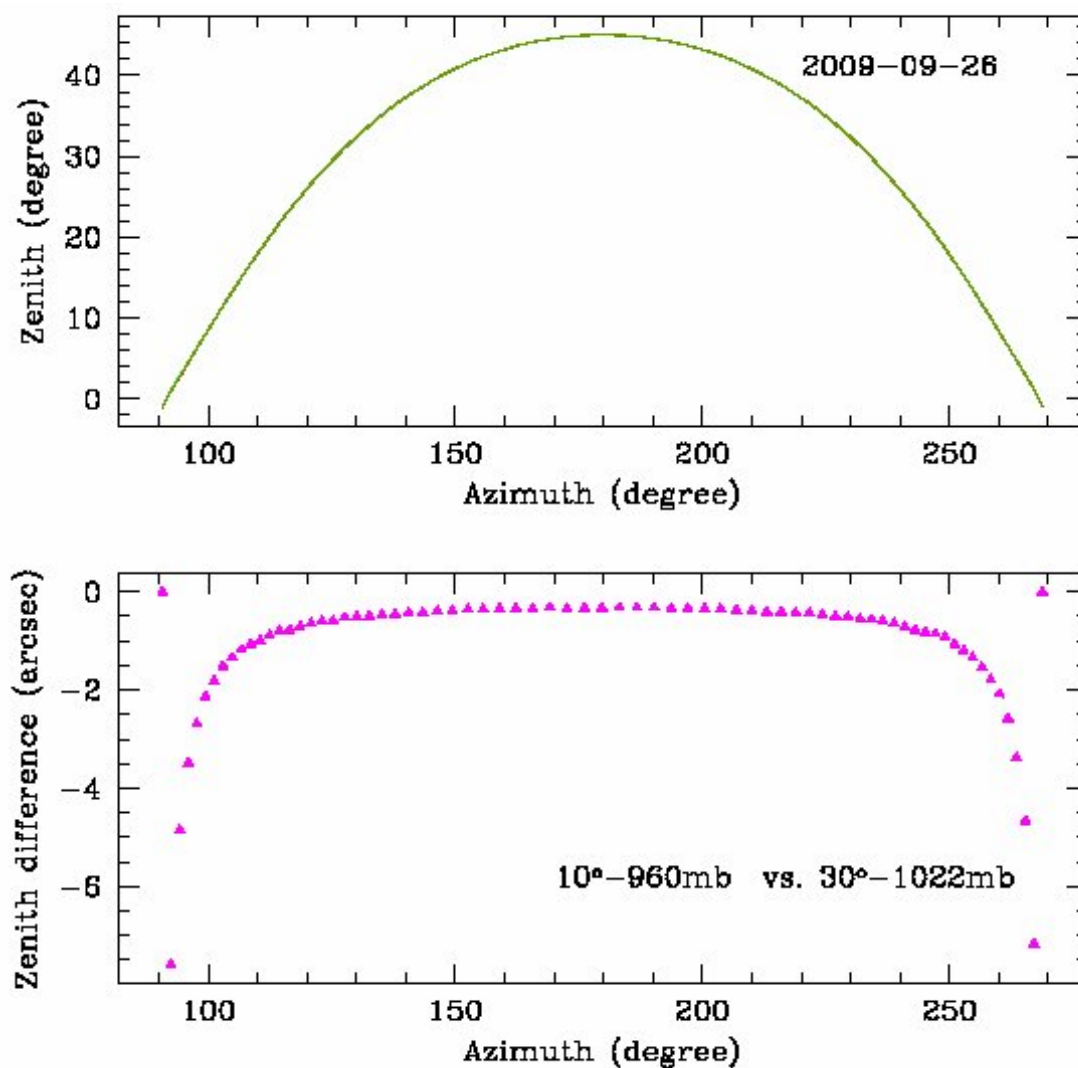


Figura c)

La piccola variazione della posizione solare con pressione e temperatura limitata ai primi gradi all'orizzonte fa sì che si possano adottare tabelle di posizione zenith/azimuth in cui si assume temperatura e pressione media nei vari periodi dell'anno come fornito da IBIMET. Non è quindi necessario compilare ogni giorno una tabella di posizione solare con gli esatti dati atmosferici, ma è sufficiente conoscere i valori medi dei parametri atmosferici.

7. Valutazione costi/benefici

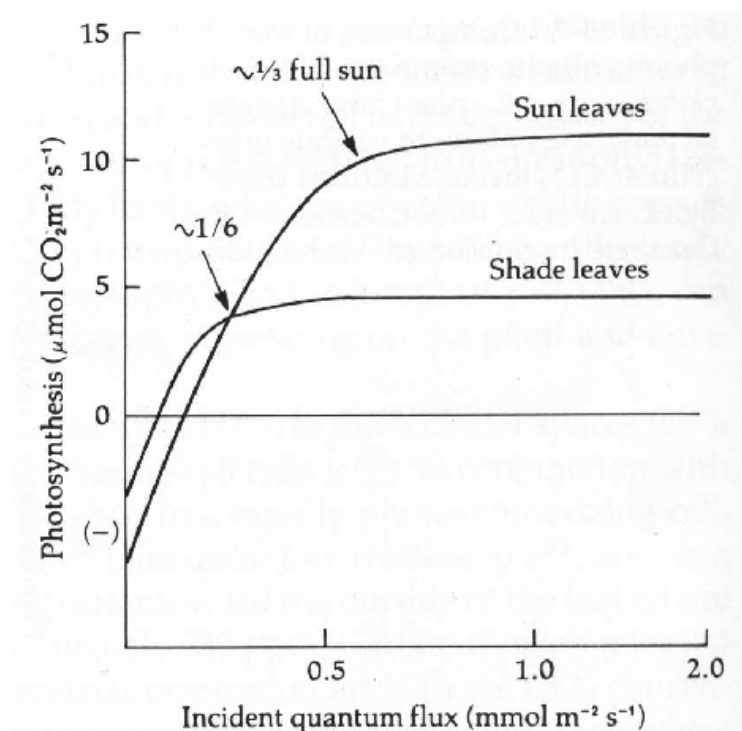
7.1 Effetti dell'ombreggiamento: Fotosintesi e Luce

Date le dimensioni del progetto si è pensato opportuno di eseguire uno studio sulla possibilità di vita, e quindi di una possibile variazione del processo di fotosintesi, delle piante presenti sul sito di destinazione del progetto.

Le piante, in genere, hanno un ampio corredo di pigmenti fotosintetici, che le consentono di assorbire quasi tutto lo spettro del visibile della radiazione solare incidente. A seconda del loro adattamento a regimi luminosi diversi le piante si possono suddividere in eliofile e sciafile, a meno che amino di più o di meno la luce. Questa attitudine si traduce in un tipico meccanismo di risposta della fotosintesi alla luce come riportato nella figura sottostante da Barbour et al. (1999)

Indipendentemente dal tipo di piante o di foglie che consideriamo la curva di risposta della fotosintesi all'aumentare della radiazione, ha un andamento caratteristico, infatti aumenta in modo proporzionale fino ad un massimo per poi saturare. La diversa soglia di saturazione differenzia le piante o le foglie di una stessa pianta se sono esposte al sole o all'ombra.

Questo vuol dire che l'efficienza della fotosintesi è massima anche a regimi



radiativi bassi, inoltre va considerato che il processo fotosintetico è in continua “lotta fisiologica” con il processo traspirativo. Infatti entrambi i processi avvengono attraverso le aperture stomatiche delle foglie, che consentono alla CO₂ di entrare, ma al tempo stesso, gli stomi consentono all’H₂O di evaporare, creando un flusso di calore latente. In poche parole, la pianta perde acqua.

Quindi non è da meravigliarsi che durante il giorno, nelle ore di massima insolazione la pianta sospenda la fotosintesi, in questo modo, tenendo gli stomi chiusi evita di perdere troppa acqua. L’efficienza dell’uso della luce è definito come *quantum yield* ed è misurato dalla quantità di CO₂ fissata per unità di luce assorbita. All’interno della stessa pianta ci possono essere foglie adattate alla luce e foglie adattate all’ombra.

Per calcolare se la realizzazione del progetto, ovunque venga messo, arrechi danni alla vegetazione retrostante dobbiamo considerare due situazioni di ombra che eventualmente la nostra struttura provocherebbe su di un ecosistema. L’ombra provocata direttamente dalla struttura ovvero quella porzione di terreno che anche al variare del moto apparente del sole rimarrebbe comunque in ombra e quella che varia in funzione del moto apparente del sole.

Nel primo caso ovviamente avremo un’influenza del fattore ombra molto determinante, la vegetazione non è in grado di crescere in assenza totale di radiazione, nel secondo invece non abbiamo nessuna conseguenza, forse sul lungo periodo potremmo avere dei meccanismi compensativi evolutivi, ovvero una prevalenza di specie vegetali sciafile piuttosto che eliofile.

A titolo di commento possiamo pensare all’ombra degli edifici sui giardini o alla vegetazione di alcuni boschi che a seconda della loro compattezza della chioma, possono far filtrare o meno la luce diretta. In questi casi abbiamo un sottobosco più o meno ricco di specie ma mai assenza di vegetazione.

Si può concludere, in seguito a quanto premesso, che lo stato vegetativo e del terreno imminente all’area degli specchi primari, non subirà particolari alterazioni, di conseguenza l'utilizzo di tale superficie può comunque essere mantenuto anche in seguito al posizionamento della struttura ove l'attività lo permette.

7.2 Costi di realizzazione e producibilità

La realizzazione di questo progetto è stato calibrata per ottenere circa 500 kWp, con una stima delle perdite del 5% (dovute a riflessione, pollution/filtri, eventi atmosferici, ecc...) ottenendo una producibilità reale netta dell'impianto di **837.335 kWh/anno**, cioè 1674,7 kWh/anno/kWp.

Considerando che l'intera superficie disponibile per il completo funzionamento del sistema è di 600 mq si può affermare che il costo al kWp prodotto è di circa 220 Euro, inoltre ulteriore dato molto interessante è la quantità di superficie disponibile per la produzione di 1 kWp che è di 0.833 mq.

7.3 Benefici Ambientali

Si riporta di seguito una stima delle emissioni evitate supponendo di realizzare un impianto della potenza di circa 500 kWp situato in una zona dell'Italia centrale utilizzando dati di radiazione UNI 10349:

- CO2 489.746 kg/anno;
- Tonnellate equivalenti di petrolio: 166,9 TEP/anno
- Emissioni di NOx: 1088,3 kg/anno

8. Conclusioni

Le principali conclusioni e risultati che abbiamo ottenuto sono le seguenti:

1. Abbiamo valutato vari tipi di specchio trovando che quelli attualmente in commercio prodotti con il metodo float, testati al rugosimetro hanno un profilo superficiale con deformazioni inferiori al nanometro quindi perfettamente compatibili con l'error-budget di STAR.
2. Abbiamo valutato lo specchio finale (cioè incollato al proprio supporto) con un test di planarità ottico. I primi test eseguiti indicano che lo specchio incollato risulta piano a meno di variazioni inferiori allo 0.5%. Ulteriori test su altri tipi di specchio, sia piani che curvi, e di incollaggio sono in pianificazione.
3. Abbiamo reso operativo un software che ci consente di avere per ciascun giorno dell'anno la posizione del sole, con un'accuratezza molto inferiore al secondo d'arco, in funzione dei parametri del luogo e metereologici.

Appendice

Il codice Perl

Makespaday.pl

```
#!/usr/bin/perl
use Math::Complex;

$year=$ARGV[0];
$month=$ARGV[1];
$day=$ARGV[2];
$temp=$ARGV[3];
$pres=$ARGV[4];

#create the program SPADAY.C for the given year, month, day
$iteration="01";
$it=1;
$continue=1;

while ($continue) {
    $iteration=sprintf "%02d", $it;
    $itplusone=$it+1;
    $itminusone=$it-1;
    $iterationplusone=sprintf "%02d", $itplusone;
    $iterationminusone=sprintf "%02d", $itminusone;
    #print "iteration: $iteration\n";
    $spaday="/home/laura/STAR/spaday${iteration}.c";

    open (OUT, ">$spaday") || die;

# da sunrise a sunset
    if ($it>=1 && $it<=6) {
        $hour=00;
        $min=10*$it-10;}
    elsif($it>=7 && $it<=12) {
        $hour=01;
        $min=10*$it-70;}
    elsif($it>=13 && $it<=18) {
        $hour=02;
        $min=10*$it-130;}
```

```
elseif($it>=19 && $it<=24) {  
    $hour=03;  
    $min=10*$it-190;}  
elseif($it>=25 && $it<=30) {  
    $hour=04;  
    $min=10*$it-250;}  
elseif($it>=31 && $it<=36) {  
    $hour=05;  
    $min=10*$it-310;}  
elseif($it>=37 && $it<=42) {  
    $hour=06;  
    $min=10*$it-370;}  
elseif($it>=43 && $it<=48) {  
    $hour=07;  
    $min=10*$it-430;}  
elseif($it>=49 && $it<=54) {  
    $hour=8;  
    $min=10*$it-490;}  
elseif($it>=55 && $it<=60) {  
    $hour=9;  
    $min=10*$it-550;}  
elseif($it>=61 && $it<=66) {  
    $hour=10;  
    $min=10*$it-610;}  
elseif($it>=67 && $it<=72) {  
    $hour=11;  
    $min=10*$it-670;}  
elseif($it>=73 && $it<=78) {  
    $hour=12;  
    $min=10*$it-730;}  
elseif($it>=79 && $it<=84) {  
    $hour=13;  
    $min=10*$it-790;}  
elseif($it>=85 && $it<=90) {  
    $hour=14;  
    $min=10*$it-850;}  
elseif($it>=91 && $it<=96) {  
    $hour=15;  
    $min=10*$it-910;}  
elseif($it>=97 && $it<=102) {
```



```

        $hour=16;
        $min=10*$it-970;}
elseif($it>=103 && $it<=108) {
        $hour=17;
        $min=10*$it-1030;}
elseif($it>=109 && $it<=114) {
        $hour=18;
        $min=10*$it-1090;}
elseif($it>=115 && $it<=120) {
        $hour=19;
        $min=10*$it-1150;}
elseif($it>=121 && $it<=126) {
        $hour=20;
        $min=10*$it-1210;}
elseif($it>=127 && $it<=132) {
        $hour=21;
        $min=10*$it-1270;}
elseif($it>=133 && $it<=138) {
        $hour=22;
        $min=10*$it-1330;}
elseif($it>=139 && $it<=144) {
        $hour=23;
        $min=10*$it-1390;}

print OUT <<EOI;
#include <stdio.h>
#include "spa.h" //include the SPA header file
int main (int argc, char *argv[])
{
    spa_data spa; //declare the SPA structure
    int result;
    float min, sec;
    spa.year          = $year;
    spa.month         = $month;
    spa.day           = $day;
    spa.hour          = $hour;
    spa.minute        = $min;
    spa.second        = 00;
    spa.timezone      = +1.0;
    spa.delta_t       = 65;

```

```

spa.longitude      = +010.0806;
spa.latitude       = 43.582476;
spa.pressure       = $pres;
spa.temperature    = $temp;
spa.slope          = 30;
spa.azm_rotation   = -10;
spa.atmos_refract   = 0.5667;
spa.function        = SPA_ALL;
result = spa_calculate(&spa);
if (result == 0)    //check for SPA errors
{
    FILE *f;
    f = fopen("spa$iteration.dat", "w");
    fprintf(f, "%.4i  ", spa.year);
    fprintf(f, "%.2i  ", spa.month);
    fprintf(f, "%.2i  ", spa.day);
    fprintf(f, "%.2i  ", spa.hour);
    fprintf(f, "%.2i  ", spa.minute);
    fprintf(f, "%.2i  ", spa.second);
    fprintf(f, "%.10f  ", spa.azimuth);
    fprintf(f, "%.10f  ", spa.zenith);
    fprintf(f, "%.6f  ", spa.incidence);
    fprintf(f, "%.4f  ", spa.pressure);
    fprintf(f, "%.4f  ", spa.temperature);
    fprintf(f, "%.6f  ", spa.sunrise);
    fprintf(f, "%.6f\\n ", spa.sunset);
    fclose(f);
    } else printf("SPA Error Code: %d\\n", result);

    return 0;
}
EOI
    $it++;

    if ($it > 144) {exit}

}

```