



**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI FERRARA**

**FACOLTA' DI SCIENZE MATEMATICHE FISICHE E  
NATURALI**

Corso di Laurea in Fisica ed Astrofisica

**Modellazione ottica di due flussimetri  
Per radiazione solare concentrata :  
DCR e DISR**

Relatore:

Prof. Antonio Parretta

Laureando:

Nicolò Baroni

Anno Accademico 2009 – 2010

## Indice:

Introduzione .....	2
Capitolo 1: Teoria delle sfere integratrici.....	3
Capitolo 2 :Realizzazione di una sfera integratrice.....	12
Capitolo 3 :Precedenti radiometri per radiazione concentrata: .....	15
Capitolo 4 : Flussimetro DCR.....	17
4.1 Caratteristiche costruttive.....	17
4.2: Applicazione della teoria delle sfere integratrici al radiometro .....	21
4.3: Modellazione Ottica del DCR.....	25
4.3.1: Analisi del flusso all'interno DCR.....	29
4.3.2 Come varia il fattore di attenuazione al variare della porta intermedia e della riflettenza di parete.....	35
4.3.3 Come la divergenza del fascio influenza il fattore di attenuazione nel DCR.....	40
4.4 Come lo spettro della luce concentrata viene influenzato dal DCR.....	42
Capitolo 5: Flussimetro DISR .....	46
5.1 Caratteristiche costruttive.....	46
5.2 Modellazione Ottica .....	50
5.2.1 Analisi del flusso all'interno DISR .....	52
5.2.2 Come varia il fattore di attenuazione al variare della porta intermedia e della riflettenza di parete.....	58
5.2.3 Prove divergenza del fascio Vs Fattore di attenuazione.....	60
5.3 Come il DISR influenza lo spettro della luce concentrata .....	62
5.4 DISR modificato .....	64
Conclusioni.....	66
Bibliografia: .....	67

## Introduzione

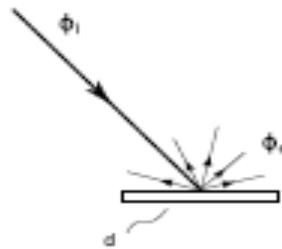
In questi ultimi anni si è manifestato un rinnovato interesse verso i sistemi solari a concentrazione, sia di tipo fotovoltaico che termodinamico. Nel settore fotovoltaico, la motivazione principale che spinge ad esplorare con maggiore convinzione la strada della concentrazione si basa sulla considerazione che il costo del dispositivo (cella solare) negli impianti solari piani, in un futuro scenario di produzione dell'energia fotovoltaica su larga scala, avrebbe un impatto economicamente non sostenibile, soprattutto se si pensa all'uso di silicio cristallino come materiale assorbente. Parallelamente, nel settore termodinamico, si è consolidata la convinzione che la scelta dell'idrogeno come vettore energetico alternativo ai combustibili fossili sia una strada obbligata per un futuro dell'umanità sostenibile ed eco-compatibile. Questi due settori strategici delle fonti rinnovabili sono caratterizzati dall'impiego di radiazione solare concentrata, per livelli di concentrazione che nel caso del fotovoltaico si attestano intorno alle decine o centinaia di soli, mentre nel caso della produzione d'idrogeno possono variare dalle centinaia alle migliaia di soli ( $100 \text{ W/cm}^2$ ). L'uso sistematico di radiazione solare concentrata, ovvero caratterizzata da elevate densità di flusso, pone l'esigenza di sviluppare metodi radiometrici innovativi. E' necessario anche disporre di una strumentazione che si adegui alla particolare geometria dei concentratori, molto variegata se si tiene conto che nel settore fotovoltaico sono stati sviluppati sia sistemi a concentrazione lineare (a due dimensioni), con ricevitore piano, che sistemi a concentrazione "point-focus" (a tre dimensioni), sempre con ricevitore piano, e che anche i sistemi a concentrazione di tipo termodinamico possono essere del tipo lineare o del tipo "pointfocus".

## Capitolo 1: Teoria delle sfere integratrici

L'elemento fondamentale alla base dei nostri radiometri è il dispositivo "sfera integratrice"(SI). Questo dispositivo è utilizzato in ottica principalmente per due scopi :

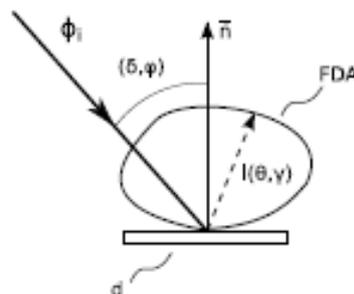
- 1) Raccogliere, integrare e misurare il flusso di radiazione elettromagnetica<sup>1</sup>, in questo caso la SI viene utilizzata come componente fondamentale di un radiometro.
- 2) Generare luce diffusa, in questo caso la SI si comporta come una sorgente di radiazione

Prima di trattare le caratteristiche e il funzionamento della SI bisogna precisare quali sono le proprietà ottiche di un diffusore e quali sono le principali grandezze che lo definiscono. Cominciamo innanzitutto col considerare un diffusore piano. Un diffusore piano (opaco) diffonde nello spazio circostante una luce collimata che incide sulla sua superficie.



**Fig.1.1** :Rappresentazione schematica di un diffusore piano

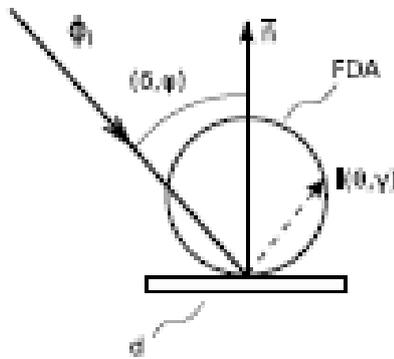
Per un diffusore piano possiamo definire una funzione che rappresenta la modalità con cui la luce viene diffusa , questa funzione è chiamata funzione di distribuzione angolare(FDA) e caratterizza il profilo di intensità radiante  $I(\theta, \gamma)$  della luce emessa dalla regione illuminata dal diffusore in funzione della direzione di emissione  $(\theta, \gamma)$ , con  $\theta$  angolo di emissione zenitale (misurato partendo dalla normale alla superficie ) e  $\gamma$  angolo di emissione azimutale (misurato rispetto ad una particolare direzione del piano diffusore).



**Fig.1.2**:FDA generica per un qualsiasi diffusore piano

<sup>1</sup>Nel nostro caso la radiazione E.M. sarà limitata quella UV-VIS-NIR e cioè l'ultravioletto , il visibile e il vicino infra-rosso

Nella figura 1.2 viene mostrato il fascio collimato o raggio di luce incidente sul diffusore proveniente dalla direzione  $(\delta; \gamma)$  con  $\delta$  angolo d'incidenza zenitale e l'altro angolo di incidenza azimutale. La FDA del diffusore è rappresentata come una superficie chiusa dalla quale si può ricavare l'intensità radiante  $I(\theta, \gamma)$  in funzione dell'angolo zenitale e azimutale. Nel caso particolare di un diffusore ideale (lambertiano) la FDA assume una forma sferica.



**Fig.1.3:**FDA sferica per un diffusore piano ideale/lambertiano

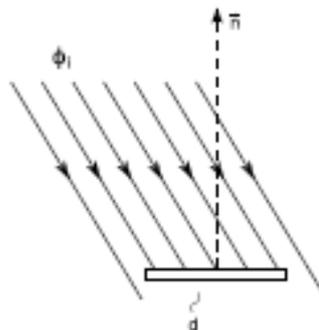
L'intensità radiante di emissione sarà definita :

$$I(\theta; \gamma) = I(\theta) = I_0 \cos(\theta)$$

Da questa legge si nota che l'intensità radiante è funzione solo di  $\theta$  secondo la funzione coseno. Possiamo quindi enunciare due leggi alle quali un diffusore deve obbedire per essere ideale o lambertiano. Queste leggi sono dette leggi di Lambert e sono:

- 1) L'intensità radiante della luce diffusa è una funzione del  $\cos \theta$
- 2) Il flusso totale emesso dal diffusore a parità di flusso incidente è una funzione costante dell'angolo di incidenza  $\delta$

La seconda legge può essere formulata in modo differente qualora il fascio collimato incidente illumini completamente il diffusore .



**Fig.1.4:**Caso di un diffusore piano completamente illuminato

2') Il flusso totale emesso dal diffusore è una funzione di  $\cos\delta$

C'è da notare che le leggi di Lambert non fanno riferimento ad una particolare riflettività del diffusore, esse infatti in teoria sono valide per qualsiasi grado di riflettività del diffusore; nella realtà si constata che i diffusori che si avvicinano di più al comportamento di un diffusore ideale/lambertiano sono quelli che mostrano i più alti valori di riflettività.

Considerando la Fig. 1.3 definiamo  $\phi_{in}$  il flusso incidente e  $\phi_e$  il flusso emesso o diffuso dal diffusore lambertiano di superficie  $A_d$ .

Andiamo così a definire  $M$  emettanza del diffusore in  $W/m^2$ :

$$M = \frac{\phi_e}{A_d} \quad (1.1)$$

Ma avendo anche che :

$$\phi_e = \int_{\varphi, \theta} I(\theta; \varphi) = \int_0^{\pi/2} d\theta \sin\theta I_0 \cos\theta \quad (1.2)$$

Si ottiene:

$$\phi_e = \pi I_0 \quad (1.3)$$

Da cui si ricava :

$$MA_d = \pi I_0 \quad (1.4)$$

Si riesce così a ricavare  $I_0$  misurato in Watt per angolo solido(W/sr):

$$I_0 = \frac{MA_d}{\pi} = \frac{\phi_e}{\pi} \quad (1.5)$$

Ma sapendo che :

$$\phi_e = \rho_d \phi_{in} \quad (1.6)$$

Dove  $\rho_d$  è la riflettività del diffusore, si ha quindi che le grandezze  $M$  ed  $I_0$  diventano, riformulando le formule precedenti:

$$M = \rho_d \frac{\phi_{in}}{A_d} \quad (1.7)$$

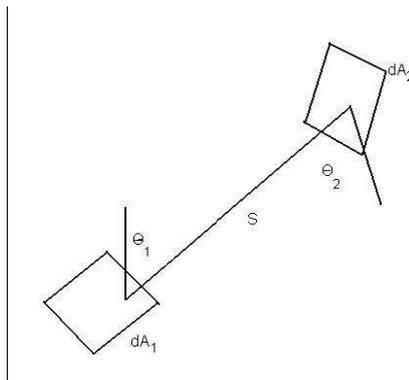
$$I_0 = \rho_d \frac{\phi_{in}}{\pi} \quad (1.8)$$

Si definisce ora la radianza  $L_d$  del diffusore; questa per definizione si ottiene dividendo l'intensità radiante  $I(\theta; \varphi)$ , misurata in W/sr per la proiezione ortogonale alla direzione  $(\theta; \varphi)$  dell'area del diffusore ovvero:

$$L(\theta, \varphi) = \frac{I(\theta, \varphi)}{A_d \cos \theta} = \frac{I_0 \cos \theta}{A_d \cos \theta} = \frac{I_0}{A_d} = \frac{M}{\pi} \quad (1.9)$$

La radianza di un diffusore lambertiano è quindi costante ed è misurata in  $W/m^2sr$

Per quanto riguarda la teoria di una sfera integratrice bisogna innanzitutto considerare la teoria dello scambio di radiazione all'interno di una superficie. Consideriamo ora lo scambio di radiazione tra due elementi infinitesimi di una superficie diffusiva:



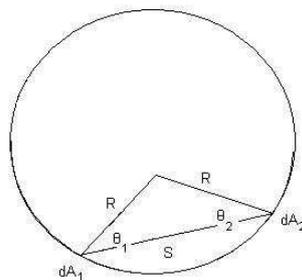
**Fig.1.5:**Scambio di radiazione tra due elementi di superficie

La frazione di energia che lascia  $dA_1$  ed arriva a  $dA_2$  è conosciuta come fattore di scambio  $F_{d1-d2}$  ed è dato da:

$$dF_{d1-d2} = \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2}{\pi S^2} dA_2 \quad (1.10)$$

Dove  $\theta_1$  e  $\theta_2$  sono gli angoli misurati dalla normale alla superficie.

Considerando ora due elementi differenziali  $dA_1$  e  $dA_2$  all'interno della superficie sferica diffusiva:



**Fig.1.6:** Scambio di radiazione tra due parti della sfera

Data la distanza  $S = 2R\cos\theta_1 = 2R\cos\theta_2$  sostituendo nell'equazione del fattore di scambio ottengo:

$$dF_{d1-d2} = \frac{dA_2}{4\pi R^2} \quad (1.11)$$

E' importante notare che il risultato è indipendente sia dall'angolo che dalla distanza tra le due aree, quindi la frazione di flusso ricevuta da  $dA_2$  è la stessa per ogni punto radiante della superficie della sfera; se si va a valutare invece il fattore di scambio per una superficie infinitesima  $dA_1$  con una superficie finita  $A_2$  l'equazione diventa:

$$dF_{d1-d2} = \frac{1}{4\pi R^2} \int_{A_2} dA_2 = \frac{A_2}{4\pi R^2} \quad (1.12)$$

La nostra formula è inoltre indipendente dall'area  $dA_1$  possiamo dunque scrivere il fattore di scambio :

$$dF_{d1-d2} = \frac{A_2}{4\pi R^2} = \frac{A_2}{A_s} \quad (1.13)$$

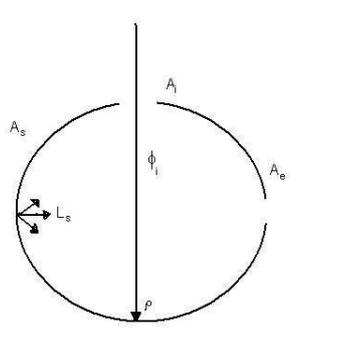
Dove  $A_s$  è l'area totale della sfera .

Quindi la frazione di flusso ricevuto da  $A_2$  è pari alla frazione d'area che occupa all'interno della sfera.

La luce incidente su di una superficie diffondente crea una sorgente di luce virtuale dovuta alla riflessione. La luce emanata dalla superficie è meglio descritta dalla sua radianza che è la densità di flusso per unità di angolo solido. Per ricavare la radianza di una sfera integratrice illuminata interamente si parte dall'espressione della radianza di una superficie diffondente(  $L_s$ ) con un flusso incidente  $\phi_{in}$ .

$$L_s = \frac{\phi \rho}{\pi A} \quad (W/m^2sr) \quad (1.14)$$

Dove  $\rho$  è la riflettanza della superficie,  $A$  è l'area illuminata e  $\pi$  è l'angolo solido totale proiettato dalla superficie . Per una sfera integratrice invece bisogna considerare sia le riflessioni multiple fatte sulla superficie interna che le perdite attraverso porte d'ingresso e uscita. Se si considera una sfera con porta di ingresso  $A_i$  e porta d'uscita  $A_e$ .



**Fig.1.7:** Raggio di luce all'interno di una sfera integratrice

Il flusso d'ingresso è perfettamente diffuso dalla prima riflessione. La quantità di flusso incidente calcolata sull'intera superficie della sfera è:

$$\Phi_{\text{out}} = \Phi_{\text{in}} \rho \left( \frac{A_s - A_i - A_e}{A_s} \right) \quad (1.15)$$

dove la quantità tra parentesi è la frazione di flusso ricevuto dalla sfera e che non è perso dalle porte. Scriviamo per semplicità questo termine come  $(1 - f)$  dove  $f$  è la frazione d'area delle porte  $f = \frac{A_i + A_e}{A_s}$ .

Nel caso in cui ci siano più porte  $f$  è calcolato dalla somma delle aree di tutte le porte.

Per la medesima ragione, la quantità di flusso incidente sulla superficie della sfera dopo la seconda riflessione è:

$$\Phi_{\text{out}} = \Phi_{\text{in}} \rho^2 (1 - f)^2 \quad (1.16)$$

E dopo la terza riflessione:

$$\Phi_{\text{out}} = \Phi_{\text{in}} \rho^3 (1 - f)^3 \quad (1.17)$$

Ne segue che dopo  $n$  riflessioni il flusso totale incidente sulla superficie della sfera è:

$$\Phi_{\text{out}} = \Phi_{\text{in}} \rho (1 - f) \{ 1 + \rho (1 - f) + \dots + \rho (1 - f)^{n-1} \} \quad (1.18)$$

Espandendola all'infinito in serie di potenze, e dato che  $\rho(1 - f) < 1$  l'equazione precedente diventa :

$$\Phi_s^\infty = \frac{\Phi_{\text{in}} \rho (1 - f)}{1 - \rho (1 - f)} \quad (1.19)$$

L'equazione indica che il flusso totale incidente sulla superficie della sfera è maggiore del flusso in ingresso, a causa delle riflessioni multiple interne. Segue che la radianza della superficie della sfera è:

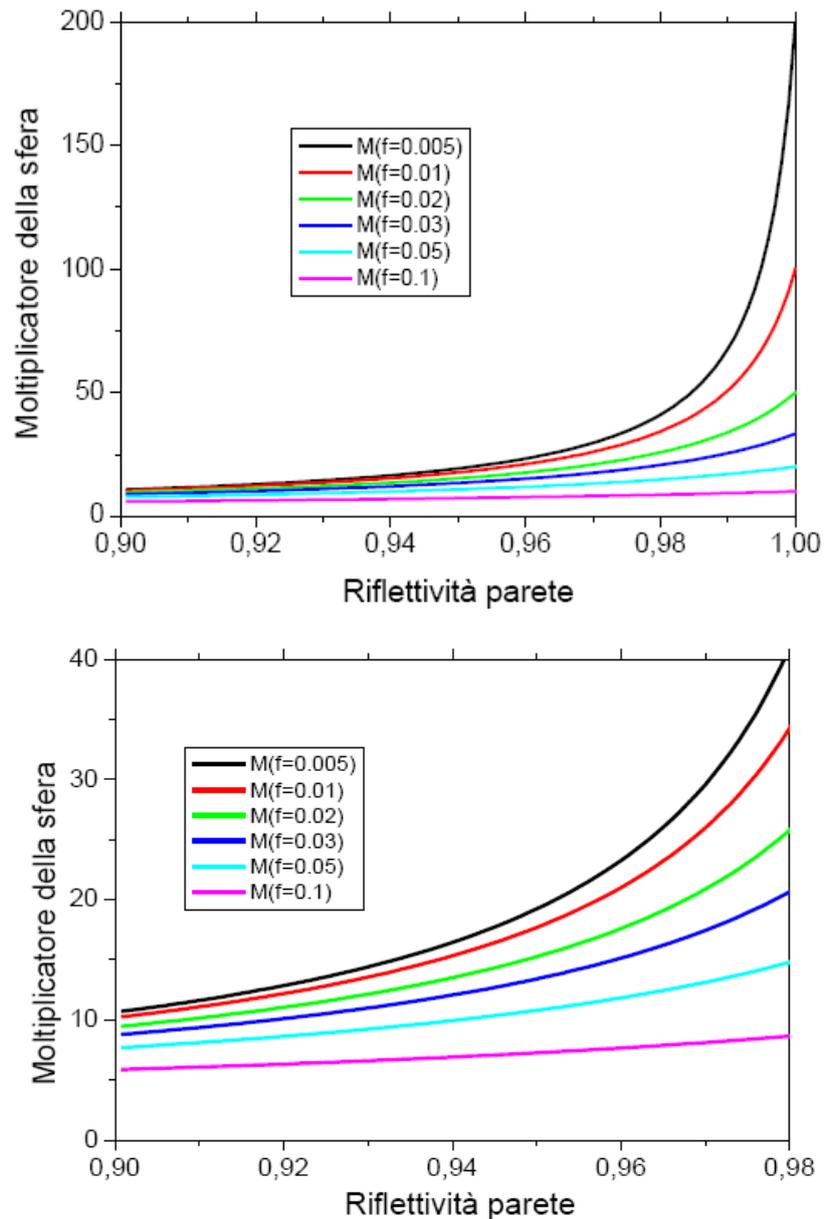
$$L_s = \frac{\Phi_{\text{in}}}{\pi A_s \rho (1 - f)} * \frac{\rho (1 - f)}{1 - \rho (1 - f)} = \frac{\Phi_{\text{in}}}{\pi A_s} * \frac{\rho}{1 - \rho (1 - f)} \quad (1.20)$$

Questa equazione permette di predire la radianza di una sfera integratrice per un dato flusso d'ingresso in funzione del diametro della sfera e della sfera integratrice, della riflettanza e della frazione d'area delle porte. Si può notare inoltre che la radianza cala al crescere del diametro della sfera. Si può vedere l'equazione (1.20) divisa in due parti una prima parte molto simile all'equazione (1.14) che rappresenta la radianza di una superficie diffusiva, la seconda parte è una quantità adimensionale che può essere riferita al moltiplicatore della sfera  $M$ .

$$M = \frac{\rho}{1 - \rho(1 - f)} \quad (1.21)$$

Questa grandezza tiene conto/rappresenta dell'aumento della radianza a causa delle riflessioni multiple.

Dall'equazione (1.12) si nota che il moltiplicatore ha una forte dipendenza sia dalla frazione d'area delle porte sia dalla riflettività della superficie della sfera  $\rho$ .



**Fig. 1.8:** Modifica del moltiplicatore al variare della riflettività di parete

L'equazione del moltiplicatore non è generale ma per un caso dove il flusso incidente incide sulla parete della sfera e questa parete ha riflettanza uniforme e la riflettanza dell'area di tutte le porte è zero.

Si può quindi scrivere un'equazione generale per il moltiplicatore che tenga conto di questi parametri:

$$M = \frac{\rho_0}{1 - \rho_w(1 - \sum_{i=0}^n f_i) - \sum_{i=0}^n \rho_i f_i} \quad (1.22)$$

Dove  $\rho_0$  è la riflettanza iniziale del flusso incidente

$\rho_w$  è la riflettanza di parete

$\rho_i$  è la riflettanza dell'i-esima finestra

$f_i$  è la frazione d'area della porta i-esima

La quantità  $\rho_w(1 - \sum_{i=0}^n f_i) + \sum_{i=0}^n \rho_i f_i$  rappresenta anche la riflettanza media  $\bar{\rho}$  per tutta la sfera integratrice. Possiamo quindi scrivere il moltiplicatore della sfera in termini solo di riflettanza iniziale e di riflettanza media.

$$M = \frac{\rho_0}{1 - \bar{\rho}} \quad (1.23)$$

Quindi i parametri che influenzano la distribuzione di radianza all'interno della sfera integratrice sono: la distribuzione di flusso incidente, la geometria della sfera e la distribuzione di riflettanza in funzione del tipo di rivestimento delle pareti interne.

L'effetto della riflettanza e della frazione di porte sull'integrazione spaziale può essere illustrato considerando il numero di riflessioni necessarie per realizzare il flusso incidente totale sulla superficie della sfera dato dall'equazione 1.10. Il flusso totale sulla parete della sfera dopo n-riflessioni può essere scritto come:

$$\phi_w^n = \phi_i \sum_{k=1}^n \rho^k (1 - f)^k \quad (1.25)$$

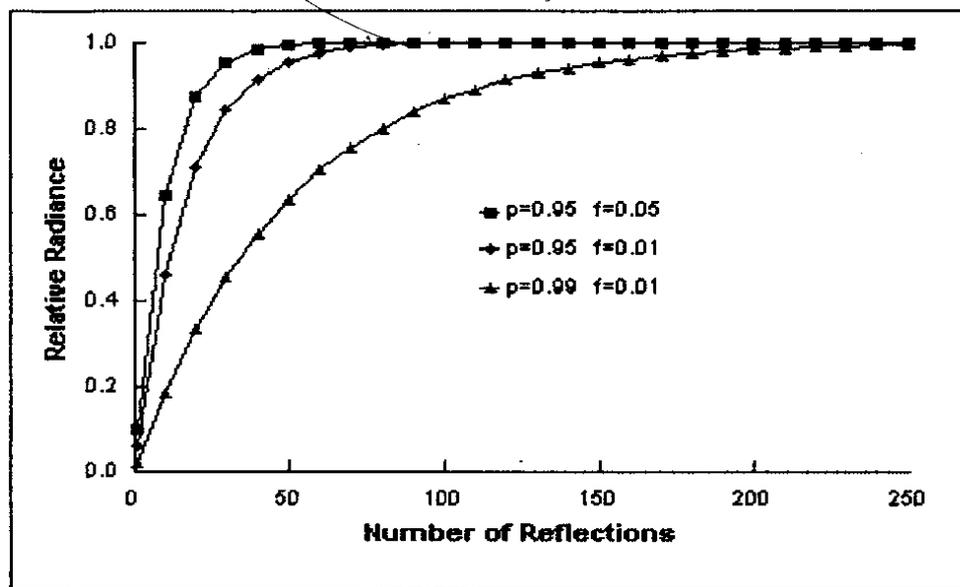
Da qui possiamo ricavare poi la frazione di flusso totale dopo n riflessioni:

$$\frac{\phi_w^n}{\phi_w^\infty} = \frac{\sum_{k=1}^n \rho^k (1 - f)^k}{\sum_{k=1}^\infty \rho^k (1 - f)^k} = 1 - \rho^n (1 - f)^n \quad (1.26)$$

La radianza prodotta dopo n riflessioni può essere comparata con lo stato di condizione stabile della sfera.

Per produrre lo stato stabile di radianza all'interno di una sfera integratrice si ha bisogno che la luce compia molte riflessioni all'interno della sfera, altri fattori che influenzano lo stato stabile di

radianza sono la  $\rho$  che lo favorisce e la  $f$  (frazione di porte) che lo sfavorisce .



**Fig. 1.9:** Variazione della radianza in funzione del numero di riflessioni effettuate all'interno della sfera

il design della sfera inoltre può ottimizzare questi parametri così da ottenere una migliore integrazione del flusso radiante.

La maggior parte delle sfere integratrici sono utilizzate come dispositivi di stato stabile .

E' importante inoltre che la sfera integratrice non crei distorsioni nel segnale della luce , distorsioni che potrebbero essere causate dalle riflessioni diffuse multiple. La forma del segnale d'uscita è determinata dalla convoluzione del segnale d'ingresso con l' "impulse response" della sfera integratrice .L' "impulse response" è una funzione del tempo del tipo  $e^{-t/\tau}$  dove la costante di tempo  $\tau$  è calcolata :

$$\tau = -\frac{2}{3} * \frac{D_s}{c} * \frac{1}{\ln(\bar{\rho})}$$

Dove  $\bar{\rho}$  è la riflettanza media di parete

$c$  è la velocità della luce

$D_s$  è il diametro della sfera integratrice

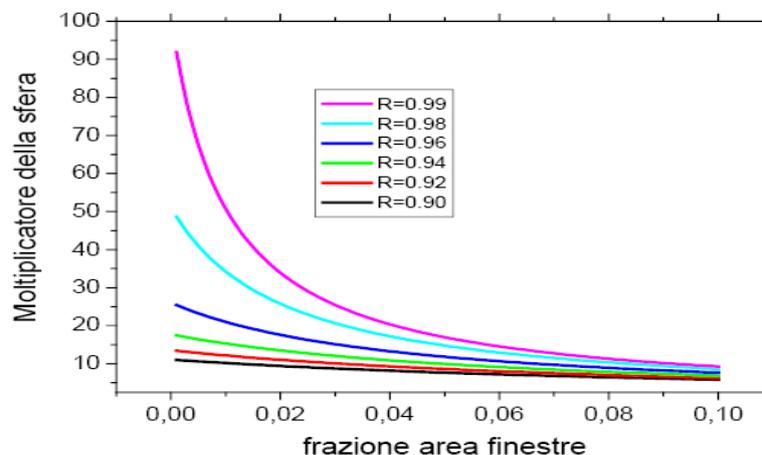
La costante di tempo tipica per una sfera integratrice può andare da pochi nanosecondi a poche decine di nanosecondi.

## Capitolo 2 :Realizzazione di una sfera integratrice

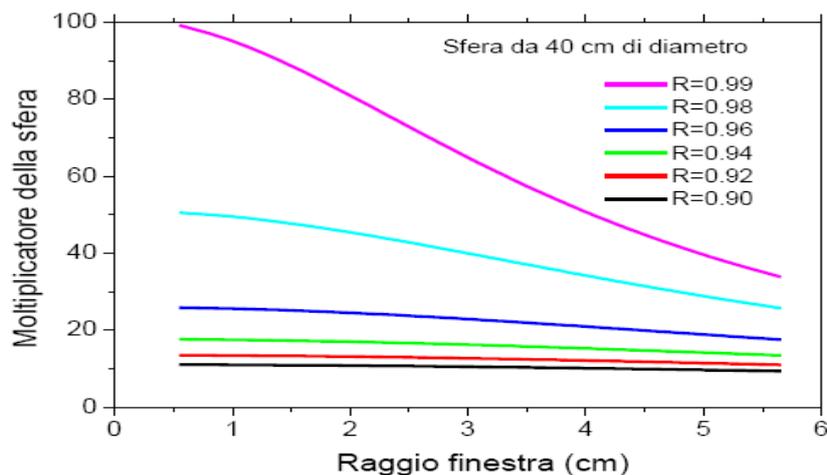
Per la realizzazione delle sfere integratrici si deve tener conto di un certo numero di parametri, quali la frazione di porte influenza il moltiplicatore, infatti per una frazione di porte pari al 5% si inizia a perdere il vantaggio offerto dall'alta riflettanza data dalla superficie della sfera; possiamo quindi definire una prima legge per la costruzione delle sfere integratrici che lega la superficie totale della sfera alla superficie occupata dalle porte, infatti come detto precedentemente la superficie delle porte deve essere inferiore al 5% della superficie totale della sfera. Considerando il caso di una sfera con due porte di diametro unitario, la radianza prodotta da questa sfera è una funzione del diametro della sfera  $D_s$  per un flusso in entrata equivalente:

$$L_s \propto \frac{M}{D_s^2}$$

La radianza della sfera quindi dipenderà dal diametro della sfera e dalla riflettanza della sfera (contenuta all'interno del moltiplicatore)

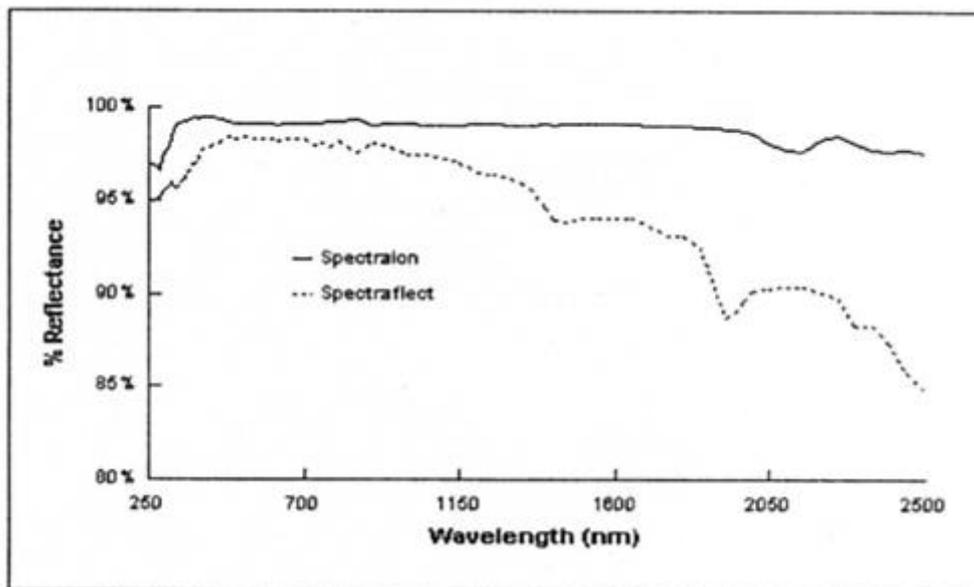


**Fig.2.1:** Variazione del moltiplicatore in funzione della frazione di finestre



**Fig.2.2:** Variazione del moltiplicatore in funzione del raggio della finestra

Dal grafico e dalla nostra legge si ricava che la sfera con diametro minore e riflettanza più alta produce la radianza più alta. La riflettanza della sfera è il secondo parametro che deve essere considerato, questa varia in base al rivestimento(coating ) della superficie interna della sfera , infatti la selezione di un diverso rivestimento può influire notevolmente sulla radianza della sfera. Per applicazioni nel VIS/NIR la sfera è realizzata con un rivestimento interno a BaSO<sub>4</sub> e ZnO, se si ha bisogno di una maggiore riflettanza e per applicazioni che vanno da 250 nm a 2500 nm (UV/VIS/NIR) conviene utilizzare lo Spectralon/Spectrafect Quest'ultimo materiale risulta essere particolarmente adatto all'applicazione qui considerata, in quanto esso presenta un'elevata riflettanza (generalmente superiore al 95% e addirittura superiore al 99% per alcuni intervalli di lunghezza d'onda) per radiazioni elettromagnetiche nello spettro dell'ultravioletto, del visibile, e del vicino infrarosso; inoltre esso mostra un comportamento altamente lambertiano ed è termicamente stabile fino a temperature superiori a 350°C, oltre ad essere idrofobico e chimicamente inerte rispetto a molte sostanze aggressive. Le proprietà ottiche e chimico-fisiche sopra descritte possono essere considerate sostanzialmente rappresentative delle proprietà richieste a detto materiale di rivestimento. Per applicazioni nell'infrarosso invece, la sfera è rivestita interiormente di uno strato d'oro.



**Fig. 2.3:** Curve di riflettanza di due coating : lo Spectralon e lo spectrafect

Un altro fattore importante per avere una sfera integratrice che funziona correttamente è che la radianza “uscente” dalla sfera non includa una porzione di flusso non integrato, questo introdurrebbe una falsa risposta. Per questo motivo si introducono all’interno della sfera dei Baffles: palette di dimensioni proporzionate a quelle della sfera e ricoperte dello stesso rivestimento della sfera che

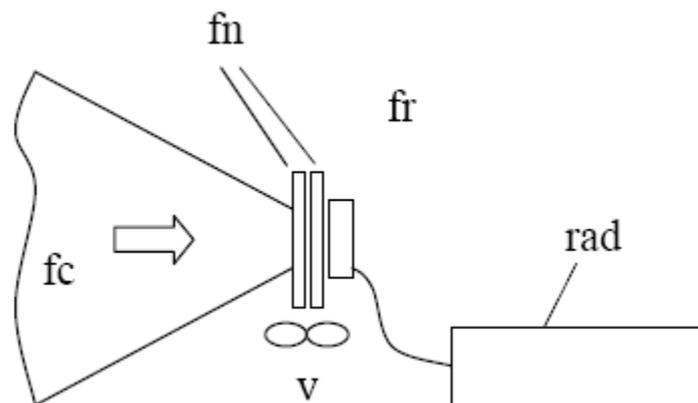
impediscono l'uscita al flusso incidente che non abbia fatto minimo due riflessioni all'interno della sfera, in modo da ottenere una buona integrazione della luce.

Le sfere utilizzate in commercio sono principalmente quelle in alluminio, queste sono prodotte con due differenti metodologie in base alla loro dimensione. Per sfere integratrici di grandi dimensioni (si utilizza il processo di imbutitura attraverso il quale una lamiera viene deformata plasticamente ed assume una forma scatolare, cilindrica o a coppa. Tali operazioni vengono effettuate attraverso l'uso di un punzone che spinge la lamiera, eventualmente fissata con un premilamiera, all'interno di una matrice. Se lo spessore della lamiera finale è troppo piccolo rispetto al diametro del disco di partenza allora bisognerà procedere per imbutiture successive.; se non si procede in questo modo si potrebbero formare grinze ed increspature dovute alle notevoli tensioni di compressione. Bisogna poi tenere conto che lo spessore del disco dovrà essere maggiore dello spessore della sfera che dovrà essere creata, perché durante l'imbutitura lo spessore dell'oggetto si assottiglia; in questo modo vengono prodotti i due "emisferi" della sfera integratrice che vengono poi saldati insieme e fatte le finestre necessarie. Per le sfere più piccole invece si prende un parallelepipedo nel quale viene scavata la forma della sfera/semisfera. Le sfere in alluminio però hanno alti costi di produzione dell'ordine di centinaia di euro per centimetro di diametro per questo la maggior parte delle sfere integratrici presenti nel laboratorio di ottica dell'università di Ferrara sono state prodotte cercando di abbattere i costi della produzione. Infatti per la loro produzione sono stati utilizzati come base alcuni globi in plastica (lampade da giardino/palle di natale ecc.), oggetti della vita comune o facilmente reperibili in ferramenta.

Le sfere a disposizione variano per il diametro e per la grandezza del foro, presente di default in tutte, ulteriori fori sono stati praticati alle sfere a seconda delle funzioni a cui devo adempire. Una volta praticati i fori la superficie interna delle sfere viene trattata con carta abrasiva in modo da renderne la superficie rugosa per una migliore aderenza e fissaggio del  $\text{BaSO}_4$  in sospensione nella soluzione di vinilica. Prima di depositare il  $\text{BaSO}_4$  per evitare perdite di luce si stende sulla superficie interna ed esterna uno strato di vernice bianca spray, quindi si vernicia la superficie interna con la soluzione contenente il  $\text{BaSO}_4$ , poi per riflettere verso l'interno la luce eventualmente dispersa si vernicia ulteriormente la parte esterna della sfera con vernice spray a effetto cromatura. Infine l'ultima mano di vernice spray viene data di colore nero per evitare riflessioni esterne di luce, non pertinenti comunque ai nostri scopi. In questo modo sono state ottenute sfere integratrici con buone capacità diffusive e di integrazione della luce con un costi contenuti.

### Capitolo 3 :Precedenti radiometri per radiazione concentrata:

La misura della radiazione solare (principalmente nell'intervallo da 300 a 2500 nm) può essere effettuata con diversi strumenti. Questi si differenziano tra loro nella risposta(A/W), nell'intervallo di potenza, nell'intervallo spettrale e per la temperatura entro la quale lavorano. Si hanno principalmente due tipi di foto rilevatori : quelli termici che lavorano in una banda spettrale che contiene la parte dello spettro di radiazione che ci interessa e quelli di tipo fotovoltaico che generalmente sono basti sul silicio cristallino che però hanno una sensibilità limitata all'intervallo spettrale compreso tra 0.3 e 1.1  $\mu\text{m}$ . Questi foto rilevatori però non possono essere utilizzati nel caso si debba misurare una radiazione concentrata questo perché la radiazione solare concentrata ha flussi luminosi che sono molto maggiori di 1 sole ( $1\text{KW}/\text{m}^2$ ). Per misurare la radiazione concentrata bisogna quindi utilizzare altri metodi. Si possono ad esempio utilizzare i flussimetri descritti precedentemente associati però ad un sistema di attenuazione dell'intensità della radiazione



**Fig. 3.1:**

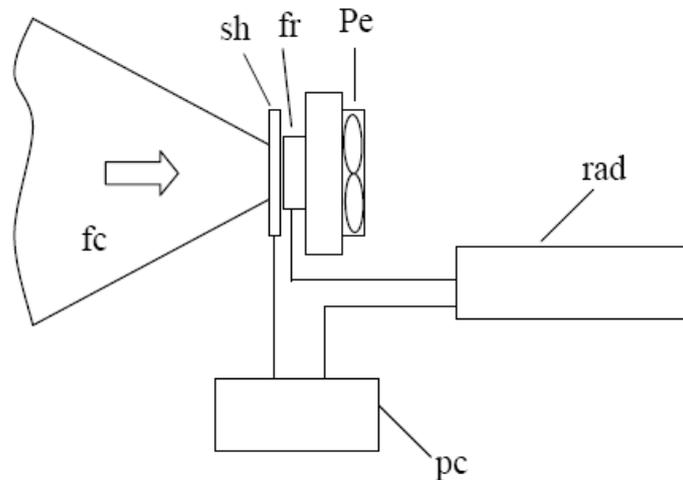
Schema di misura della radiazione concentrata col metodo dei filtri neutri (fn). (fc) fascio concentrato; (fr) fotorivelatore; (rad) radiometro; (v) ventola di raffreddamento.

Possono essere usati filtri neutri con densità ottica fino a circa  $OD=4$ , corrispondenti ad una trasmittanza di  $10^{-4}$ , che sono commercialmente disponibili, secondo lo schema di Figura 1.

Per flussi molto alti è possibile unire i singoli filtri, sommando in tal caso le loro densità ottiche. In Fig. 1 il fotorivelatore (fr) è protetto dalla radiazione concentrata (fc) tramite uno o più filtri neutri (fn),raffreddati dalla ventola (v), e la sua fotocorrente è letta dal radiometro (rad). Il metodo di misura illustrato in Fig. 1, comunque, presenta due principali difficoltà. La prima è che il filtro neutro, o il set di filtri neutri (fn), trasmette la radiazione incidente con una modalità che dipende dalla direzione di provenienza della luce, e quindi dalla divergenza locale del fascio, divergenza inevitabile in un fascio concentrato di radiazione. Il filtro neutro, inoltre, è soggetto ad un surriscaldamento tanto più alto quanto più lo è l'intensità della radiazione incidente e quindi

richiederebbe un adeguato raffreddamento.

Per intensità d'irraggiamento fino a poche centinaia di soli (200-300) possono essere misurate esponendo direttamente alla radiazione concentrata celle fotovoltaiche appositamente realizzate per i sistemi fotovoltaici a concentrazione



**Fig.3.2:**

Misura diretta della radiazione concentrata con celle solari che sopportano livelli di concentrazione fino a centinaia di soli. (sh) shutter; (Pe) sistema di raffreddamento Peltier; (pc) computer.

La cella a concentrazione (fr) è termoregolata da un sistema Peltier (Pe) ed esposta alla radiazione concentrata per un tempo breve (poche decine di msec) attraverso lo shutter (sh) comandato da un elaboratore (pc). La fotocorrente misurata dal radiometro (rad) è direttamente collegata al livello d'irraggiamento su (fr), a parità di spettro della radiazione, in virtù della proprietà di linearità tra fotocorrente e irraggiamento in una cella solare.

Il radiometro di Fig. 2 presenta alcuni inconvenienti: i) può operare soltanto con livelli di radiazione compatibili con quelli della cella solare a concentrazione impiegata (max  $\gg$  200-300 soli per celle al silicio cristallino), e il controllo del fattore di attenuazione, da effettuare ad esempio tramite un diaframma, non è né agevole né preciso; ii) per evitare il surriscaldamento della cella, la misura deve essere di tipo impulsivo, il che richiede una strumentazione elettronica adeguata; iii) la sua risposta in fotocorrente dipende in una certa misura dall'incidenza del fascio, ovvero dalla sua divergenza, essendo che la riflettività della cella non è costante con l'angolo d'incidenza; iv) la distribuzione dell'intensità della radiazione sulla cella non è uniforme; v) una cella solare a concentrazione, con area  $\gg$  1 cm<sup>2</sup>, non è il sensore ottimale per esplorare piccole zone del fascio.

## Capitolo 4 : Flussimetro DCR

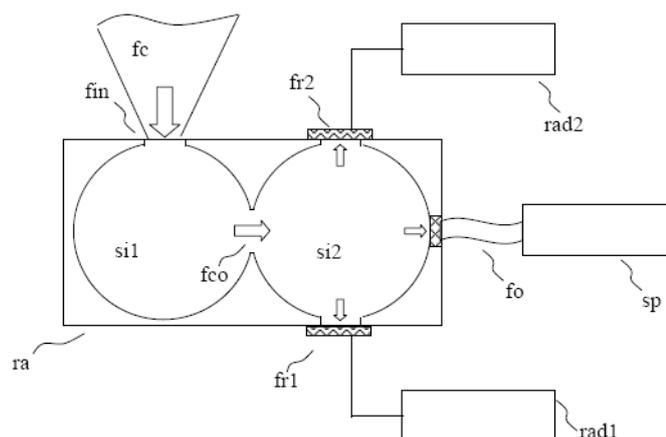
Per risolvere i problemi dei precedenti flussimetri si è realizzato una nuova tipologia di flussimetro per alte densità di flusso luminoso : il DCR acronimo inglese che sta per Double Cavity Radiomete; questo strumento si basa sull'uso di fotorivelatori convenzionali del tipo termico o fotovoltaico ai quali la radiazione perviene dopo aver subito un processo di integrazione spaziale e di attenuazione controllata all'interno di due cavità utilizzate come sfere integratrici. Le cavità integratrici sono costituite o da sfere integratrici comunicanti tra loro attraverso aperture regolabili, oppure da cavità scavate all'interno di un blocco di metallo e di un altro materiale facilmente lavorabile, anch'esse comunicanti tra loro attraverso aperture regolabili. Dal punto di vista ottico la loro funzione è però la stessa.

Il numero di cavità attraverso le quali la radiazione viene integrata e successivamente attenuata non è limitata a due, ma può essere anche superiore in base al grado di attenuazione della radiazione che si vuole raggiungere; la prima cavità seleziona la porzione del fascio da misurare, integra la radiazione al suo interno, ne seleziona ulteriormente una parte attraverso un'apertura posta tra le due cavità e praticata su un inserto rimovibile e la trasferisce alla seconda cavità; nella seconda cavità la luce viene ulteriormente integrata e perviene ai rivelatori previsti per la misura dell'intensità della radiazione.

I rivelatori di flusso sono tipicamente del tipo a fotodiode o rivelatore piroelettrico e sono affacciati direttamente all'interno della seconda cavità, sono presenti poi ulteriori porte di uscita per altri eventuali strumenti, quali una fibra ottica con la funzione di collegare la seconda cavità ad uno spettrometro/spettro radiometro.

### 4.1 Caratteristiche costruttive

Dal momento che il DCR è stato concepito come uno strumento semplice e maneggevole in modo da poterlo inserire in ogni tratto del fascio concentrato ed abbia un ingombro limitato si è deciso quindi di studiare la versione del flussimetro di tipo portatile:



**Fig.4.1.1:**Schema semplificato del DCR

Nella Figura1 si individuano le parti essenziali che caratterizzano il nostro flussimetro :

“ra” è il corpo principale del radiometro/base del radiometro/prisma

“Si1” è la prima cavità

“Si2” è la seconda cavità

“Fr1” è la finestra nella quale va inserito il fotorivelatore

“Fr2” è la finestra nella quale a inserito un eventuale secondo fotorivelatore

“Fo” è la finestra nella quale va inserita la fibra ottica

“Fco” è la porta di separazione tra le due cavità

“Fin” è la finestra d’ingresso dalla quale entra la radiazione

“Rad1” è il primo radiometro a bassa intensità

“Rad2”è il secondo radiometro a bassa intensità

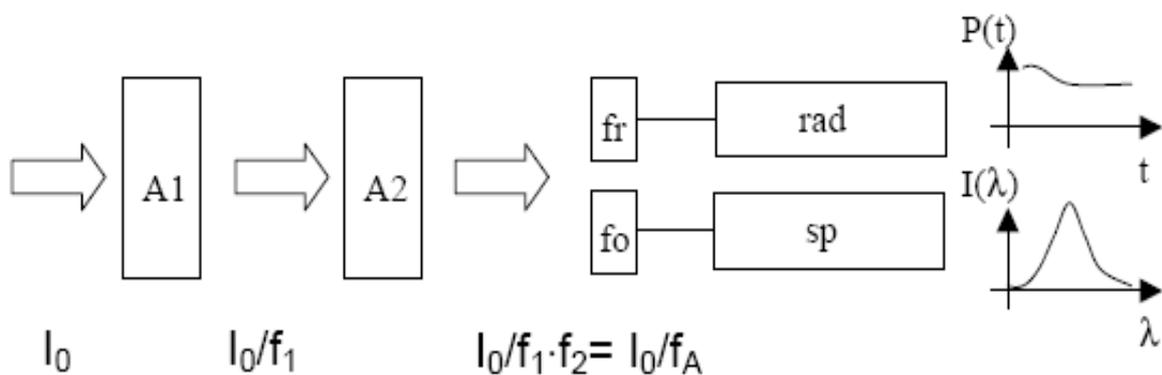
“Sp”è lo spettrometro

Il funzionamento del radiometro e delle sue componenti è il seguente: il fascio concentrato di radiazione solare incide dall’alto sulla finestra d’ingresso della prima cavità , come conseguenza si ha quindi che tutto il fascio è raccolto dalla prima cavità e integrato grazie alle particolari caratteristiche diffusive della parete interna rivestita con un coating di MgO, BaSO<sub>4</sub> o Spectralon; grazie a questa integrazione della radiazione l’ irradianza sulle pareti e sulle finestre della prima cavità è omogenea; parte della radiazione presente nella prima cavità è trasferita tramite la finestra di separazione alla seconda cavità che può essere di dimensioni uguali o diverse rispetto alla prima cavità, in questo modo anche la seconda cavità integra la radiazione proveniente della prima ed irraggerà in maniera omogenea la cavità e le finestre presenti in essa. La radiazione risulterà anche attenuata, perché il passaggio della radiazione dalla cavità alla cavità comporta un’attenuazione che si può calcolare conoscendo la geometria del radiometro, le proprietà riflettive delle sue pareti interne e di tutti i componenti affacciati alle singole cavità. La seconda cavità è corredata di una serie di sensori atti a misurare l’irradianza al suo interno; in particolare si tratta di fotorivelatori (fr1) del tipo a semiconduttore (fotodiodi), che hanno una risposta in frequenza non costante ma nota, a seconda del tipo di semiconduttore usato, e di fotorivelatori (fr2) di tipo piroelettrico, che hanno una risposta costante con la frequenza della radiazione e.m,entrambi i due tipi di rivelatori, collegati ai rispettivi moduli di controllo, rispettivamente (rad1) e (rad2), costituiscono un sistema di misura radiometrico a bassa intensità, e sono in grado, grazie all’introduzione delle due (almeno) cavità, di misurare le potenze incidenti del fascio concentrato ben al di là dei loro limiti. La seconda cavità è collegata, tramite la fibra ottica (fo), anche ad uno spettrometro (sp) che misura la distribuzione spettrale dell’intensità della radiazione al suo interno. Questa distribuzione, in condizioni di risposta piatta della riflettanza delle pareti del radiometro, corrisponde alla distribuzione dello spettro della radiazione all’ingresso del radiometro.

La Fig. 1 mostra schematicamente, attraverso l'uso di frecce più o meno grandi, anche l'andamento dell'intensità della radiazione, a partire dall'ingresso (fino a quando essa è trasferita da (si1) a (si2) tramite l'apertura (fco) e infine quando giunge, attenuata, ma di pari intensità, sui tre rivelatori (fr1), (fr2) e (fo).

Possiamo vedere il funzionamento del DCR come una serie di blocchi, l'intensità del fascio incidente in ingresso al radiometro,  $I_0$ , viene attenuata una prima volta dal blocco A1, costituito dalla prima cavità integratrice, con un fattore di attenuazione  $f_1$ , poi la radiazione arriva al blocco attenuatore A2, costituito dalla seconda cavità, dove la sua intensità viene ulteriormente attenuata di un fattore  $f_2$  e quindi diventa pari a  $I_0/f_1f_2 = I_0/f_A$ .

Questo schema può essere così rappresentato :

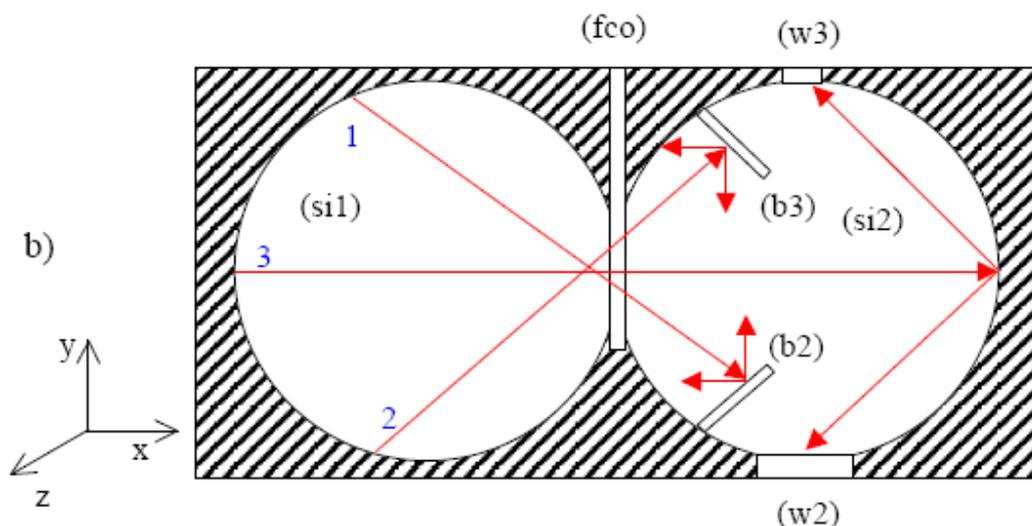


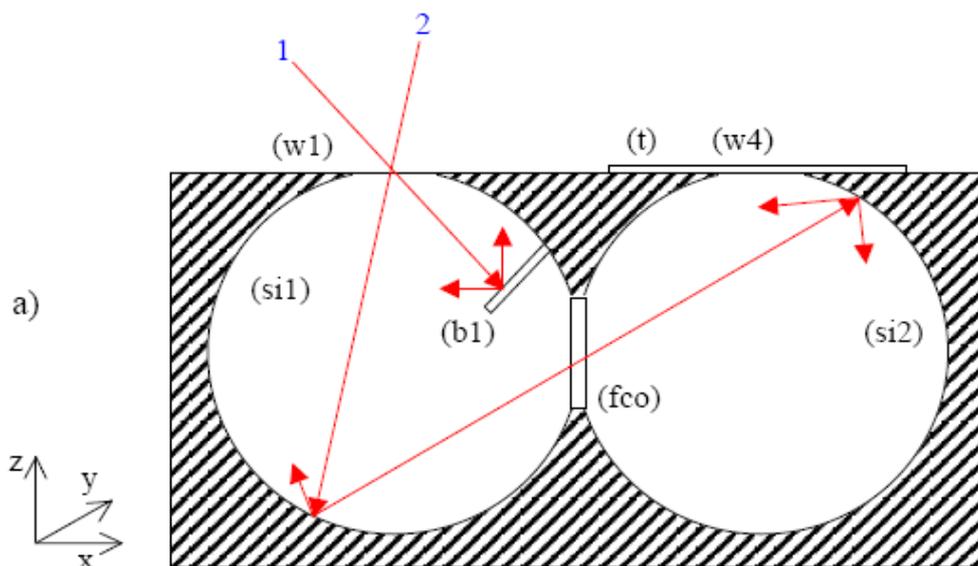
**Fig.4.1.2:**Schema a blocchi del radiometro DCR

$P(t)$  misura della potenza in funzione del tempo;

$I(\lambda)$  misura dell'intensità in funzione della lunghezza d'onda

Oltre agli elementi essenziali illustrati nella Fig.1 all'interno del DCR sono presenti palette o schermi ("baffles") che servono a ridurre le interferenze che si manifestano tra i vari componenti affacciati all'interno delle sfere integratrici e ad impedire eventualmente che la radiazione non integrata venga rilevata dagli strumenti dando luogo ad errori nella misura; i baffles saranno ricoperti dallo stesso coating che riveste le pareti delle cavità integratrici.





**Fig.4.1.3:**

a) **Vista laterale**, ottenuta per sezione verticale del prisma, di un prototipo del radiometro a doppia cavità, DCR. E' mostrato come, per effetto della paletta (b1), la luce entrante in (w1) non passi direttamente nella seconda cavità (si2), ma soltanto dopo almeno una riflessione nella prima cavità (si1).

b) **Vista dall'alto**, ottenuta per sezione orizzontale del prisma, del radiometro a doppia cavità,

DCR, è mostrato come, per effetto delle palette (b2) e (b3), la luce proveniente dalla prima cavità (si1) non possa raggiungere direttamente le finestre (w2) e (w3),rispettivamente, ma soltanto dopo almeno una riflessione nella seconda cavità (si2).

Nella sua configurazione completa, il radiometro DCR è corredato di altri componenti che ne rendono più affidabile il funzionamento, il corpo o base del radiometro (ra) è generalmente protetto nella sua parte anteriore, quella rivolta al fascio concentrato, da un pannello o schermo frontale, tipicamente di metallo, lucidato o rivestito di un rivestimento altamente riflettente, che ha lo scopo di ridurre il calore trasferito dalla radiazione incidente alla base del radiometro. Le pareti della prima cavità, quella che raccoglie il fascio incidente, sono esternamente circondate da una serie di radiatori alettati funzionanti a convezione d'aria che facilitano lo smaltimento del calore prodotto al suo interno per effetto della non perfetta riflettività delle pareti, evitando quindi che un surriscaldamento della cavità determini il deterioramento o il distacco del rivestimento diffusivo. Questi radiatori limitano inoltre il calore trasmesso per conduzione dalla prima alla seconda cavità e quindi ai sensori ivi presenti, la porta di separazione tra le due cavità non è fissa, ma è realizzata attraverso una serie di inserti provvisti di un'apertura circolare di diametro variabile, che vengono inseriti uno alla volta tra le due cavità in un'apposita fenditura, determinando un valore particolare per il fattore di attenuazione  $fA$ .

Un ulteriore miglioramento del radiometro DCR consiste nella termoregolazione dei fotorivelatori (fr1) e (fr2), i quali, per effetto della variazione discreta del fattore di attenuazione determinato dall'inserto usato, sono soggetti ad un irraggiamento non costante durante le misure e ciò determina una differenza della loro temperatura che altera il valore misurato della fotocorrente, e quindi della potenza incidente ricavata a partire da essa, se non si operano le correzioni alla fotocorrente per effetto della temperatura; per assicurare quindi una maggiore stabilità e precisione di misura, è indispensabile realizzare un sistema di termoregolazione dei fotorivelatori, ad esempio con un sistema Peltier; questo accorgimento è ancora più necessario quando si lavora all'aperto, in condizioni di forti escursioni termiche. Il radiometro descritto non è limitato necessariamente a due cavità, ma può essere costituito da più cavità che permettono una maggiore attenuazione dell'intensità della luce incidente, il radiometro quindi opera l'attenuazione del fascio concentrato per interposizione di una serie di cavità integratrici successive, poste una in serie all'altra, tra l'ingresso del fascio e l'uscita ai fotorivelatori; l'uso di almeno due cavità è dettato dalla necessità di operare un' attenuazione controllata della radiazione attraverso gli inserti ad apertura variabile, inclusi in una fenditura interposta tra le sfere. L'uso di una singola cavità integrante avrebbe sì l'effetto di attenuare la radiazione incidente, ma di un fattore più basso, ed inoltre il fattore di attenuazione non potrebbe essere regolato adeguatamente, soprattutto entro i limiti richiesti da uno strumento universale, progettato per la misura di intensità luminose estremamente variabili; oltre a ciò, la necessità di regolare il fattore di attenuazione richiederebbe l'uso di schermi posti davanti al fotorivelatore e ciò comporterebbe un'interferenza con l'operazione d'integrazione della radiazione da parte della cavità.

#### 4.2: Applicazione della teoria delle sfere integratrici al radiometro

Come detto in precedenza il DCR è assimilabile a due sfere integratrici collegate da un foro di area variabile, questo permette di sfruttare la teoria delle sfere integratrici per ricavare una legge che legghi il flusso(o potenza) in uscita al flusso(o potenza) in entrata in modo da ottenere il fattore di attenuazione del radiometro ( $F_a = \Phi_{in}/\Phi_{out}$ ). Lo schema che si considera è un caso generale, consideriamo infatti un radiometro formato da due sfere con dimensioni non fissate( per semplicità però le sfere sono uguali) e con finestre che variano nel numero, nelle dimensioni e nella riflettività.

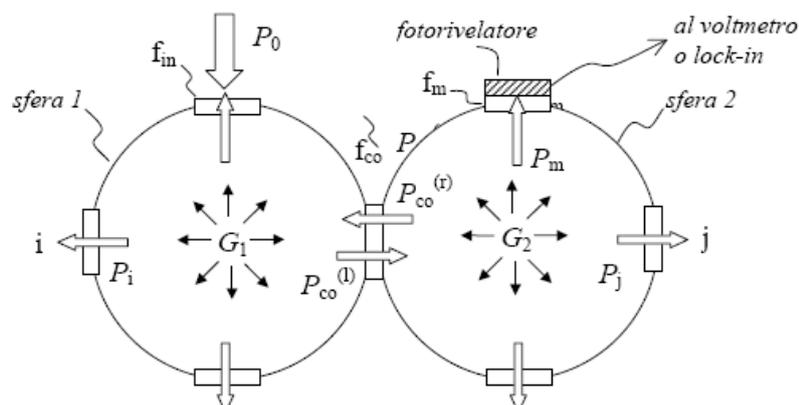


Fig. 4.2.1: Radiometro visto come accoppiamento di sfere integratrici

Nella figura 4.2.1 distinguiamo la porta “in” dove entra il fascio concentrato, la porta “co” che accoppia le due sfere e la porta “m” dove si misura la radiazione, le porte i-esima e j-esima sono rispettivamente le porte generiche della sfera 1 e della sfera 2.

Applichiamo ora il teorema della conservazione del flusso radiante, ovvero dell’energia che fluisce nella sfera 1 o nella sfera 2, eguagliando la potenza (flusso) in ingresso alla somma delle potenze in uscita, queste ultime comprendono sia le potenze in uscita dalle porte aperte ( $R=0$ ), che il calore dissipato dalle porte chiuse e dalla parete interna della sfera.

Per la prima sfera:

$$P_0 + P_{co}^{(r)} = \sum_{i=1}^{N1} P_i + P_{p1} \quad (4.2.1)$$

$$P_0 + G_2 * S_{co} = \sum_{i=1}^{N1} (G_1 * S_i * (1 - R_i)) + G_1 * S_{p1} * (1 - R_{p1}) \quad (4.2.2)$$

Analogamente per la seconda sfera:

$$P_{co}^{(l)} = \sum_{j=1}^{N2} P_j + P_{p2} \quad (4.2.3)$$

$$G_1 * S_{co} = \sum_{j=1}^{N2} (G_2 * S_j * (1 - R_j)) + G_2 * S_{p2} * (1 - R_{p2}) \quad (4.2.4)$$

Dove :

$P_0$  = potenza del fascio in ingresso alla sfera 1;

$P_i$  = potenza in uscita dalla porta i-esima (nella sfera 1);

$P_j$  = potenza in uscita dalla porta j-esima (nella sfera 2);

$P_{co}^{(r)}$  = potenza in ingresso nella sfera 1 proveniente dalla porta  $f_{co}$  (da destra);

$P_{co}^{(l)}$  = potenza in ingresso nella sfera 2 proveniente dalla porta  $f_{co}$  (da sinistra);

$P_{p1}$  = potenza dissipata sulla parete della sfera 1;

$P_{p2}$  = potenza dissipata sulla parete della sfera 2;

$G_1$  = irradianza all’interno della sfera 1;

$G_2$  = irradianza all’interno della sfera 2;

$S_i$  = area della porta i-esima (nella prima sfera);

$R_i$  = riflettanza della porta i-esima (nella prima sfera);

$S_{co}$  = area dell’apertura tra le due sfere;

$S_j$  = area della porta j-esima;

$R_j$  = riflettanza della porta j-esima;

$R_{p1}$  = riflettività della sfera 1;

$R_{p2}$  = riflettività della parete della sfera 2;

$N_1$  = numero delle porte della sfera 1;

$N_2$  = numero delle porte della sfera 2;

Le equazioni precedenti hanno validità fintanto che si ha una corretta integrazione spaziale della radiazione all'interno delle due sfere, questo implica, come detto in precedenza che la superficie complessiva delle aperture sia inferiore al 5% della superficie totale della sfera.

Dalle equazioni 4.2.1; 4.2.2 ; 4.2.3 ; 4.2.4 si ricavano le equazioni per l'irradianza all'interno delle due sfere.

$$G_1 = \frac{P_0 * [\sum_{j=1}^{N_2} S_j(1 - R_j) + S_{p2}(1 - R_{p2})]}{[\sum_{i=1}^{N_1} S_i(1 - R_i) + S_{p1}(1 - R_{p1})] * [\sum_{j=1}^{N_2} S_j(1 - R_j) + S_{p2}(1 - R_{p2})]} - S_{co}^2 \quad (4.2.5)$$

$$G_2 = G_1 \frac{S_{co}}{\sum_{j=1}^{N_2} S_j(1 - R_j) + S_{p2}(1 - R_{p2})} \quad (4.2.6)$$

Da qui si può ricavare il loro rapporto:

$$\frac{G_1}{G_2} = \frac{\sum_{j=1}^{N_2} S_j(1 - R_j) + S_{p2}(1 - R_{p2})}{S_{co}} \quad (4.2.7)$$

Dall'equazione 1.6 si vede che  $G_1$  è maggiore di  $G_2$  e che le due grandezze stanno tra di loro come la totalità delle aree assorbenti della sfera 2(porte e parete), pesate secondo le loro rispettive assorbanze  $A_j = (1-R_j)$ , stanno rispetto all'area della porta di accoppiamento ( $f_{co}$ ).

Nell'equazione 1.4 possiamo riscrivere  $P_0$  come :

$$P_0 = G_0 S_{in} \quad (4.2.8)$$

Dove  $G_0$  è l'irradianza media del fascio entrante nella sfera 1 e  $S_{in}$  l'area della porta d'ingresso.

Analogamente la potenza luminosa incidente sulla porta "m" di area  $S_m$  sarà data:

$$P_m = G_2 S_m \quad (4.2.9)$$

Sostituendo poi in questa la formula della radianza della seconda sfera(4.2.6):

$$P_m = G_1 \frac{S_{co}}{\sum_{i=1}^{N_1} S_i(1 - R_i) + S_{p1}(1 - R_{p1})} S_m \quad (4.2.10)$$

Ora sostituiamo la formula della radianza della prima sfera (4.2.5)

$$P_m = \frac{S_{co} S_m S_{in} G_0}{[\sum_{i=1}^{N_1} S_i(1 - R_i) + S_{p1}(1 - R_{p1})] * [\sum_{j=1}^{N_2} S_j(1 - R_j) + S_{p2}(1 - R_{p2})]} - S_{co}^2$$

(4.2.11)

Dalle equazioni dell'irradianza delle sfere riusciamo a ricavare i fattori di attenuazione delle singole sfere  $f_1$  e  $f_2$  e del radiometro nella sua totalità  $F_A$ .

Il fattore di attenuazione della prima sfera sarà dato dal rapporto dell'irradianza media in ingresso alla sfera (che equivale a quella in ingresso al radiometro  $G_0$ ) e dell'irradianza della prima sfera ( $G_1$ ).

$$f_1 = G_0/G_1 = \frac{[\sum_{i=1}^{N_1} S_i(1 - R_i) + S_{p1}(1 - R_{p1})] * [\sum_{j=1}^{N_2} S_j(1 - R_j) + S_{p2}(1 - R_{p2})] - S_{co}^2}{[\sum_{i=1}^{N_1} S_j(1 - R_j) + S_{p2}(1 - R_{p2})] S_{in}} \quad (4.2.12)$$

Il fattore di attenuazione della seconda è stato ricavato già precedentemente eq. 4.2..7

$$f_2 = G_1/G_2 = \frac{\sum_{j=1}^{N_2} S_j(1 - R_j) + S_{p2}(1 - R_{p2})}{S_{co}} \quad (4.2.13)$$

Il fattore di attenuazione del radiometro sarà dato dal rapporto della radianza in entrata al radiometro ( $G_0$ ) e dalla radianza che "incide" sulla finestra "m" dove è posto il foto rivelatore che è quella della sfera  $G_2$ .

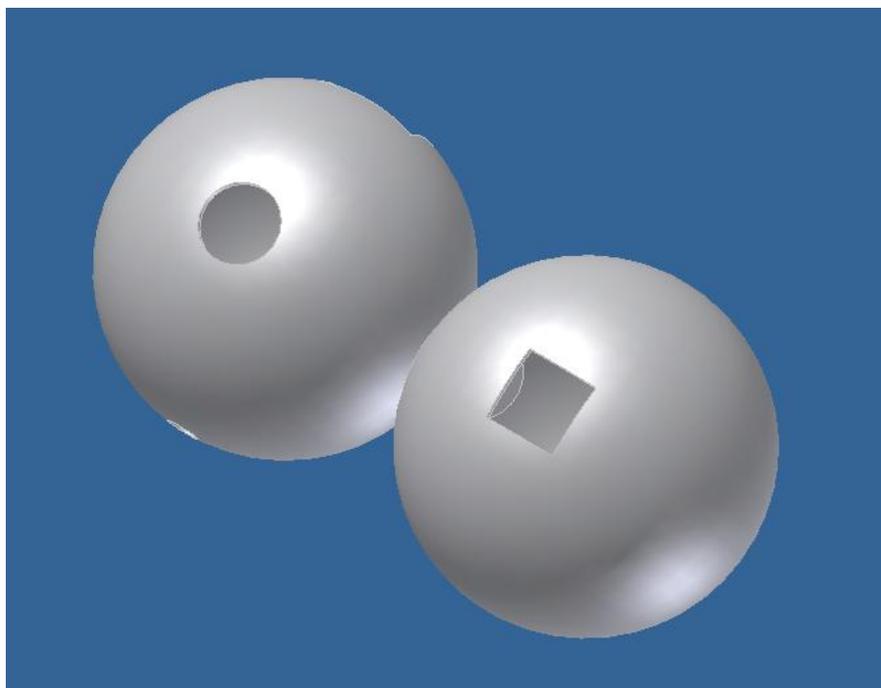
$$F_A = G_0/G_2 = f_1 f_2 = \frac{[\sum_{i=1}^{N_1} S_i(1 - R_i) + S_{p1}(1 - R_{p1})] * [\sum_{j=1}^{N_2} S_j(1 - R_j) + S_{p2}(1 - R_{p2})] - S_{co}^2}{S_{in} S_{co}} \quad (4.2.14)$$

Dall'equazione del fattore di attenuazione del DCR vediamo come era plausibile che l' $F_A$  diminuisse all'aumentare dell'area della porta d'ingresso, all'aumentare della porta intermedia e all'aumentare dell'assorbimento della luce da parte della parete delle due sfere e da parte delle finestre, possiamo quindi far variare il fattore di attenuazione del DCR cambiando l'area d'ingresso e l'area della porta intermedia, ma anche attraverso la scelta della riflettività della parete delle sfere. Operare con la riflettività delle sfere però non è conveniente dal momento che la riflettività di parete nelle sfere integratrici influisce sulla capacità di integrare la luce e quindi sul corretto funzionamento del radiometro, inoltre lavorando con riflettività troppo bassa delle sfere si avrà un surriscaldamento del corpo del radiometro, quindi non è consigliabile lavorare su questo elemento per aumentare o diminuire il fattore di attenuazione.

### 4.3: Modellazione Ottica del DCR

Dal momento che non si è in possesso del prototipo del DCR che si trova all'ENEA di Portici(NA), si è "costruito" il flussimetro attraverso un programma di CAD (AutoDesk Inventor 2008), nel fare questo sono state mantenute le dimensioni ed il numero di porte indicate nel brevetto del DCR, si è utilizzato quindi per le misurazioni un flussimetro con le seguenti parti e dimensioni:

- A) Diametro delle due sfere pari a 5cm;
- B) Porta d'ingresso di forma quadrata di area  $S_{in} = 1,21\text{cm}^2$  (1,1 cm x 1,1 cm );
- C) Porta dove è posizionato il fotorivelatore di forma quadrata di area  $S_m = 2,25\text{cm}^2$ (1,5cm x 1,5cm);
- D) Porta per la fibra ottica di forma circolare di area  $0,196\text{cm}^2$  ;
- E) Porta per strumentazione ausiliaria di forma circolare di area  $1,06\text{cm}^2$ ;
- F) Apertura di separazione delle due sfere di area variabile da 0,1 a  $2\text{cm}^2$ ;
- G) Tappo per la porta ausiliaria di forma quadrata di lato 4 cm(nel caso non venga utilizzata la porta E);
- H) Baffles circolari di diametro 12 mm;

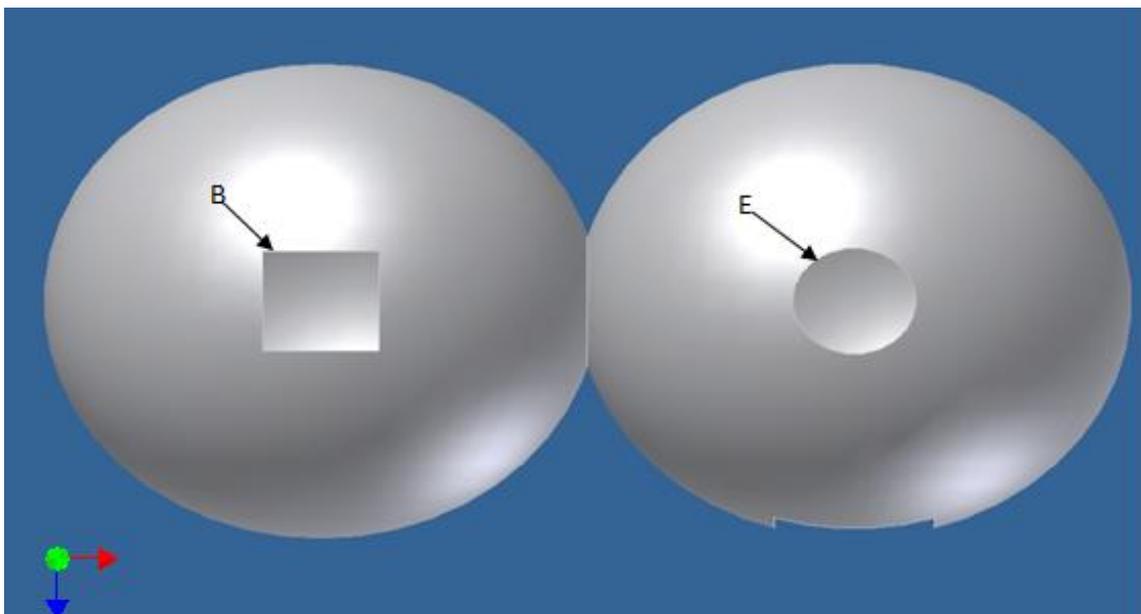


**Fig.4.3.1:** DCR realizzato in AutoDesk

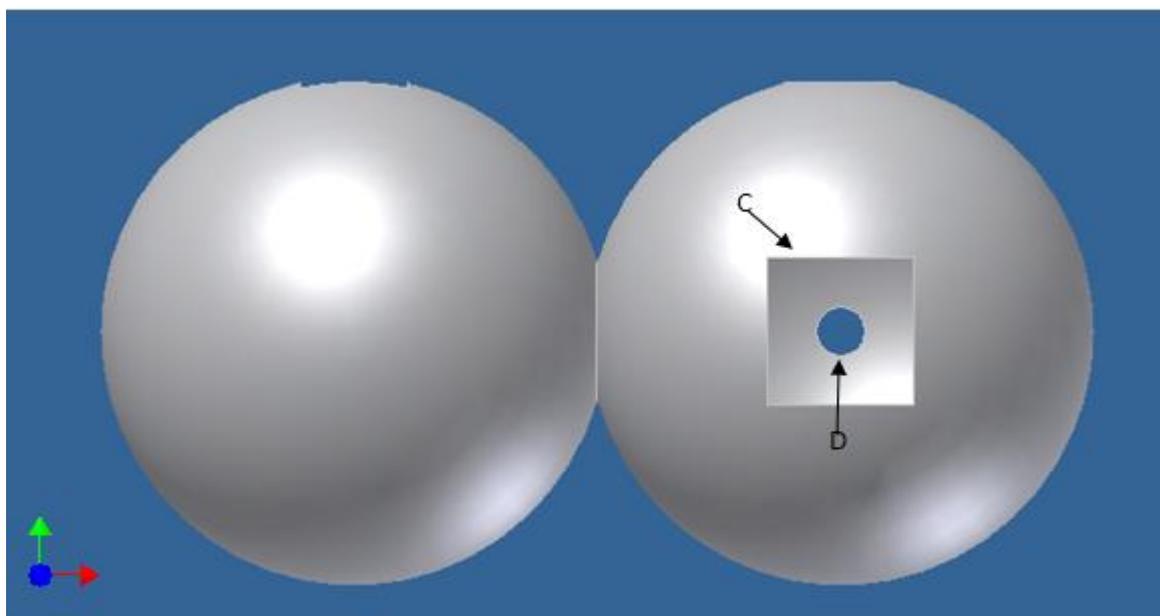
Le porta d'ingresso e quella ausiliaria si devono trovare sullo stesso piano e, perpendicolare a questo, si deve trovare il piano in cui giacciono la porta d'uscita e la porta per la fibra ottica.

Nelle immagini seguenti si è indicato il sistema di riferimento con

-  Indica l'asse X
-  Indica l'asse Y
-  Indica l'asse Z

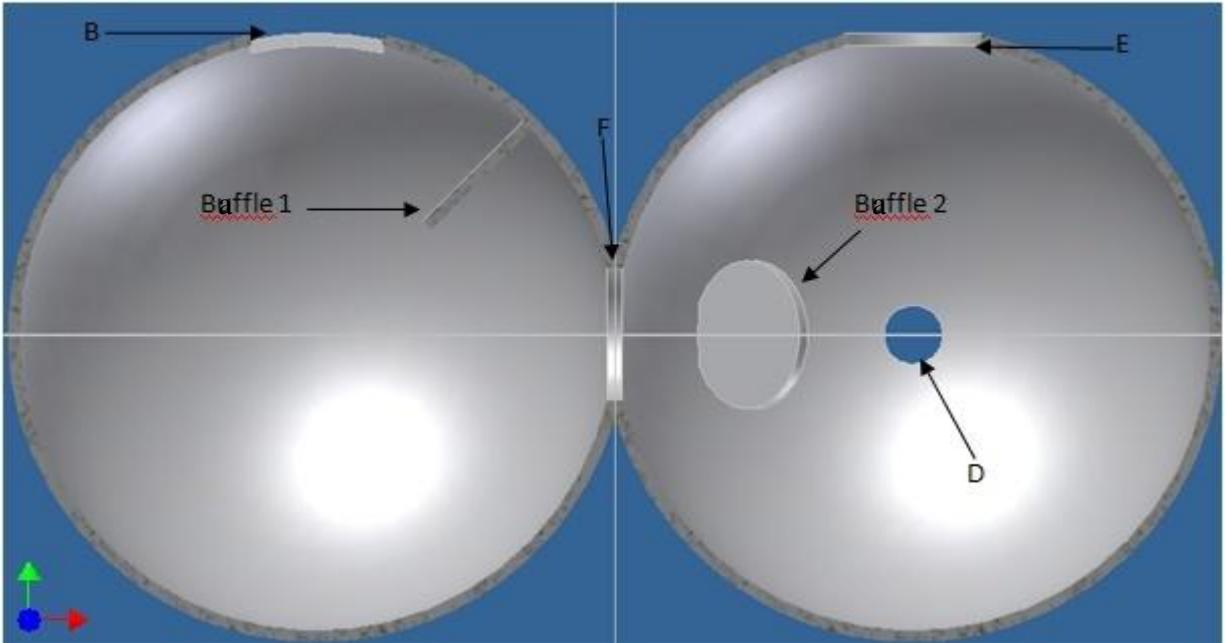


**Fig.4.3.2:** Vista del DCR nel piano X-Z

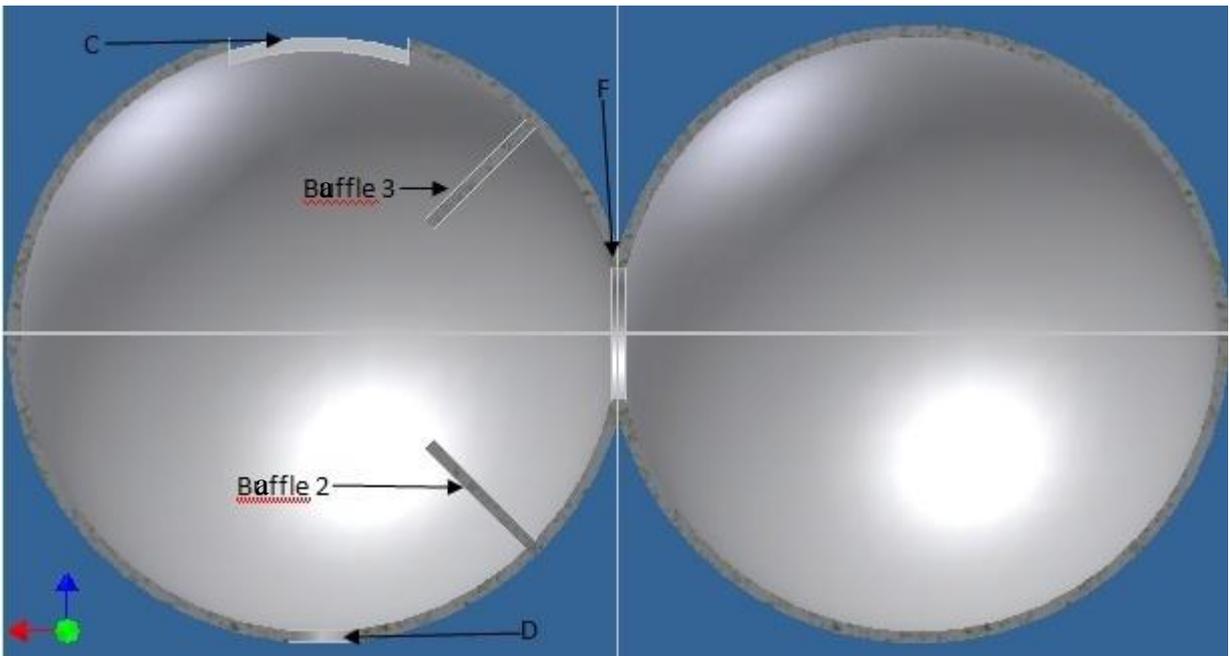


**Fig 4.3.3:** Vista del DCR nel piano X-Y

Sono presenti in totale all'interno del DCR tre baffles : uno nella prima sfera e due nella seconda, rispettivamente per non far passare la luce entrata dalla finestra d'ingresso direttamente nella seconda sfera e per non far arrivare la luce proveniente dalla porta intermedia direttamente alla porta del fotorivelatore ed alla porta della fibra ottica.

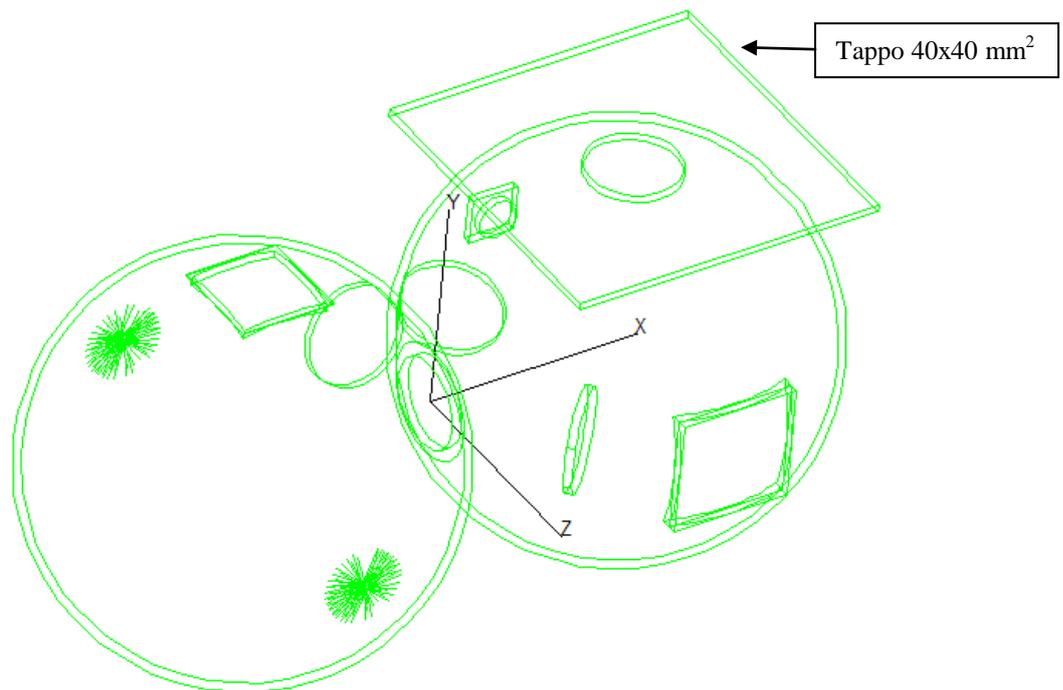


**Fig.4.3.4:** Sezione del DCR nel piano X-Z



**Fig.4.3.5:** Sezione del DCR nel piano X-Y

Successivamente per studiare le proprietà ottiche del DCR sono stati “esportati” i flussimetri creati con AutoDesk in un programma di simulazione di ottica :TracePro.

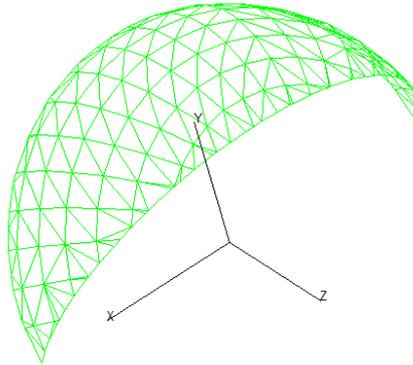


**Fig.4.3.6:**Il DCR in TracePro

Per primi sono stati inseriti dei prismi in ognuna delle “finestre” del flussimetro, ad ognuno di questi e al DCR sono state date delle proprietà di superficie: le due sfere, i baffles e la superficie della porta di collegamento hanno una riflettanza  $R_w$  che può variare dal 92% al 99% (in relazione alle esigenze), sono superfici che si comportano come diffusori lambertiani il prisma posizionato nella porta d’ingresso (messo solo per comodità) in modo che i raggi che escono dalla prima sfera, a causa delle riflessioni della stessa, vengano bloccati e quello posizionato nella finestra d’uscita hanno un’assorbanza del 100% e sono quindi dei perfetti assorbitori, il prisma della fibra ottica ha una riflettanza del 4% e quindi un totale di assorbanza e trasmittanza pari al 96%, questa proprietà di superficie è stata predisposta ad hoc per simulare al meglio il caso reale in cui nella porta per la fibra ottica vi sia effettivamente inserita una fibra ottica; il tappo che si è posizionato per chiudere la porta ausiliaria è stato introdotto in tutte le misure perché non si ha necessità di utilizzare la finestra ausiliaria, le caratteristiche di superficie del tappo sono le stesse della parete della sfera. Una volta che sono stati impostati questi parametri si eseguono una prima serie di simulazioni volte a verificare che le due sfere e l’intero dispositivo DCR che sono stati creati lavorino come previsto.

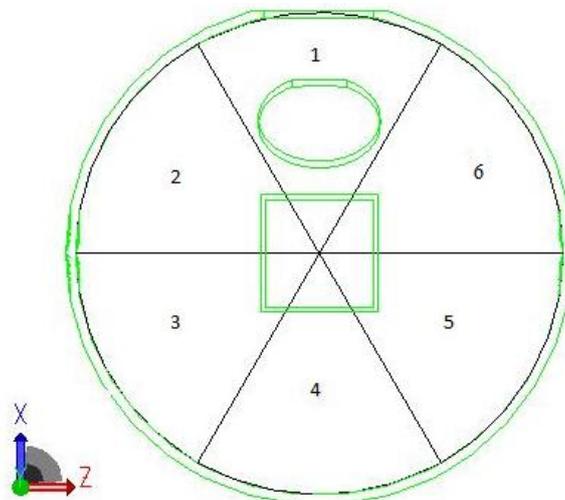
### 4.3.1: Analisi del flusso all'interno DCR

Le due sfere per lavorare da buoni dispositivi che integrano la luce devono avere una distribuzione omogenea del flusso sulla totalità della pareti della sfera; queste simulazioni verranno fatte prendendo il DCR con porta intermedia avente area  $1\text{cm}^2$  e riflettanza di parete pari 95% (valore medio tra quelli che avevamo a disposizione). Per fare ciò si è inserito all'interno delle due sfere uno spicchio di superficie (superficie ideale senza spessore che è stata creata in AutoDesk e poi esportata in TracePro)



**Fig.4.3.1.1:**Spicchio di superficie .

che prende un sesto della superficie della sfera ed è sottesa da un angolo al centro pari a  $60^\circ$ , a questo spicchio di superficie non si applicano proprietà ottiche superficiali, per questo motivo i raggi luminosi simulati non vi interagiscono. Una volta completata la simulazione (che per essere una buona simulazione deve essere fatta minimo con 100000 raggi) si prende la mappa d'irradianza dello spicchio e se ne rileva il flusso dei raggi incidenti; per la prima sfera si prende come asse di rotazione degli spicchi l'asse parallelo all'asse Y passante per il centro della sfera, per avere la maggior simmetria, dal momento che in questo modo ogni spicchio avrà al suo "interno" un uguali parti della porta d'ingresso dalla quale perviene il flusso concentrato ancora non integrato.

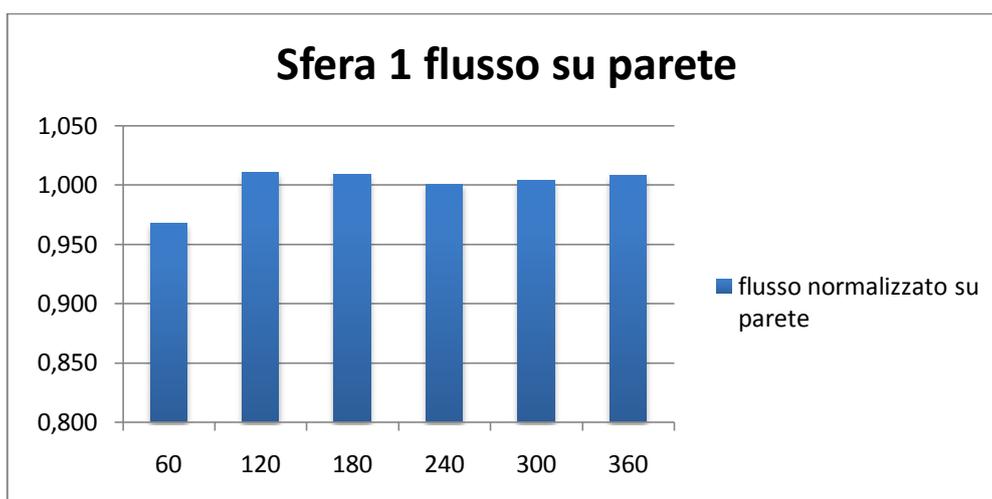


**Fig.4.3.1.2:** Sfera 1 DCR con i sei spicchi di superficie  
vista nel piano X-Z

Per la prima sfera sono state fatte simulazioni da 100000 raggi ed ad ogni raggio è associata una potenza pari ad 1W per una potenza totale del flusso in ingresso di 100000 W.

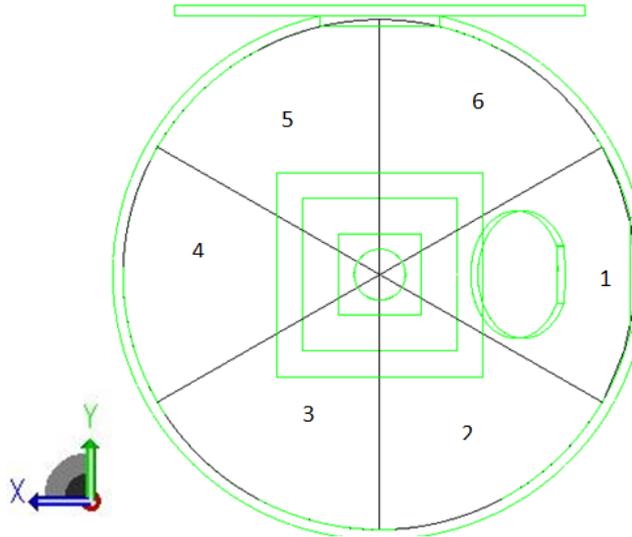
Da queste simulazioni sono stati ricavati i seguenti dati:

Spicchio della sfera	Flusso sullo spicchio in W	Flusso normalizzato
1	4,27E+05	0,968
2	4,46E+05	1,011
3	4,45E+05	1,009
4	4,42E+05	1,001
5	4,43E+05	1,004
6	4,45E+05	1,008



Dalla tabella si nota che il flusso incidente sul singolo spicchio è maggiore del flusso luminoso entrante nel dispositivo DCR, questo perché dal momento che i nostri spicchi di superficie non interagiscono con i raggi luminosi, vengono colpiti sia quando il raggio sta per incidere sulla superficie della sfera sia quando il raggio ha appena inciso la superficie; dal momento però che questa è una caratteristica comune a tutti gli spicchi possiamo prendere come buona questo tipo di misura. Dall'istogramma si vede che il flusso su ogni spicchio è pressoché costante, solo il primo spicchio ha un flusso minore, questo molto probabilmente è imputabile al fatto che in quella parte di sfera si trova anche la porta di collegamento delle due sfere, si può quindi considerare il flusso sulla parete della prima sfera costante e ben integrato.

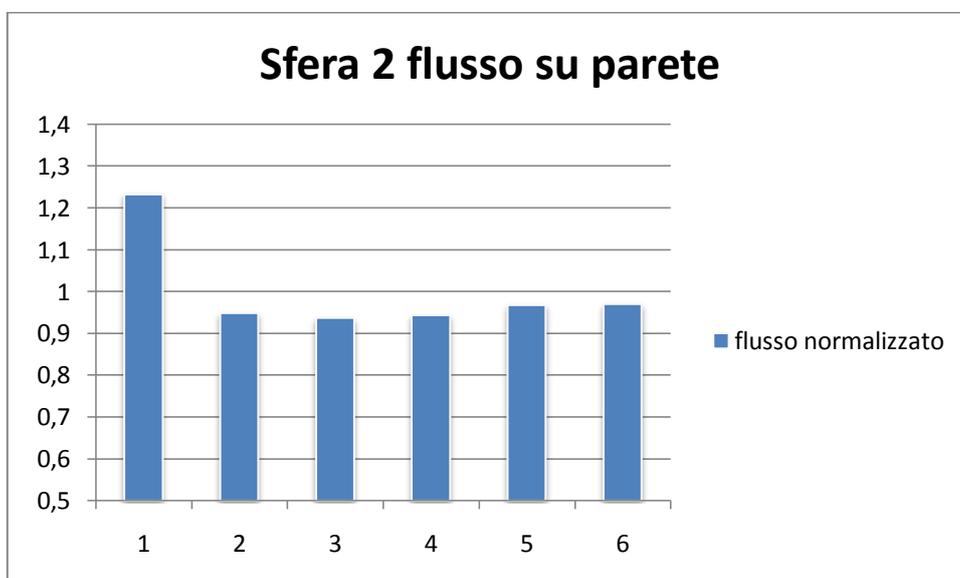
Per la seconda sfera invece si prende come asse di rotazione degli spicchi l'asse parallelo all'asse Z che passa per il centro della sfera, in modo che ogni spicchio di superficie contenga parte dell'uscita e parte della fibra ottica. Anche in questo caso sono state fatte simulazioni da 100000 raggi con ogni raggio avente una potenza di 1 W.



**Fig.4.3.1.2** : Sfera 2 DCR con i sei spicchi  
vista nel piano X-Y

Da queste simulazioni sono stati ricavati i seguenti dati:

Spicchio della sfera	Flusso sullo spicchio in W	flusso normalizzato
1	6,13E+04	1,232871757
2	47215	0,948911711
3	46616	0,936873204
4	46937	0,943324557
5	48161	0,967924111
6	48269	0,97009466

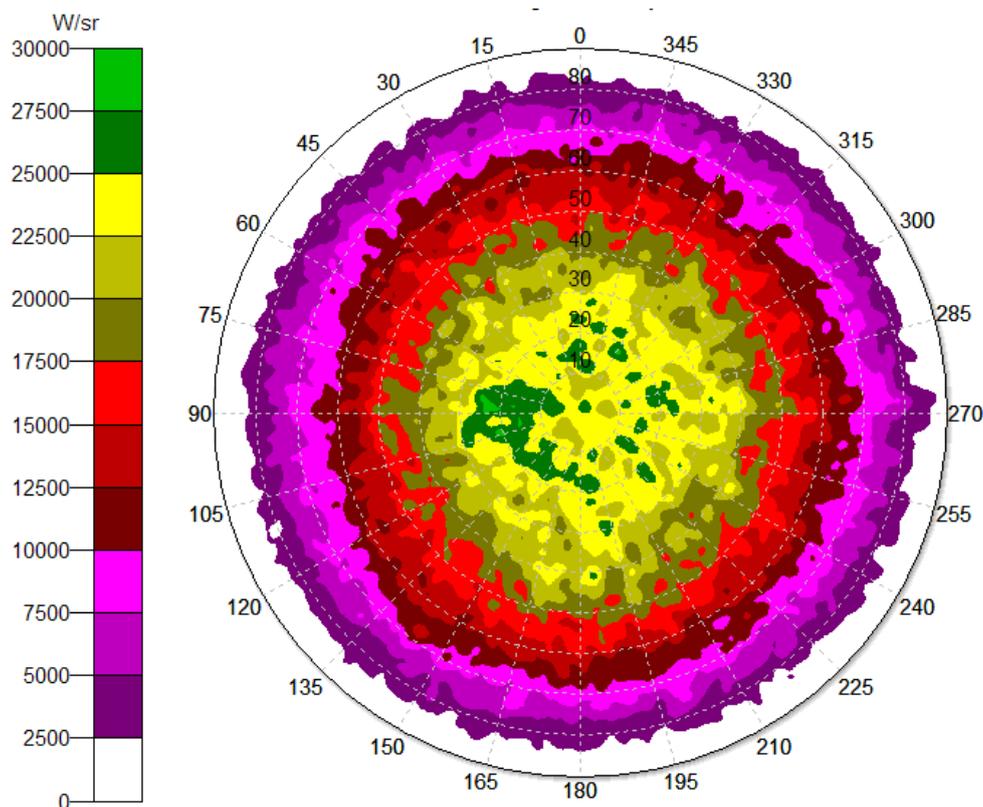


Dalla tabella e dal grafico si evince che anche per la seconda sfera il flusso su ogni spicchio è pressoché costante, fatta eccezione per il primo che presenta un flusso maggiore, questo perché il primo spicchio si trova nella porzione di sfera dove è presente la porta di collegamento tra le due sfere, da dove proviene il flusso integrato solo dalla prima sfera e quindi è più energetico, si può dire quindi che anche la seconda sfera integra in modo corretto il flusso luminoso.

Una volta constatato che le due sfere sono dei buoni dispositivi integratori presi singolarmente si è andato ad indagare se il DCR nel suo complesso integra luce. Dal momento che il DCR in prima approssimazione è l'accoppiamento di due sfere integratrici, la luce che ne esce deve essere di tipo lambertiano quindi con l'intensità della luce emessa che va come il coseno dell'angolo polare, per questo motivo si è aperto il DCR (si è tolto il prisma che chiudeva l'uscita) e si è studiata la distribuzione di angolo dell'intensità dei raggi.

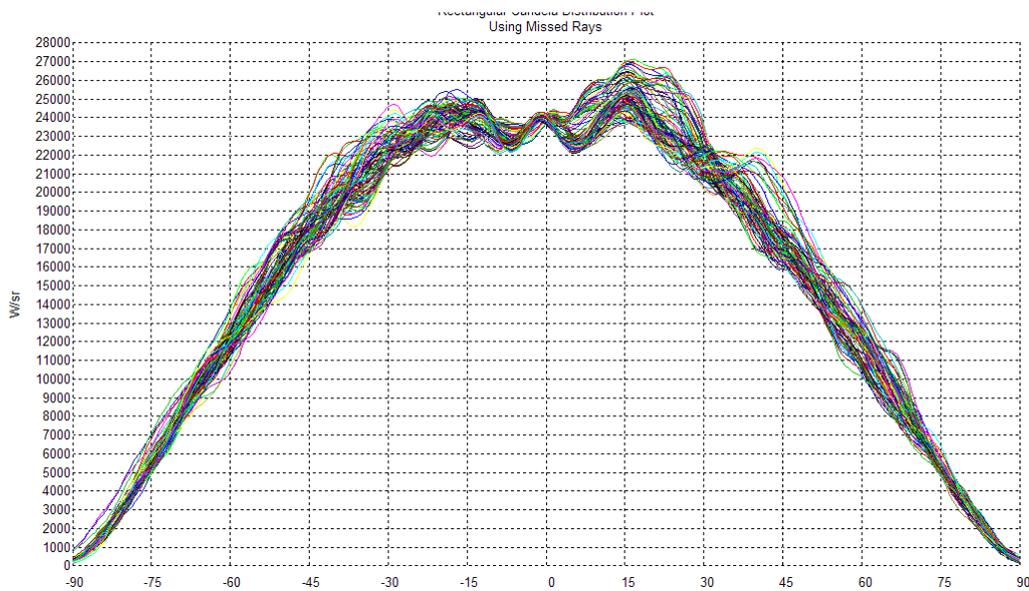
La simulazione è stata fatta sempre con il DCR avente area tra le due sfere pari a  $1 \text{ cm}^2$  e riflettanza  $R_w$  pari al 95%, ma in questo caso per una maggior precisione possibile e compatibilmente con i limiti di memoria del computer da noi utilizzato sono stati "lanciati" in entrata al DCR due milioni di raggi. Dalle simulazioni TracePro sono stati estrapolati tre tipi di plot o distribuzioni del flusso radiante:

Il primo è chiamata "Polar-Iso candela" e mette in relazione il flusso per angolo solido in funzione dell'angolo polare e di quello azimutale :



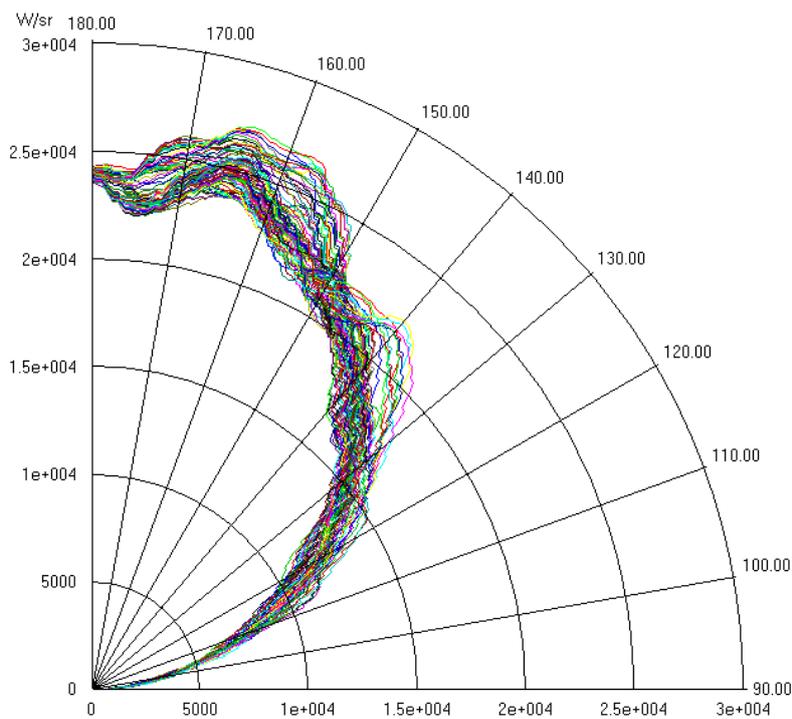
**Fig.4.3.1.3:** "Polar-Iso candela" per due milioni di raggi:  
 gli angoli sulla circonferenza sono gli angoli azimutali  
 mentre gli angoli sul raggio sono gli angoli polari

Il secondo è il rectangular candela distribution che ci da il flusso per steradiante di ogni angolo azimutale in funzione degli angoli polari:



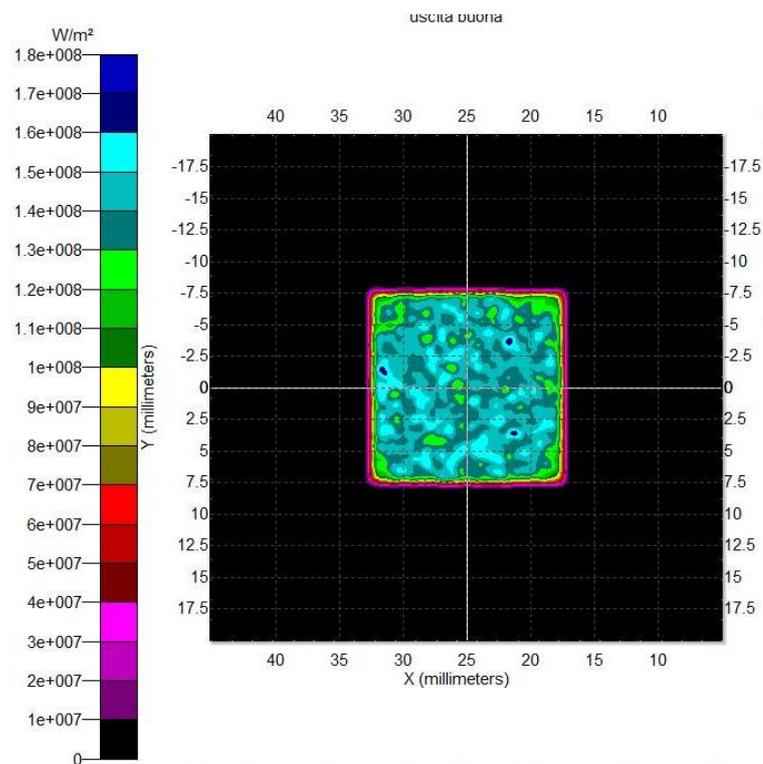
**Fig.4.3.1.4:** “Rectangular candela distribution plot”: nell’asse delle ascisse ho i valori degli angoli polari mentre sulle ordinate ho i W/sr, ad ogni linea corrisponde ad un diverso angolo azimutale da 0 a 360 gradi

Il terzo plot è il “Polar candela distribution” che rappresenta una sorta di funzione di distribuzione angolare per la sorgente dei raggi.



**Fig. 4.3.1.5:** “Polar candela distribution plot”: da la potenza su steradiante integrata su tutti gli angoli polari e ad ogni linea ho associato un angolo azimutale differente.

In tutte e tre le distribuzioni si nota che l'intensità del flusso ha un andamento che va come il coseno dell'angolo polare; infatti si vede nella figura 4.3.1.3, dove per intensità di flusso diverse abbiamo colori differenti, si hanno invece colori uguali e quindi uguale flusso al variare degli angoli azimutali, mentre all'aumentare dell'angolo polare si ha una diminuzione dell'intensità luminosa; questa peculiarità è ancora più evidente sia nella figura 4.3.1.4 dove l'intensità del flusso prende approssimativamente la forma di un coseno nell'intervallo  $-90/90$ , sia nella figura 4.3.1.4 dove la FDA è molto simile a quella di un diffusore lambertiano (che ha l'intensità che va come il coseno). Tutte e tre le distribuzioni sopracitate hanno però delle imperfezioni per angoli polari piccoli, questo probabilmente a causa della presenza della fibra ottica e delle sue differenti proprietà di superficie. Il DCR quindi integra in modo corretto la luce, questo viene evidenziato anche quando si chiude la porta d'uscita e si realizza la mappa d'irradianza del target all'uscita del flussimetro.



**Fig.4.3.1.6:** Mappa irradianza uscita DCR  
con 800000 raggi in ingresso

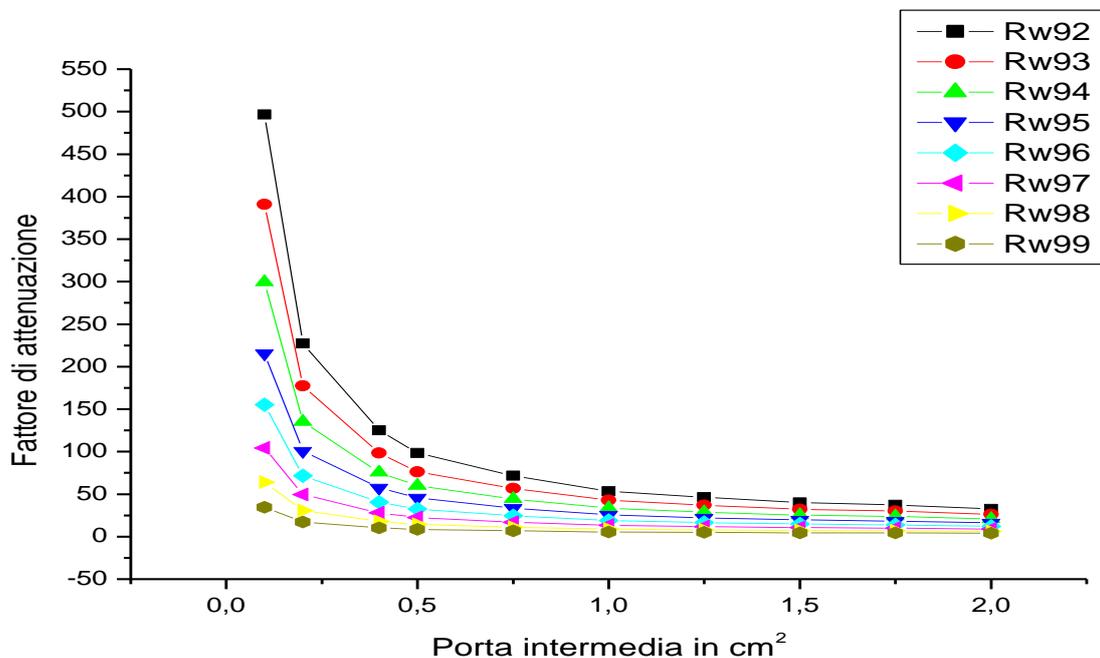
Dalla figura 4.3.1.6 si vede che la distribuzione del flusso sul rivelatore posto all'uscita del DCR è molto omogenea, questa è una caratteristica molto positiva per il flussimetro dal momento che permette al fotorivelatore posto all'uscita di lavorare al meglio.

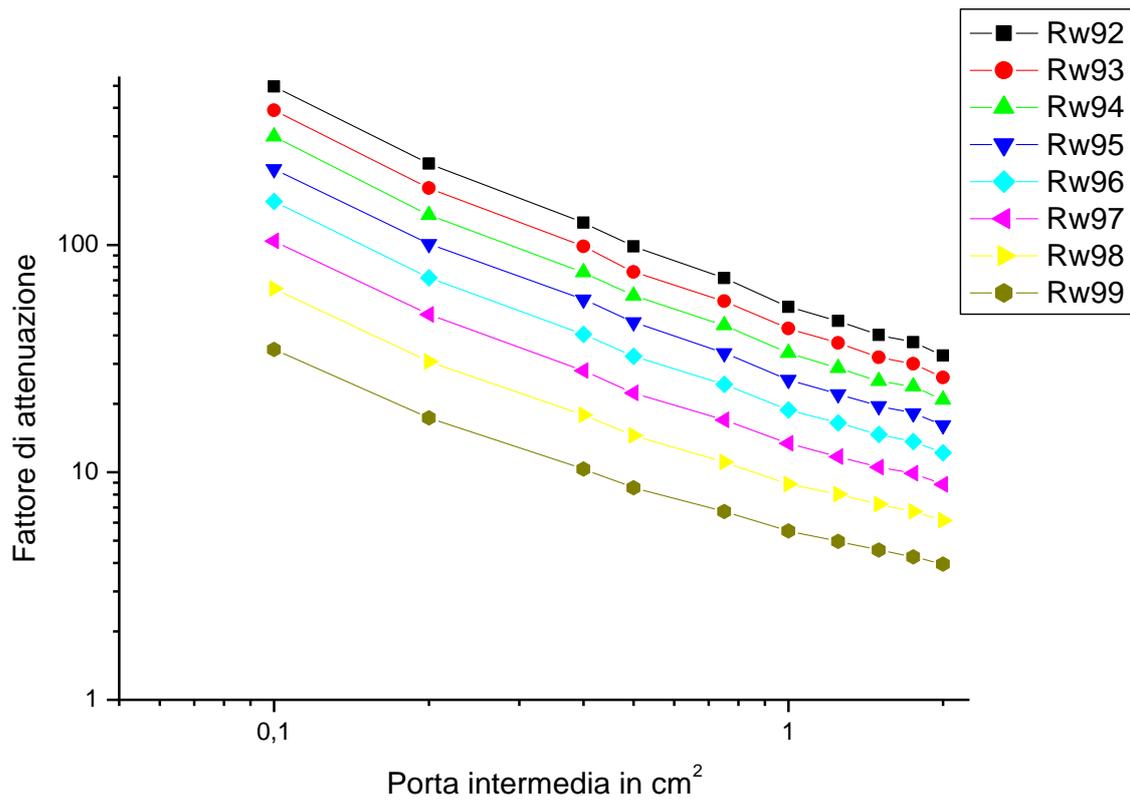
### 4.3.2 Come varia il fattore di attenuazione al variare della porta intermedia e della riflettenza di parete

Una volta constatato che il flussimetro funziona correttamente sono state studiate le caratteristiche principali del DCR e cioè come il fattore di attenuazione varia in funzione della porta intermedia tra le due sfere ed in funzione della riflettenza di parete  $R_w$  delle sfere e se i dati acquisiti rispettano i dati teorici ottenuti dall'equazione 1.13 . Le simulazioni sono state fatte per porte intermedie di area pari a:  $0.1 \text{ cm}^2$ ,  $0.2 \text{ cm}^2$ ,  $0.4 \text{ cm}^2$ ,  $0.5 \text{ cm}^2$ ,  $0.75 \text{ cm}^2$ ,  $1.00 \text{ cm}^2$ ,  $1.25 \text{ cm}^2$ ,  $1.50 \text{ cm}^2$ ,  $1.75 \text{ cm}^2$ ,  $2.00 \text{ cm}^2$  e riflettanze delle sfere ( $R_w$ ) che vanno dal 92% al 99%. I raggi mandati in entrata sono per ogni prova 5500000 con un flusso per raggio di 1W.

Sono stati ottenuti i seguenti dati:

Porta intermedia in $\text{cm}^2$	Rw 92%	Rw 93%	Rw 94%	Rw 95%	Rw 96%	Rw 97%	Rw 98%	Rw99%
0,1	496,52	390,96	299,56	215,55	155,3	104,1	64,17	34,66
0,2	227,23	177,36	135	100,94	71,8	49,5	30,7	17,33
0,4	125	98,5	75,6	57,5	40,5	28	17,85	10,33
0,5	98,26	76,04	59,75	45,75	32,43	22,32	14,54	8,57
0,75	71,5	56,6	44,3	33,5	24,4	17	11,1	6,73
1	53,3	42,89	33,45	25,53	18,83	13,4	8,88	5,53
1,25	46,25	37	28,7	22,1	16,5	11,7	8,01	4,98
1,5	40,1	32	25,2	19,6	14,7	10,54	7,23	4,56
1,75	37,3	30	23,8	18,23	13,67	9,9	6,72	4,25
2	32,58	26,16	20,8	16,167	12,2	8,85	6,14	3,95

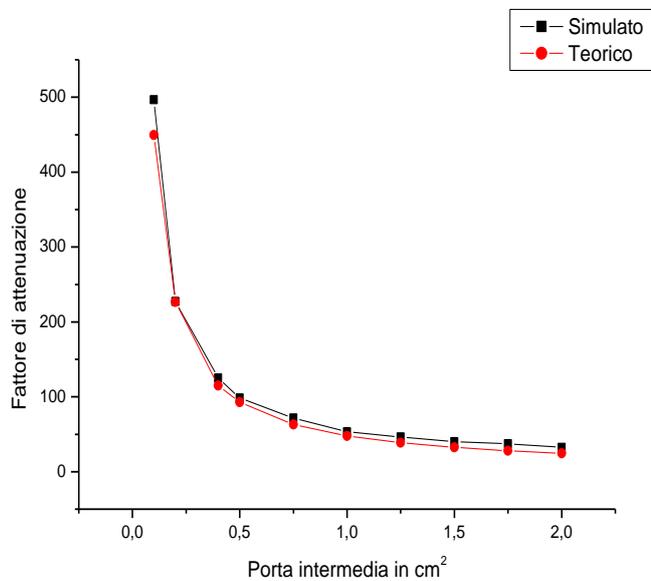




Se si confronta ogni singolo ramo del grafico con il suo equivalente teorico ricavato dall'equazione 1.13 si ha:

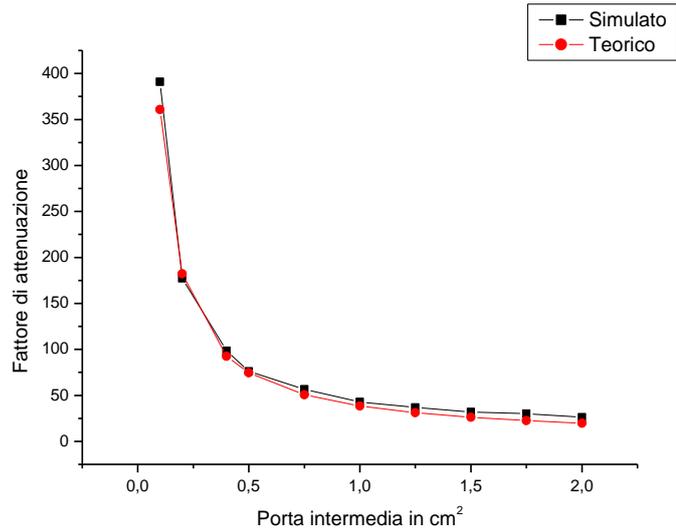
Per riflettanza  $R_w$  del 92%

Porta intermedia in $\text{cm}^2$	Simulato	teorico
0,1	496,52	449,55485
0,2	227,23	226,71324
0,4	125	115,15934
0,5	98,26	92,79532
0,75	71,5	62,87312
1	53,3	47,80111
1,25	46,25	38,66918
1,5	40,1	32,50728
1,75	37,3	28,04255
2	32,58	24,63855



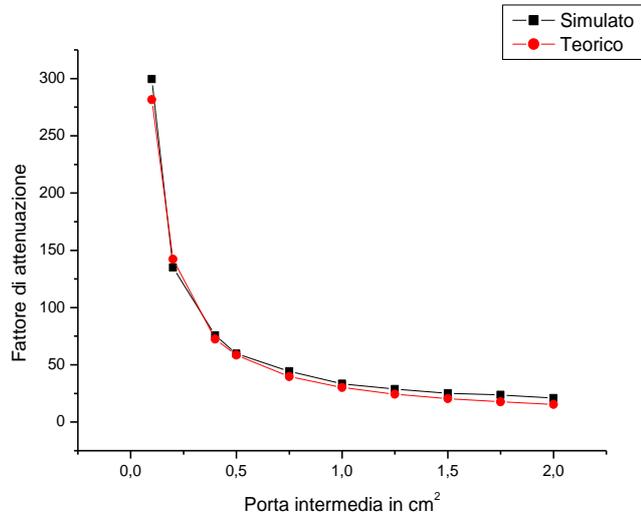
Per una riflettività  $R_w$  del 93%:

Porta intermedia in $\text{cm}^2$	Simulato	Teorico
0,1	390,96	360,6826
0,2	177,36	182,0639
0,4	98,5	92,62253
0,5	76,04	74,68144
0,75	56,6	50,65729
1	42,89	38,53518
1,25	37	31,17389
1,5	32	26,19301
1,75	30	22,57236
2	26,16	19,80186



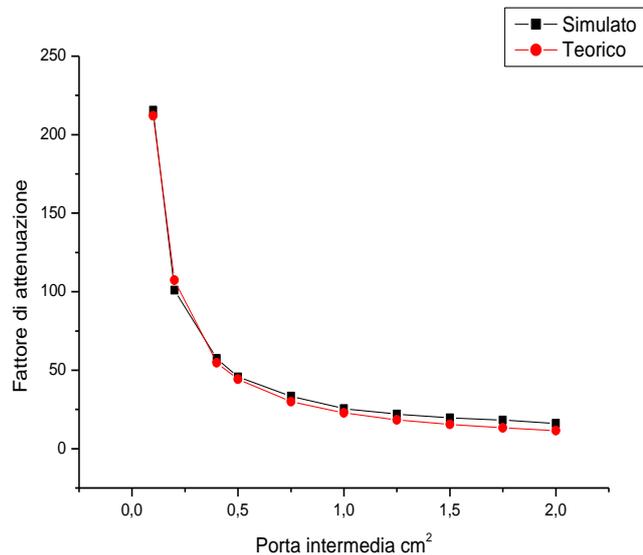
Per una riflettività  $R_w$  del 94%:

Porta intermedia in $\text{cm}^2$	Simulato	Teorico
0,1	299,56	281,5011
0,2	135	142,2473
0,4	75,6	72,48946
0,5	59,75	58,4855
0,75	44,3	39,7117
1	33,45	30,21567
1,25	28,7	24,43075
1,5	25,2	20,50138
1,75	23,8	17,63232
2	20,8	15,42597



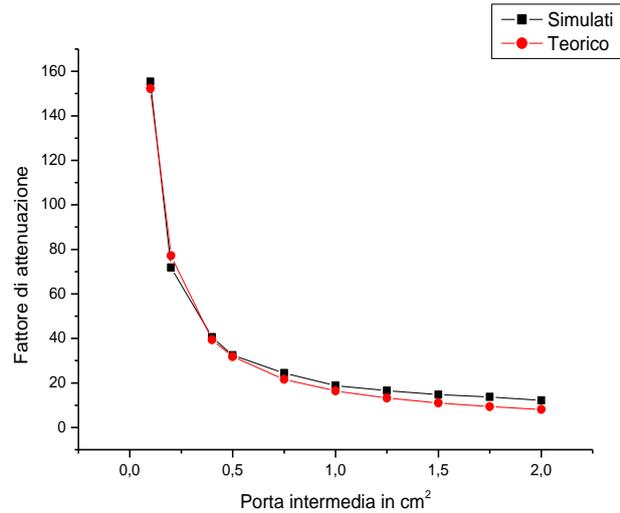
Per una riflettività  $R_w$  del 95%:

Porta intermedia in $\text{cm}^2$	Simulato	Teorico
0,1	215,55	212,0103
0,2	100,94	107,2634
0,4	57,5	54,76012
0,5	45,75	44,20751
0,75	33,5	30,03637
1	25,53	22,84259
1,25	22,1	18,43975
1,5	19,6	15,43238
1,75	18,23	13,22243
2	16,167	11,51085



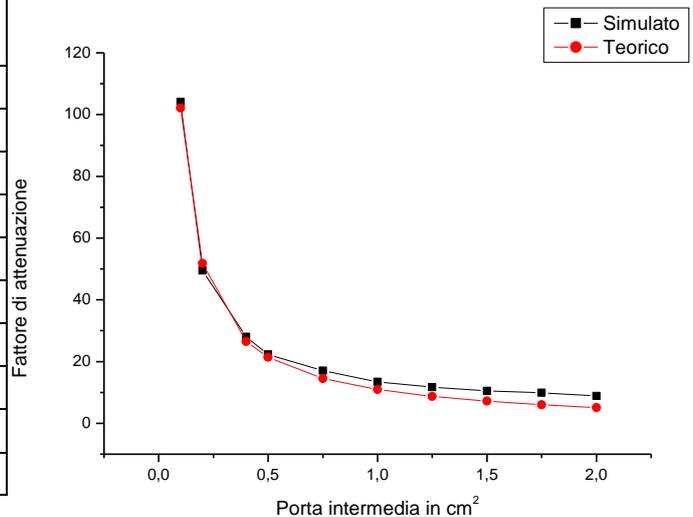
Per una riflettanza  $R_w$  del 96%:

Porta intermedia in $\text{cm}^2$	Simulato	Teorico
0,1	155,3	152,2103
0,2	71,8	77,11226
0,4	40,5	39,43451
0,5	32,43	31,84747
0,75	24,4	21,63129
1	18,83	16,41593
1,25	16,5	13,2009
1,5	14,7	10,98603
1,75	13,67	9,34268
2	12,2	8,05653



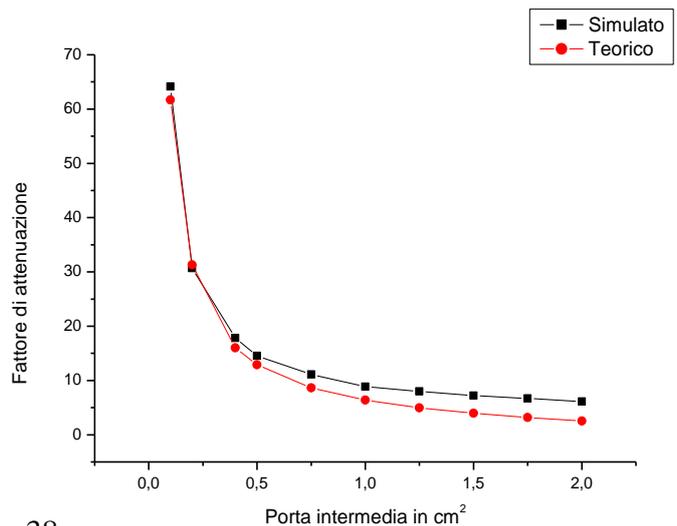
Per una riflettanza  $R_w$  del 97%:

Porta intermedia in $\text{cm}^2$	Simulato	Teorico
0,1	104,1	102,101
0,2	49,5	51,7938
0,4	28	26,51264
0,5	22,32	21,40537
0,75	17	14,49647
1	13,4	10,9357
1,25	11,7	8,71419
1,5	10,54	7,16231
1,75	9,9	5,99308
2	8,85	5,06299



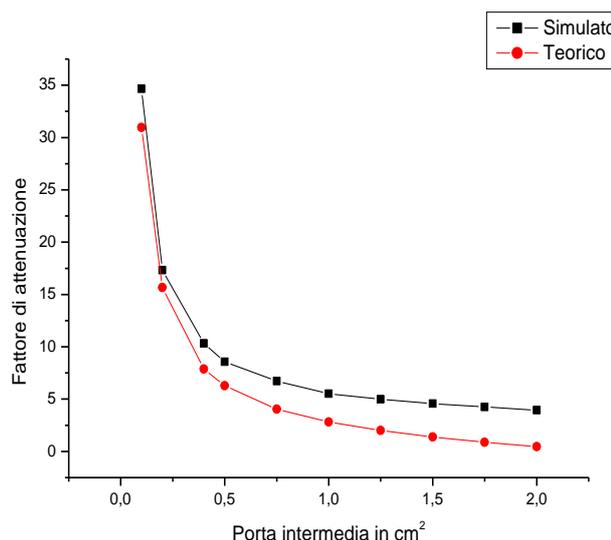
Per una riflettanza  $R_w$  del 98%:

Porta intermedia in $\text{cm}^2$	Simulato	Teorico
0,1	64,17	61,68237
0,2	30,7	31,30805
0,4	17,85	15,9945
0,5	14,54	12,88123
0,75	11,1	8,63189
1	8,88	6,40189
1,25	8,01	4,97963
1,5	7,23	3,96124
1,75	6,72	3,17362
2	6,14	2,53024



Per una riflettività  $R_w$  del 99%

Porta intermedia in $\text{cm}^2$	Simulato	Teorico
0,1	34,66	30,9545
0,2	17,33	15,65502
0,4	10,33	7,88009
0,5	8,57	6,27503
0,75	6,73	4,03757
1	5,53	2,81451
1,25	4,98	1,99721
1,5	4,56	1,3828
1,75	4,25	0,88431
2	3,95	0,45828



Dal primo grafico si vede come il fattore di attenuazione viene effettivamente influenzato sia dall'area della porta intermedia sia dalla riflettanza della sfera, si vede inoltre come la diminuzione della riflettività della parete comporti, a parità degli altri parametri, un aumento del fattore di attenuazione che è molto rilevante riducendo anche solo di poche unità la riflettività percentuale della parete, il fattore di attenuazione infatti può andare da un massimo di 496 per una riflettanza di parete  $R_w$  del 92% e una porta intermedia di  $0,1 \text{ cm}^2$  fino ad un minimo di 3,95 per una riflettanza di parete  $R_w$  del 99% e una porta intermedia di  $2 \text{ cm}^2$ ; c'è da considerare però che nella pratica si utilizzeranno riflettanze di parete che come minimo dovranno essere del 95%, questo perché riflettanze basse creano problemi di surriscaldamento del dispositivo DCR e quindi necessitano di un apparato di dissipazione del calore adeguato al flussimetro. Considerando già concentrazioni di 100-200 soli alle quali lavorano ad esempio le celle Sun power e considerando il caso migliore dal punto di vista della riflettanza della sfera cioè del 98-99% (in modo che il surriscaldamento dell'apparecchio sia il minore possibile) e usando come porta intermedia quella da  $0,1$  si ha un fattore di attenuazione pari a 50, questo ci permette di avere sul fotorivelatore una potenza di 2-4 soli; nel caso in cui si abbia bisogno di fattori di attenuazione considerevolmente più alti si può sempre intervenire sulla dimensione delle sfere, questo si nota anche nell'equazione 4.2.14 dove il fattore di attenuazione è definito come il rapporto dell'irradianza d'ingresso con l'irradianza della seconda sfera, dal momento che l'irradianza della sfera è inversamente proporzionale all'area della sfera si ottiene che, aumentando le dimensioni della seconda sfera, diminuisce l'irradianza ed il fattore di attenuazione aumenta. Dai grafici che seguono si può poi notare che i dati ottenuti ricalcano in generale l'andamento teorico, si hanno solo delle differenze nel caso delle porte maggiori di  $1,5 \text{ cm}^2$ , questo è probabilmente imputabile al fatto che il baffles del diametro di 12 mm presente nella seconda sfera (baffles 3) e con la funzione di non fare arrivare raggi non integrati sulla porta d'uscita, non ferma tutti i raggi; inoltre si vede anche che all'aumentare della riflettanza delle sfere aumenta questo divario probabilmente perché la formula teorica non considera la presenza dei baffles che comunque contribuiscono

all'attenuazione e vi contribuiscono maggiormente quando il DCR di per sé attenua di meno cioè nel caso di  $R_w$  99%, mentre contribuiscono in maniera minore quando già di default il DCR attenua molto e cioè nel caso di  $R_w$  92%.

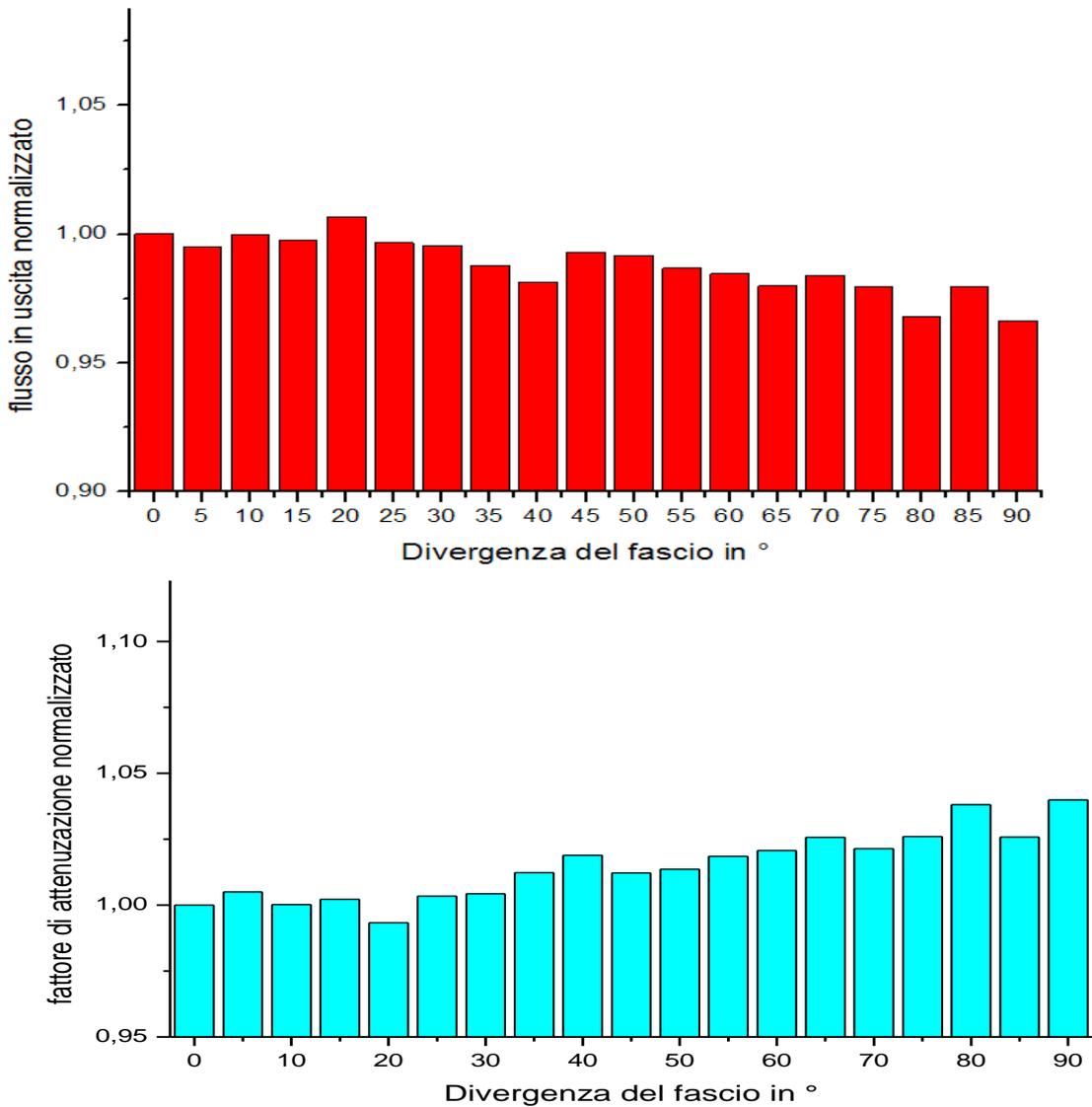
### 4.3.3 Come la divergenza del fascio influenza il fattore di attenuazione nel DCR

Un flussimetro per essere uno strumento universale deve effettuare le misurazioni indipendentemente dalla divergenza del fascio, ovvero deve misurare lo stesso flusso in uscita per differenti angoli di ingresso.

Per questo motivo un'altra caratteristica che si è andata ad indagare del flussimetro è stata la dipendenza del fattore di attenuazione dalla divergenza del fascio in ingresso. Sono state effettuate simulazioni con flusso in entrata costante (500000 per ogni prova con potenza di 1W per raggio) nelle quali si andava a variare la divergenza angolare di tale fascio, così facendo si ha in entrata un fascio i cui raggi possono avere angolo di entrata da 0° all'angolo massimo selezionato.

Divergenza angolare	Flusso in uscita in W	Flusso in uscita normalizzato	Fattore di attenuazione	Fattore di attenuazione normalizzato
0	19603	1	255,0630006	1
5	19505	0,995000765	256,344527	1,005024353
10	19599	0,99979595	255,1150569	1,000204092
15	19560	0,997806458	255,6237219	1,002198364
20	19736	1,006784676	253,3441427	0,993261046
25	19536	0,996582156	255,9377559	1,003429566
30	19518	0,995663929	256,1737883	1,004354954
35	19364	0,987807989	258,2111134	1,012342491
40	19239	0,981431414	259,8887676	1,018919902
45	19366	0,992873622	258,184447	1,012237943
50	19340	0,991540631	258,5315408	1,013598759
55	19247	0,986772622	259,7807451	1,018496389
60	19205	0,984619328	260,3488675	1,02072377
65	19111	0,979800051	261,6294281	1,025744336
70	19192	0,983952833	260,5252188	1,021415173
75	19106	0,979543707	261,6978959	1,026012771
80	18883	0,968110741	264,788434	1,038129535
85	19109	0,979697513	261,6568109	1,025851693
90	18850	0,966418867	265,2519894	1,03994695

Dai dati sono stati ottenuti due tipi di istogrammi: il primo mette in relazione la divergenza del fascio con il flusso in uscita normalizzato ed il secondo invece mette in relazione la divergenza angolare con il fattore di attenuazione normalizzato.

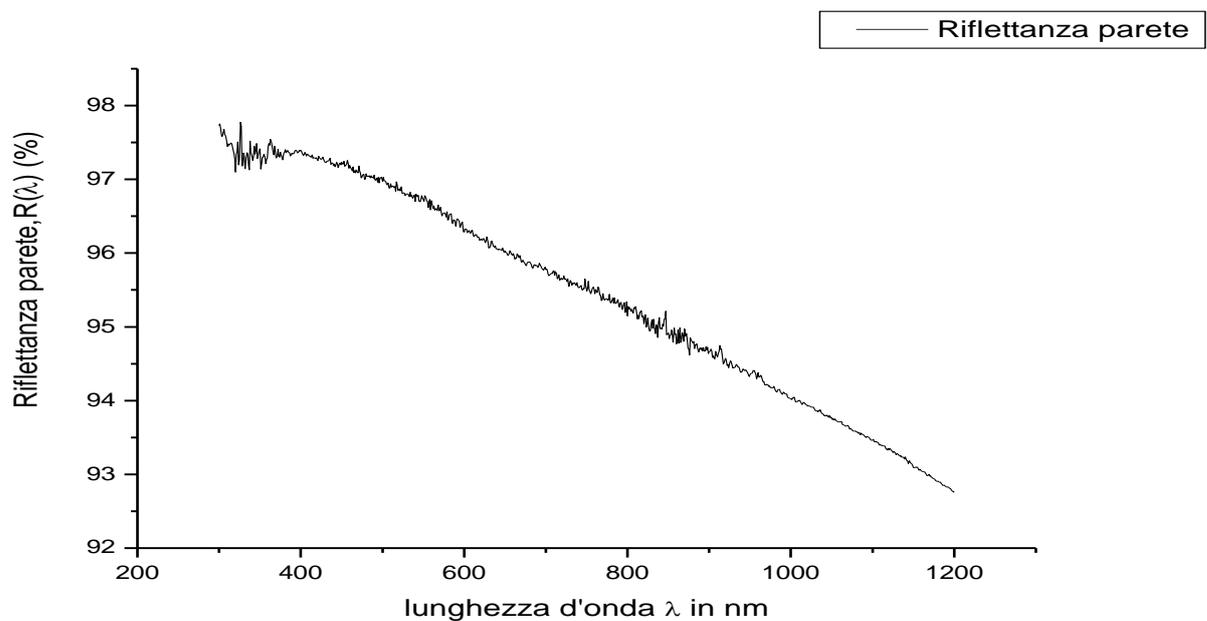


Dalla tabella e dai grafici si nota che il flusso in uscita dal DCR e quindi il suo fattore di attenuazione non è indipendente dalla divergenza del fascio d'ingresso; infatti abbiamo una variazione percentuale del fattore di attenuazione pari al 4-5%, una variazione troppo alta per gli standard richiesti dal nostro obiettivo e cioè avere un radiometro universale che quindi possa essere utilizzato per luce concentrata con diverse divergenze angolari e che dia una risposta indipendente da queste.

#### 4.4 Come lo spettro della luce concentrata viene influenzato dal DCR

L'ultima indagine fatta sul DCR è stata quella di verificare come la risposta spettrale del coating delle sfere influenza lo spettro della radiazione in entrata al DCR e quindi che tipo di spettro si ha all'uscita dell'apparecchio, infatti nelle prove precedenti si è definito un fattore di attenuazione, ma si è sempre supposto che non venisse alterato lo spettro incidente, in realtà lo spettro viene alterato per il fatto che la parete interna riflette in maniera diversa le diverse lunghezze d'onda, ovvero ha una riflettanza spettrale non piatta, di conseguenza, il fattore di attenuazione sarà diverso alle diverse lunghezze d'onda:  $F_A = F_A(\lambda)$ .

Per ottenere  $F_A(\lambda)$  è necessario innanzitutto conoscere  $R(\lambda)$  e cioè la riflettanza di parete in funzione delle diverse lunghezze d'onda di un coating standard e si deve assumere che il flusso in ingresso sia costante in  $\lambda$ .



La riflettanza riportata nel grafico è quella per un coating di  $\text{BaSO}_4$  standard in commercio di medio costo

Nota  $R(\lambda)$  si fanno tre simulazioni nelle quali viene variata la riflettanza di parete e dove il flusso in entrata al DCR rimane costante. Per queste simulazioni è stato utilizzato il DCR con area tra le sfere pari  $1 \text{ cm}^2$  e si è mandato in entrata un flusso parallelo costituito da 500000 raggi di luce; la prima simulazione si è fatta con una riflettanza di parete pari a 1 in modo che le uniche perdite nel flusso si avessero a causa dell'uscita di quest'ultimo dalla porta d'ingresso, successivamente sono state effettuate le altre due simulazioni rispettivamente con riflettività di parete del 98% e del 95%.

Riflettanza parete $R_w$	Flusso in entrata in W	Flusso in uscita in W	Fattore di attenuazione
1	500000	128000	3,90
0.98	500000	39659	12,61
0.95	500000	13778	36,29

Possiamo dire che il flusso in uscita ad una data riflettanza di parete è equivalente al flusso in uscita con riflettanza di parete pari al 100% moltiplicato per la riflettanza di parete considerata elevata al numero di riflessioni medie fatte all'interno del flussimetro.

$$\Phi_{out}(R = 0.98) = \Phi_{out}(R = 1) \times 0.98^N \quad (4.4.1)$$

$$\Phi_{out}(R = 0.95) = \Phi_{out}(R = 1) \times 0.95^N \quad (4.4.2)$$

Ora si va a dividere membro a membro le due equazioni e si ottiene :

$$\frac{\Phi_{out}(R = 0.98)}{\Phi_{out}(R = 0.95)} = \frac{0.98^N}{0.95^N} \quad (4.4.3)$$

Da qui ricaviamo N numero di riflessioni medio:

$$N = \frac{\ln\left(\frac{\Phi_{out}(R = 0.98)}{\Phi_{out}(R = 0.95)}\right)}{\ln\left(\frac{0.98}{0.95}\right)} \quad (4.4.4)$$

Se si vanno a sostituire i valori numerici si ha  $N = 34$  riflessioni medie che fa un raggio all'interno del DCR.

A questo punto possiamo calcolare la  $F_A(\lambda)$ :

$$F_A(\lambda) = \frac{F_A(R = 100)}{R(\lambda)^N} \quad (4.4.5)$$

Immaginiamo ora di avere un fascio in ingresso sull'area  $S_{in}$ , caratterizzato dall'irradianza spettrale  $E_{in}(\lambda)$  ( $W/m^2nm$ ).

Il flusso totale in ingresso sarà:

$$\Phi_{in} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} d\lambda \cdot E_{in}(\lambda) \cdot S_{in} \quad (4.4.6)$$

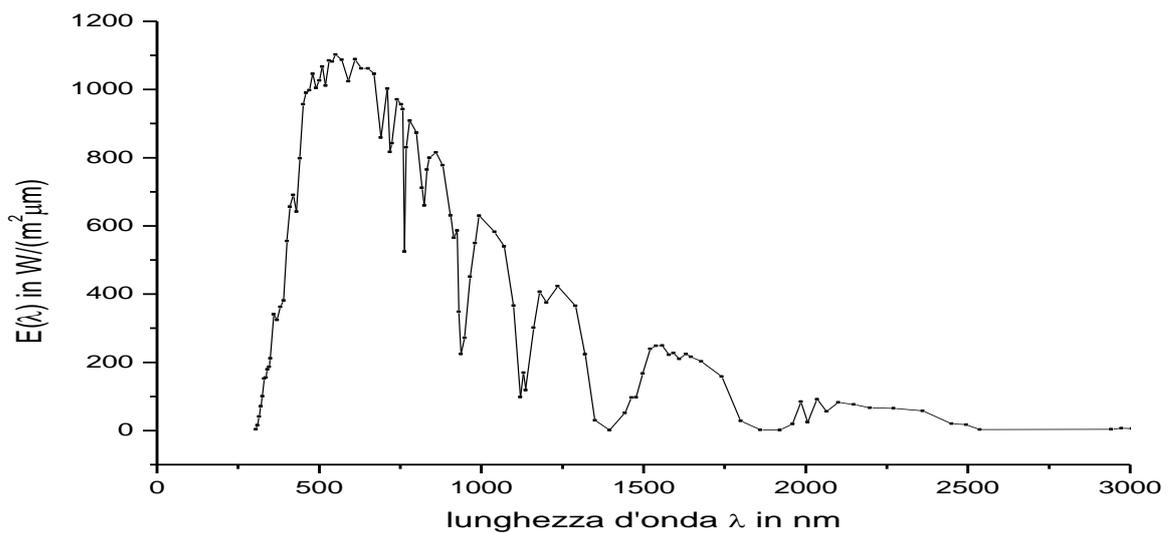
Il flusso totale in uscita sarà:

$$\Phi_{out} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} d\lambda \cdot E_{out}(\lambda) \cdot S_{out} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} d\lambda \cdot \frac{E_{in}(\lambda) \cdot S_{in}}{f_A(\lambda)} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} d\lambda \cdot E_{in}(\lambda) \cdot S_{in} \cdot \frac{R(\lambda)^N}{f_A(1)} \quad (4.4.7)$$

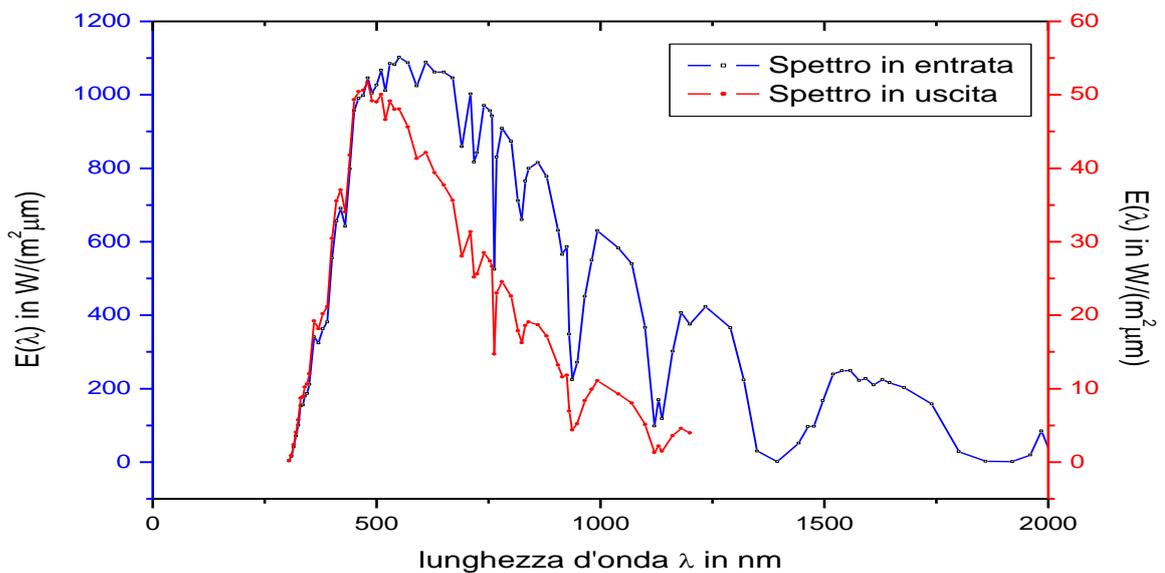
essendo:

$$E_{out}(\lambda) = \frac{S_{in}}{S_{out}} \cdot E_{in}(\lambda) \cdot \frac{R(\lambda)^{\bar{N}}}{f_A(1)} \quad (4.4.8)$$

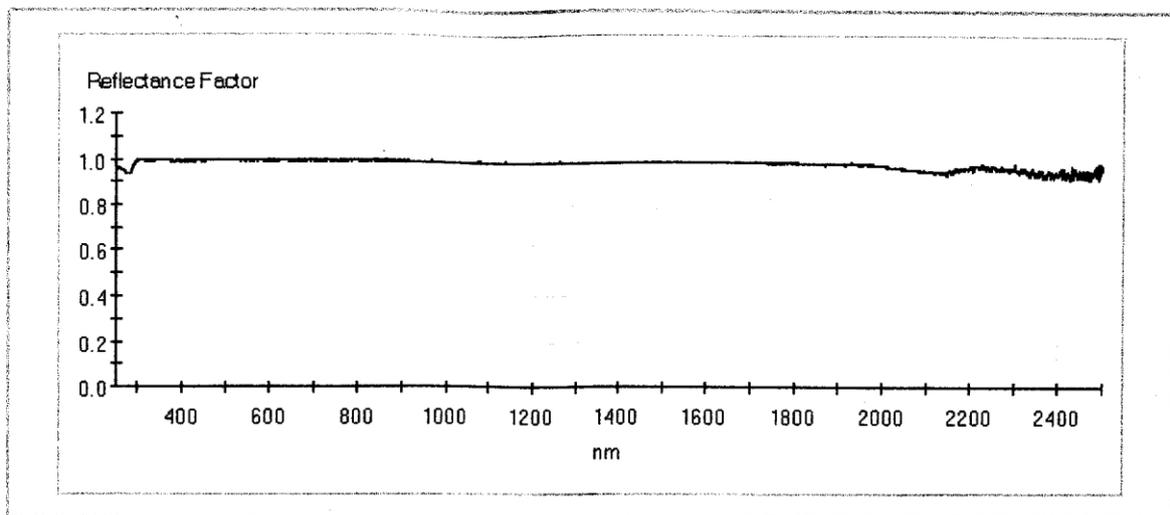
Se adesso si mette al posto di  $E_{in}(\lambda)$  lo spettro della radiazione solare diretta (radiazione effettiva con la quale lavorano i concentratori solari) e con uno spettro differente da quello solare normale e al posto di  $R(\lambda)$  la riflettanza spettrale della parete nota, si trova lo spettro di uscita della luce e si riesce quindi a quantificare come e quanto il DCR modifica lo spettro.



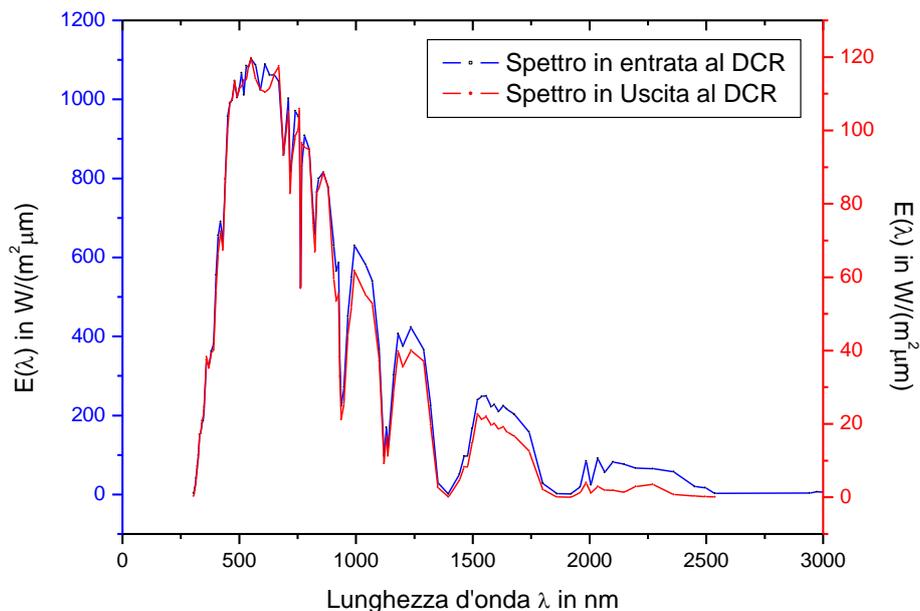
Se si confrontano i due spettri:



Dal grafico sopra riportato si nota come il passaggio attraverso il DCR crei una variazione nella forma dello spettro della luce oltre ad un'attenuazione già nota. Il coating va ad influire maggiormente sulle lunghezze d'onda maggiori di 500 nm e quindi sulla componente rossa e infrarossa della luce, questo fenomeno si poteva già intuire grazie al grafico della riflettanza di parete dove si vede che per lunghezze d'onda alte si ha un calo nella riflettanza; lo spettro in uscita è limitato da 300 nm fino a 1200nm perché si conosce il comportamento della riflettanza della parete solo tra questi due estremi. Se si cambia la tipologia di coating che riveste la superficie interna dell'apparato DCR con un coating migliore ad esempio lo Zenith® che ha una riflettanza come mostrato :



Utilizzando il medesimo procedimento svolto per il coating di BaSO<sub>4</sub> si ottiene il risultato in figura:



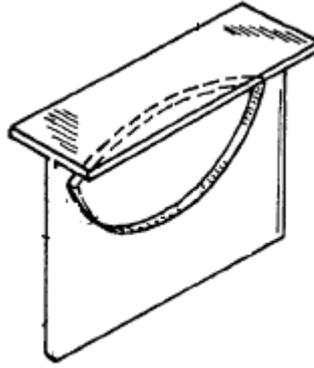
Si nota come un coating migliore perfezioni nettamente lo spettro d'uscita che assomiglia molto di più a quello d'entrata della luce diretta, in questo caso si iniziano ad avere delle piccole differenze tra i due spettri solo superati i 1500 nm; entrambi i risultati giustificano il motivo per il quale le sfere integratrici per studi dell'infrarosso vengono rivestite con un coating differente e cioè coating d'oro

## Capitolo 5: Flussimetro DISR

Dal momento che il flussimetro DCR presentava, per le nostre esigenze, una variabilità troppo alta del fattore di attenuazione in funzione della divergenza angolare del fascio d'ingresso, si è ideata una "evoluzione" del DCR che non avesse questo inconveniente o fosse presente in maniera minore: il DISR acronimo inglese che sta per Double Integrating Sphere Radiometer.

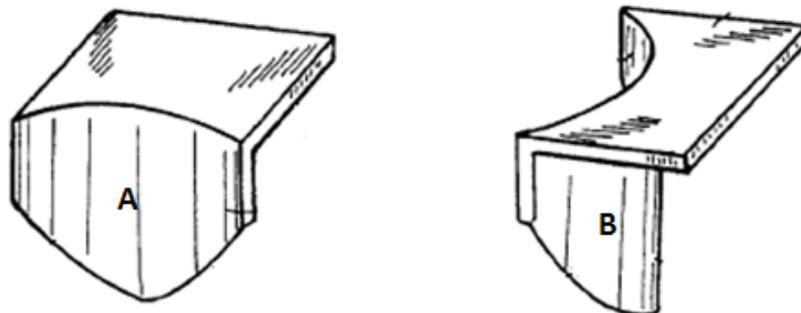
### 5.1 Caratteristiche costruttive

Il DISR è composto come il DCR da due cavità ricavate per lavorazione meccanica all'interno del corpo principale, che è realizzato in materiale privo di dette proprietà ottiche; successivamente sono state rivestite, ad esempio per deposizione o con sistemi equivalenti, con materiale presentante tali proprietà ottiche in modo che ciascuna delle due cavità avesse una superficie dotata almeno parzialmente di proprietà riflettenti e diffondenti per radiazione elettromagnetica e si comporti pertanto come una sfera integratrice (MgO BaSO<sub>4</sub> Spectrlon). La prima cavità presenta una apertura quadrata di ingresso che pone in comunicazione "l'ambiente esterno" con la prima cavità e con il flussimetro. L'apertura d'ingresso è realizzata in modo tale che il suo asse longitudinale passi per il centro della prima sfera e sia ortogonale ad una retta che intercetta il centro delle due sfere. Le dimensioni di questa apertura possono essere variate e regolate in relazione alle esigenze di misurazione, grazie ad appositi mezzi di regolazione della sezione di passaggio (non mostrati in Figura 1), come ad esempio un elemento oscurante, movimentato mediante viti di precisione o mediante un attuatore controllato elettronicamente (già noti in letteratura). Nella prima sfera è disposto un elemento diffusore di radiazione di forma conica a contatto con la superficie della prima sfera e in posizione opposta all'entrata, il diffusore conico (Diff) è rivestito dallo stesso coating delle sfere ed è stato introdotto in modo che la radiazione avente minor angolo di divergenza non venga rimandata fuori dal radiometro e quindi non rivelata dal fotorivelatore posto all'uscita del flussimetro. Le due sfere sono messe in comunicazione ottica attraverso un canale di comunicazione, questo canale presenta una prima estremità in prossimità dell'apertura d'ingresso, parallela all'asse che congiunge i centri delle due sfere ed ha una lunghezza inferiore a quella che sta tra i due centri delle sfere, ed il passaggio ha una forma tubolare; la sezione di questo passaggio può essere regolata per mezzo di un diaframma o inserto con la forma stessa del canale in modo da poter agire per regolare l'area attraverso la quale passa la radiazione luminosa. Sia il canale che il diaframma sono ricoperti dallo stesso coating delle sfere. L'elemento regolatore è montato in maniera amovibile su detto corpo principale e la sua installazione è effettuata introducendo lo stesso in un'apposita feritoia

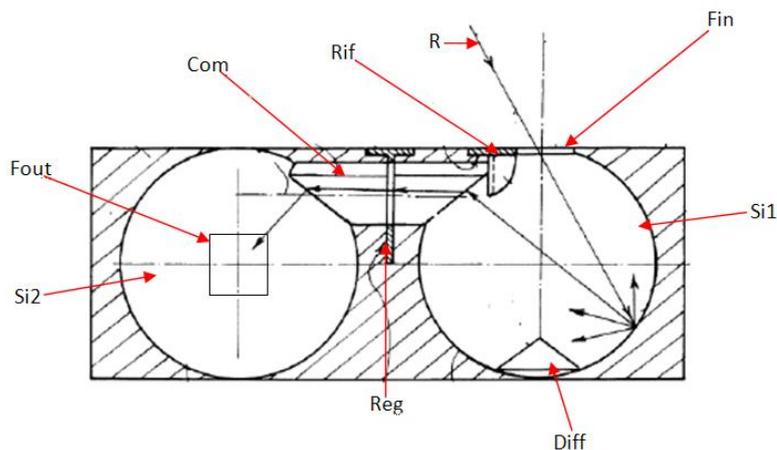


**Fig.5.1.1:** Inserto regolabile in area

All'interno della prima cavità è inoltre installato un elemento schermante ,sostanzialmente interposto tra l'apertura di ingresso e la prima estremità del canale . L'elemento schermante può essere diviso principalmente in due superfici, la prima che si affaccia sulla finestra d'ingresso dotata di una riflettanza speculare del 97% costante in funzione della lunghezza d'onda e la seconda opposta alla prima con proprietà ottiche diffuse come quelle della cavità. La funzione dell'elemento schermante è far si che i raggi con divergenza più alta non vengano rispediti fuori del DISR ,situazione che avverrebbe con i baffles ricoperti di materiale diffusivo e che farebbero perdere flusso per fasci con alta divergenza angolare ed inoltre serve ad evitare che parte del fascio vada direttamente nel canale di collegamento senza essere passato attraverso la prima sfera. L'elemento schermante può essere sostituito con un altro dispositivo di forma e dimensioni differenti in base alle caratteristiche del fascio incidente; ad esempio nel caso di un fascio proveniente da una fibra ottica, e quindi con una apertura angolare molto limitata, potrebbe essere sufficiente un elemento schermante di dimensioni più ridotte.



**Fig.5.1.2:** Schermo (Rif) A è la parte riflettente sulla quale incidono i raggi  
B è la parte rivestita dal coating diffusivo



**Fig.5.1.3:** Schema del DISR

Nella figura 3 si hanno le parti essenziali del flussimetro:

- “R” indica un generico raggio in entrata al radiometro;
- “Fin” è la finestra d’ingresso dove entra la radiazione concentrata;
- “Si1” è la prima sfera integratrice;
- “Diff” è un diffusore di luce;
- “Rif” è un elemento schermante;
- “Com” è il canale che mette in comunicazione le due sfere;
- “Reg” è una porta regolabile in area;
- “Si2” è la seconda sfera integratrice ;
- “Fout” è la porta d’uscita dove va posizionato il fotorivelatore;

Un fascio di radiazione elettromagnetica concentrata incidente entra nel dispositivo di attenuazione attraverso l'apertura di ingresso, che, come detto può essere regolata in grandezza in base al fascio che si sta trattando .Il fascio o una porzione di esso, avente una direzione sostanzialmente coincidente con l'asse passante per il centro della sfera colpisce l'elemento diffusore e quindi è da esso diffusa in tutta la prima cavità , senza che una porzione significativa di esso venga riflessa verso l'esterno del dispositivo; ciò permette di non alterare la misura, in quanto l'intensità del fascio concentrato effettivamente avviato alla misura corrisponde pressoché completamente con l'intensità del fascio che entra dall'apertura di ingresso. Inoltre un fascio, o una porzione di esso, avente un angolo di incidenza molto elevato rispetto all'asse e diretto verso il canale di comunicazione ottica colpisce la superficie speculare dell'elemento schermante e viene riflesso verso l'interno della prima cavità . Per tutte le altre direzioni di incidenza il fascio colpisce la superficie interna della prima cavità e pertanto, grazie alle citate proprietà di riflettanza lambertiana, viene riflesso in modo sostanzialmente omogeneo in tutte le direzioni.

A causa delle molteplici riflessioni diffuse del fascio entrante sulla superficie interna, la condizione raggiunta all'interno della prima cavità è tale che tutti i punti della superficie si comportano come sorgenti uniformi di radiazione elettromagnetica con uguale intensità; la radiazione incidente subisce quindi una prima attenuazione ed omogeneizzazione all'interno della prima cavità, che funge pertanto da sfera integratrice di ingresso. La forma allungata del canale, la sua particolare disposizione in prossimità della parete e la presenza dell'elemento schermante consentono di ridurre al minimo o azzerare la porzione di radiazione che riesce ad imboccare il canale stesso dopo poche riflessioni o direttamente dall'apertura di ingresso, pertanto la porzione di radiazione che imbecca il canale proviene sostanzialmente da dette sorgenti uniformi e quindi la sua intensità dipende dall'intensità del fascio incidente in base ai soli parametri geometrici del dispositivo, essendo indipendente dall'angolo di incidenza e dall'apertura angolare del fascio. L'elemento regolatore a sua volta lascia che solo una porzione di tale radiazione possa passare alla seconda cavità, in dipendenza dalle dimensioni dell'apertura. La radiazione che giunge nella seconda cavità subisce analoghe riflessioni multiple sulla superficie della stessa e quindi la condizione raggiunta all'interno è anche qui quella in cui tutti i punti della superficie si comportano come sorgenti uniformi di radiazione elettromagnetica con uguale intensità. La seconda cavità realizza quindi un'ulteriore attenuazione ed omogeneizzazione della radiazione, una porzione della quale esce dall'apertura di uscita e va ad un eventuale strumento di misura; detta apertura di uscita è regolabile in funzione delle caratteristiche tecniche dello strumento utilizzato, la seconda cavità funge infatti da sfera integratrice di uscita, si comprende quindi come l'intensità di una radiazione incidente venga diminuita dal dispositivo di attenuazione in una radiazione uscente.

Nel caso del DISR non è stato possibile utilizzare la teoria delle sfere integratrici per ricavare un fattore di attenuazione analitico/teorico perché non si conosce completamente il comportamento dei raggi all'interno del canale di comunicazione e non si è riusciti a dare una traduzione matematica di questo passaggio.

## 5.2 Modellazione Ottica

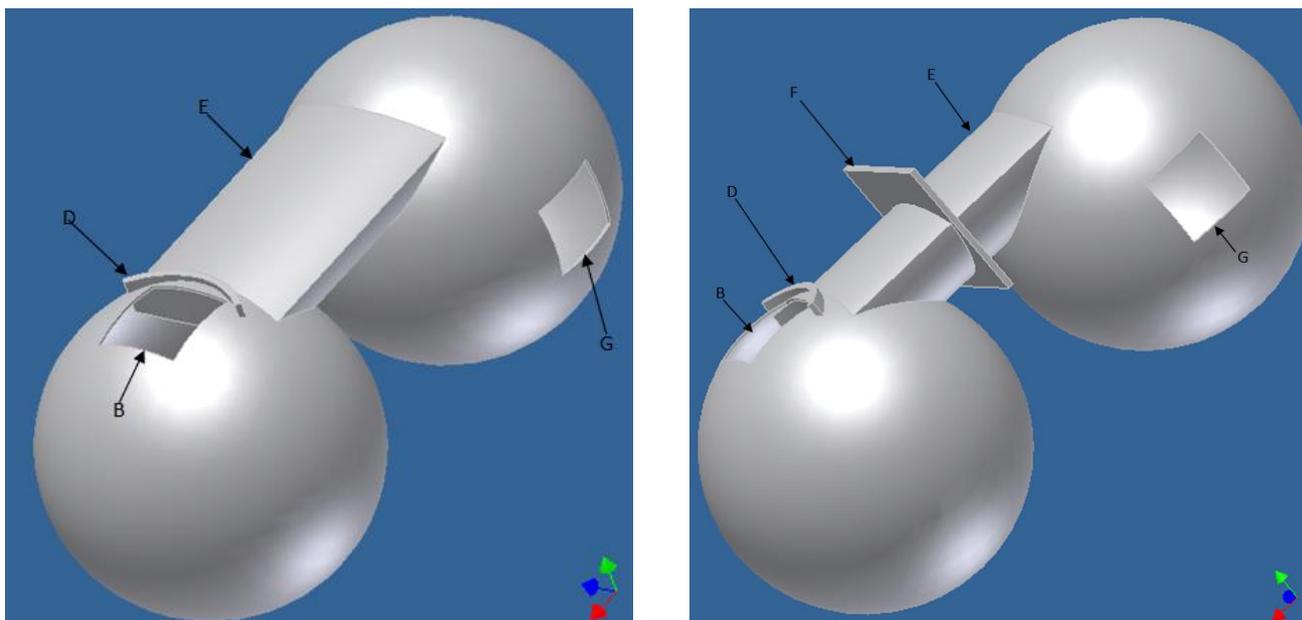
Anche il DISR è stato “costruito” con l’utilizzo di un programma di CAD ( AutoDesk Inventor 2008), in questo caso perché non è mai stato costruito un prototipo di questo dispositivo. Sono state quindi seguite le dimensioni indicate dal brevetto per avere un flussimetro con le seguenti parti e dimensioni:

- A) Due sfere di diametro pari a 5 cm;
- B) Porta d’ingresso di forma quadrata con area di  $1,96 \text{ cm}^2$  ( $1,4 \times 1,4 \text{ cm}$ )
- C) Diffusore conico di altezza 0,8 cm e area di base di  $3,14 \text{ cm}^2$
- D) Schermo di spessore 0,1 cm
- E) Canale di collegamento di lunghezza massima 4 cm
- F) Inserto diaframma di area variabile da  $0,22 \text{ cm}^2$  a  $2,3 \text{ cm}^2$ ;
- G) Porta d’uscita di forma quadrata con area di  $1,46 \text{ cm}^2$  ( $1,21 \times 1,21 \text{ cm}$ ):

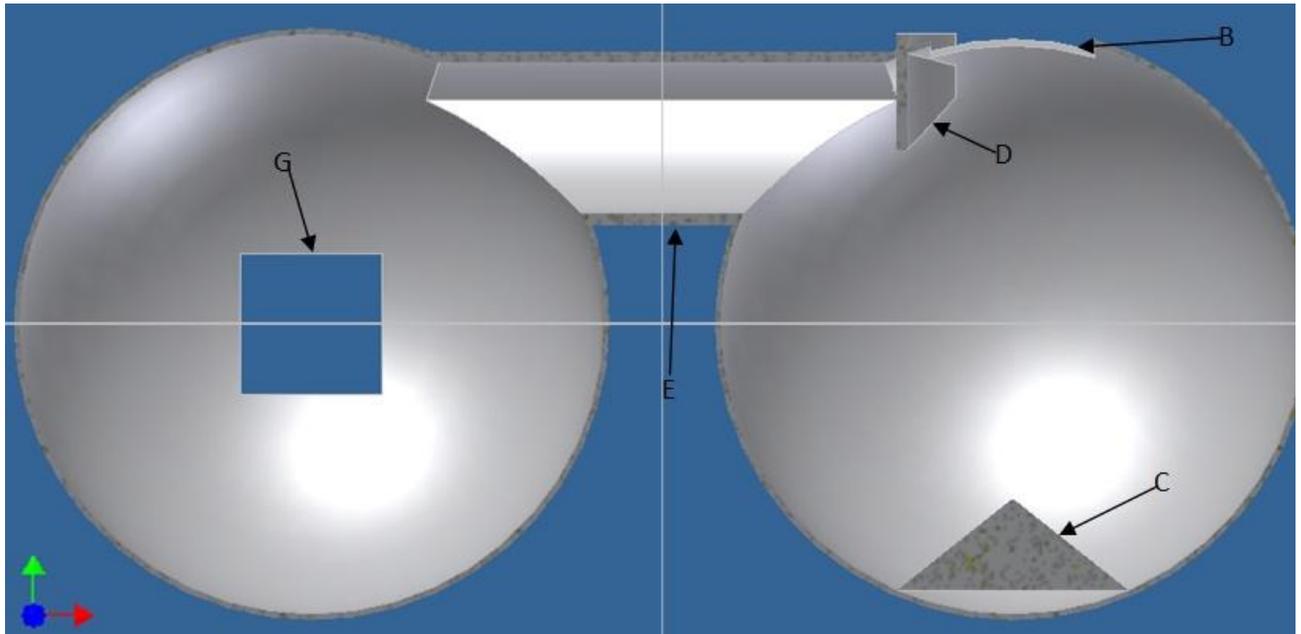
Le porte d’ingresso e d’uscita devono giacere su piani tra loro perpendicolari.

Nelle immagini seguenti prese da AutoDesk Inventor 2008 si è indicato il sistema di riferimento con

-  Indica l’asse X
-  Indica l’asse Y
-  Indica l’asse Z

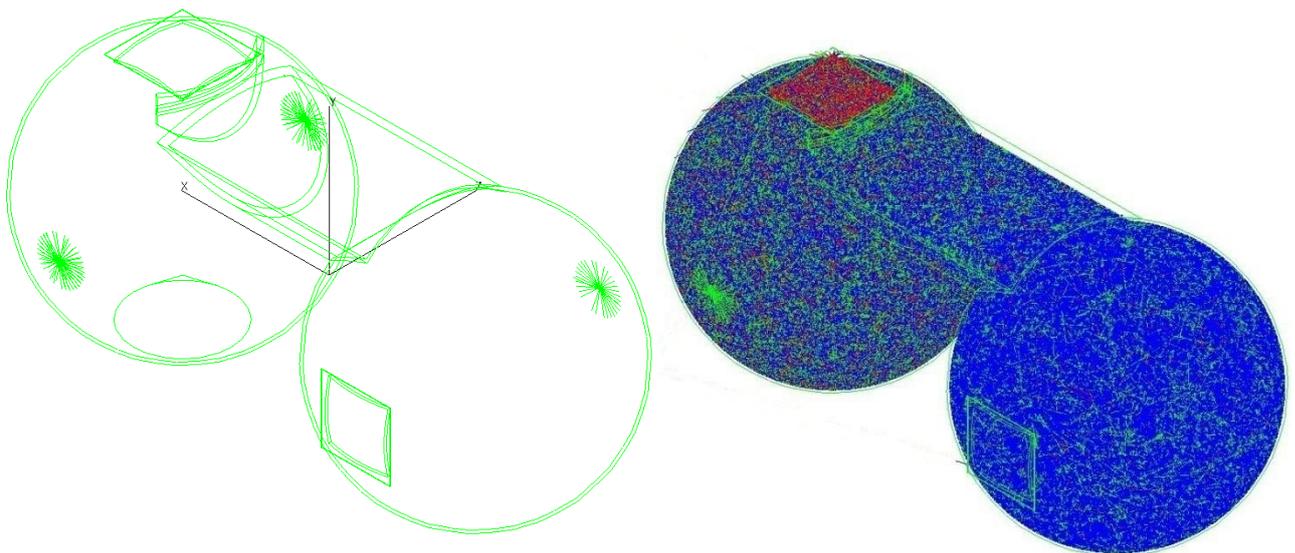


**Fig. 5.2.1:** Il flussimetro DISR creato in CAD nella versione con e senza l’inserto che ne modifica l’area di passaggio



**Fig.5.2.2:** Visione del DISR di taglio nel piano X-Y

Per studiare poi le proprietà ottiche del DISR sono stati esportati i vari modelli del flussimetro in TracePro .

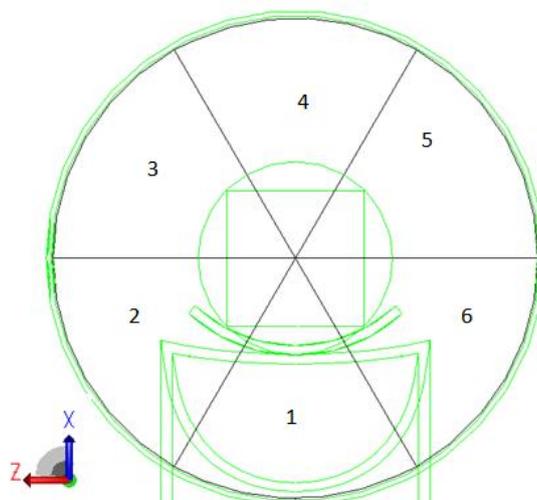


**Fig.5.2.3:** Il flussimetro DISR visto in TracePro a sinistra il DISR prima della simulazione e a destra il DISR dopo la simulazione dove si possono distinguere tre tipologie di raggi, quelli in rosso hanno potenze che vanno da 0,7 W a 1 W, quelli verdi hanno potenze che vanno da 0,4 W a 0,7 W e quelli blu hanno potenze che vanno da 0,1W a 0,3W e si vede come i raggi entranti dalla finestra d'ingresso siano rossi perché non ancora integrati.

Per primi sono stati inseriti dei prismi in ognuna delle “finestre” del flussimetro, ad ognuno di questi e al DISR sono state date delle proprietà di superficie: le due sfere, il diffusore conico, la superficie del canale di collegamento e la parte che non si affaccia sull’entrata dello schermo hanno una riflettanza  $R_w$  che può variare dal 92% al 99% (in relazione alle esigenze), sono superfici che si comportano come diffusori lambertiani (questo anche per le riflettanze più basse all’interno del nostro range che è sperimentalmente inverosimile), il prisma posizionato nella porta d’ingresso (messo solo per comodità) in modo che i raggi che escono dalla prima sfera, a causa delle riflessioni della stessa, vengano bloccati e quello posizionato nella finestra d’uscita hanno un’assorbanza del 100% e sono quindi dei perfetti assorbitori. La parte dello schermo che si affaccia sull’entrata ha una riflettanza speculare pari al 97% ed è costante al variare della lunghezza d’onda della radiazione.

### 5.2.1 Analisi del flusso all’interno DISR

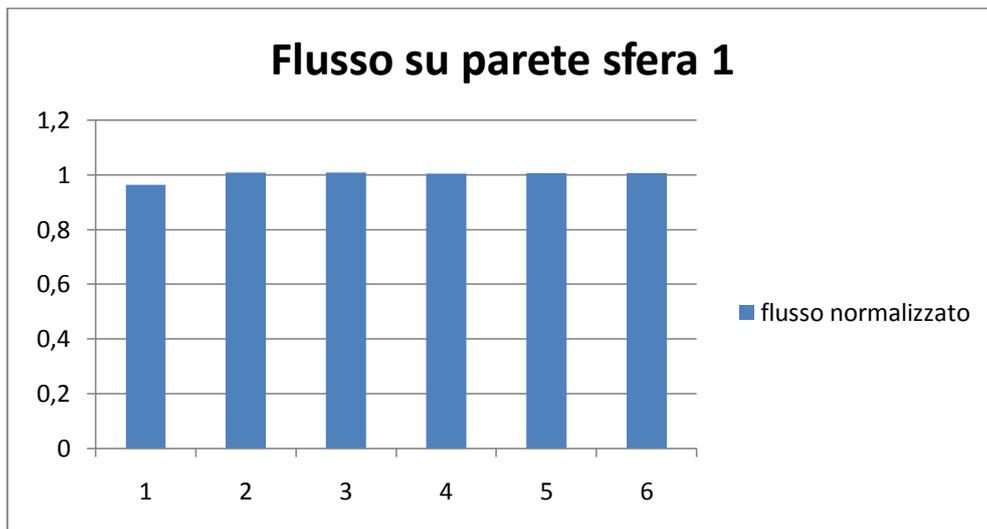
Una volta che sono stati impostati questi parametri si fanno una prima serie di simulazioni volte a verificare la distribuzione del flusso all’interno delle due sfere, come il flusso esce dall’apparecchio e per come il flusso si distribuisce su un eventuale rivelatore posizionato all’uscita. Per queste simulazioni si è deciso di utilizzare il DISR senza inserto quindi con area di  $2,3 \text{ cm}^2$  e con una riflettanza di parete  $R_w$  pari al 95%; per le prime si è andato a studiare l’omogeneità del flusso nelle due sfere, per fare questo, come nel caso del DCR, sono stati utilizzati degli spicchi di superficie appositamente creati per questo scopo, spicchi senza alcuna proprietà ottica che occupano un sesto della sfera considerata sui quali si va a rilevare il flusso incidente. Per queste misurazioni sono state fatte simulazioni con 100000 raggi in entrata con un flusso di 1 W per raggio. Per la prima sfera si è preso come asse di rotazione degli spicchi l’asse parallelo all’asse Y e passante per il centro della prima sfera



**Fig.5.2.1.1:** Sfera 1 DISR con i sei spicchi nel piano X-Z

Dalle simulazioni sono stati ricavati i seguenti dati:

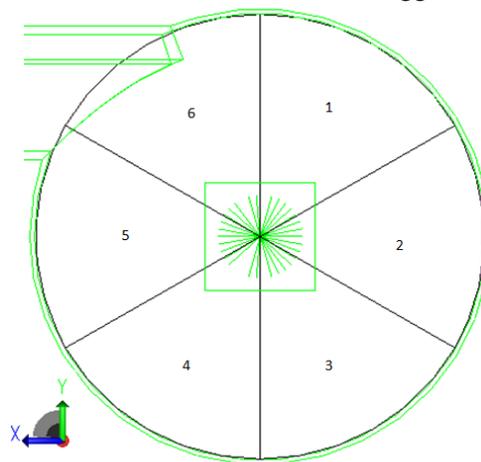
Spicchio della sfera	flusso incidente sullo spicchio in W	Flusso incidente normalizzato
1	313090	0,963675071
2	327640,00	1,00845922
3	327760,00	1,008828574
4	326610,00	1,005288932
5	327160,00	1,006981804
6	327090,00	1,006766348



Dalla tabella e dall'istogramma si nota che il flusso all'interno della prima sfera è pressoché costante, si ha solo nel primo spicchio un flusso minore molto probabilmente imputabile al fatto che il primo spicchio contiene l'entrata del canale di collegamento delle due sfere.

Per quanto riguarda la seconda sfera si è deciso invece di prendere come asse di rotazione degli spicchi l'asse parallelo all'asse Z e passante per il centro della seconda sfera, in modo che ogni spicchio contenesse parte della porta d'uscita e si mantenesse una certa simmetria.

Le simulazioni anche in questo caso sono state fatte con 100000 raggi aventi 1 Watt di potenza ciascuno.



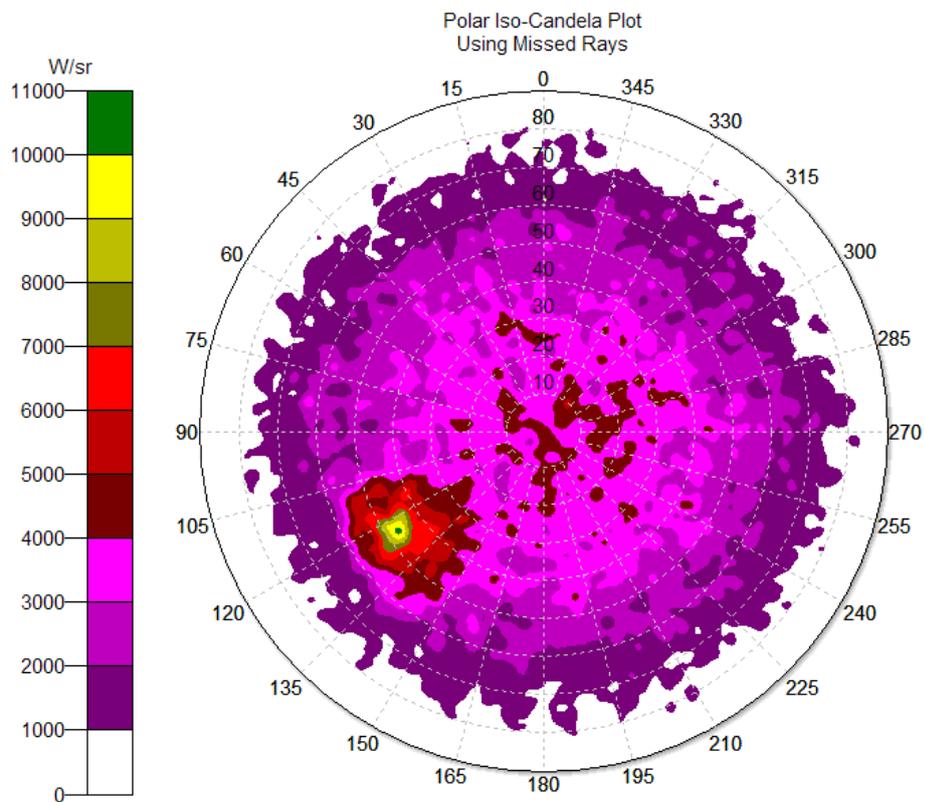
**Fig.5.2.1.2:**Sfera 2 del DISR con i sei spicchi nel piano X-Y

Dalle simulazioni sono stati ottenuti i seguenti dati:

Spicchio della sfera	flusso incidente sullo spicchio in W	Flusso incidente normalizzato
1	45899	1,01994378
2	44643	0,992033599
3	42903	0,953368221
4	42090	0,935302157
5	43484	0,966278902
6	50990	1,133073342

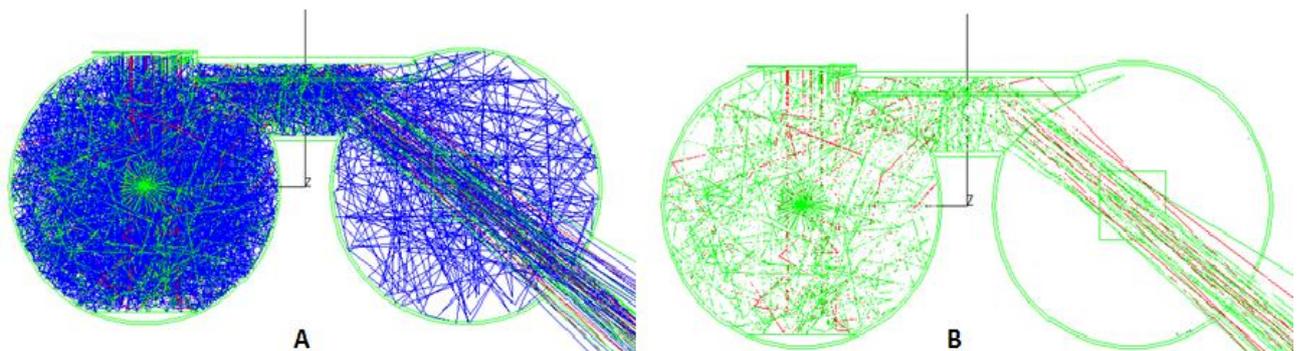


Il flusso nella seconda sfera è meno costante rispetto alla prima forse a causa dell'azione del canale di collegamento; come si vede in tabella nel sesto spicchio si ha un flusso maggiore rispetto agli altri dato dal fatto che questo contiene l'uscita del canale di collegamento dal quale proviene tutta la radiazione che entra nella seconda sfera. Fatto ciò si è studiato come la luce esce dal dispositivo dal momento che in questo caso si ha un apparato che è differente da un normale accoppiamento di due sfere integratrici, per questo motivo si è aperto il DCR (si è tolto il prisma che chiudeva l'uscita) e si è studiata la distribuzione di potenza dei raggi. La simulazione è stata fatta sempre con il DISR avente area dell'inserito pari a  $2,3 \text{ cm}^2$  e riflettanza  $R_w$  pari al 95%, ma in questo caso per una maggior precisione possibile e compatibilmente con i limiti di memoria del computer da noi utilizzato sono stati "lanciati" in entrata al DISR cinquecentomila raggi (sono stati utilizzati un minor numero di raggi rispetto al DCR perché il DISR ha degli elementi più complessi e quindi una maggior richiesta di memoria per l'elaborazione). Dalle simulazioni grazie a TracePro sono stati estrapolati tre tipologie di plot o distribuzioni del flusso radiante come per il DCR: la prima che si è analizzata è la Polar-Iso candela e mette in relazione il flusso per angolo solido in funzione dell'angolo polare e di quello azimutale:



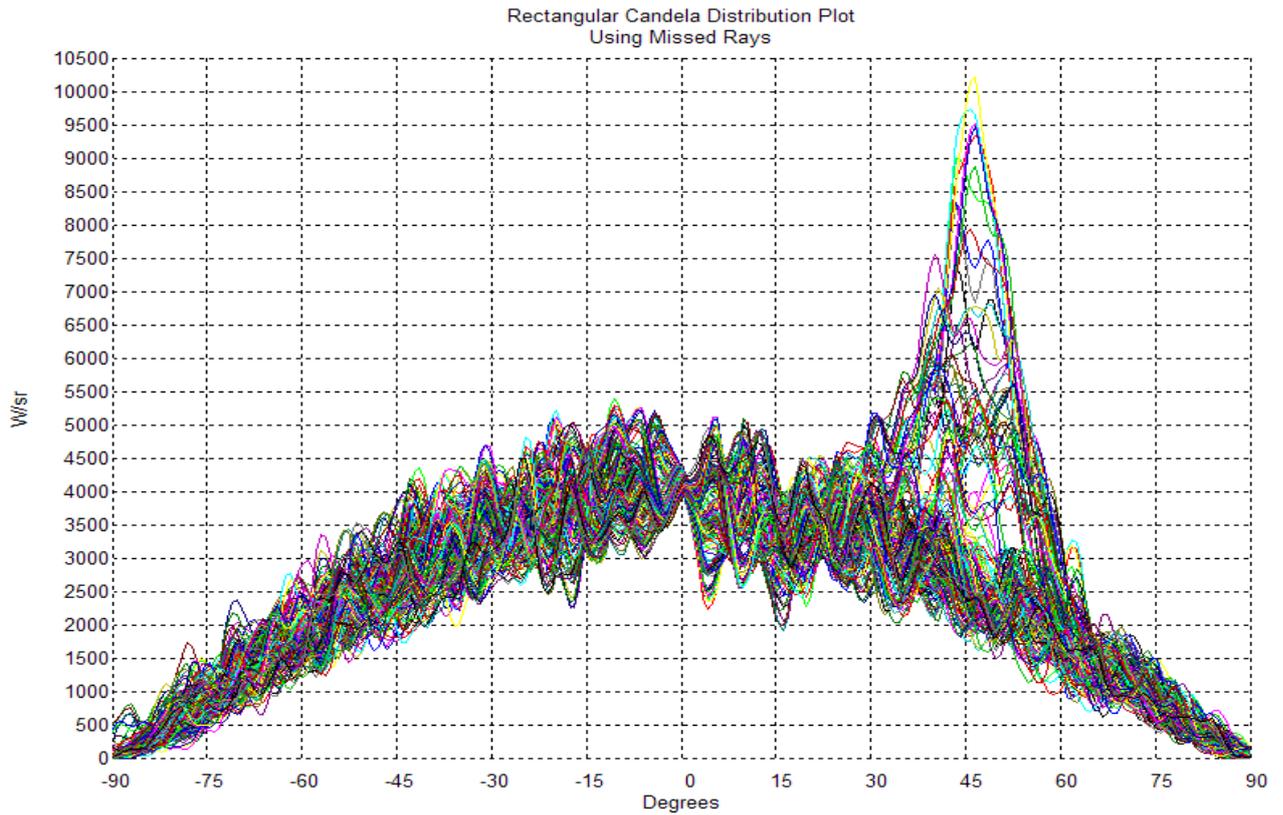
**Fig.5.2.1.3:** “Polar-Iso candela” per cinquecentomila raggi: Gli angoli sulla circonferenza sono gli angoli azimutali mentre gli angoli sul raggio sono gli angoli polari

Da questa distribuzione si nota che la luce uscente dal DISR è fortemente disomogenea/direzionale e senza un'apparente correlazione spaziale, infatti si ha un fondo di flusso apparentemente lambertiano con un picco di flusso in una regione delimitata del piano (tra  $40^\circ$  e  $50^\circ$  per gli angoli polari e tra  $125^\circ$  e  $135^\circ$  per gli angoli azimutali) ,se si selezionano i raggi di questa regione e si va a vedere da dove sono originati si nota che tali raggi sono i meno integrati da tutto l'apparecchio e che, entrati nel DISR, hanno fatto solo due/tre riflessioni , la prima sul diffusore conico posto alla base della prima sfera eventualmente una seconda sempre nella prima sfera e una terza nel canale di collegamento e poi sono usciti quindi senza essere integrati dalle seconda sfera, dal momento che hanno fatto meno riflessioni hanno subito una minore attenuazione e quindi sono i raggi più energetici .

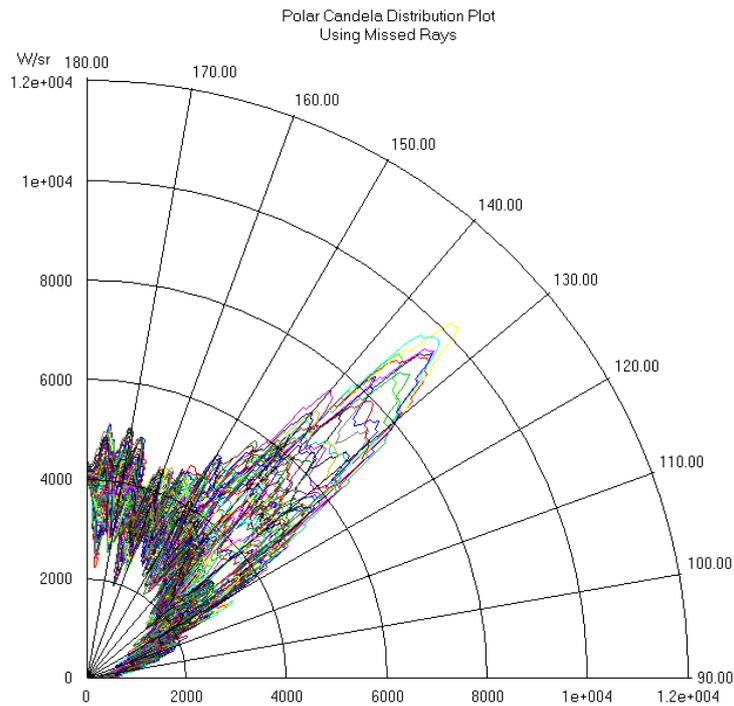


**Fig.5.2.1.4:A)**”Storia” dei raggi all’interno del DISR della regione selezionata (tra questi si è naturalmente selezionato anche un fondo di raggi integrati in blu) B) Selezione dei raggi più energetici (in verde e in rosso) attraverso metodologie di elaborazione dell’immagine

Gli altri due plot creati sono come nel caso del DCR il rectangular iso candela e il Polar candela distribution

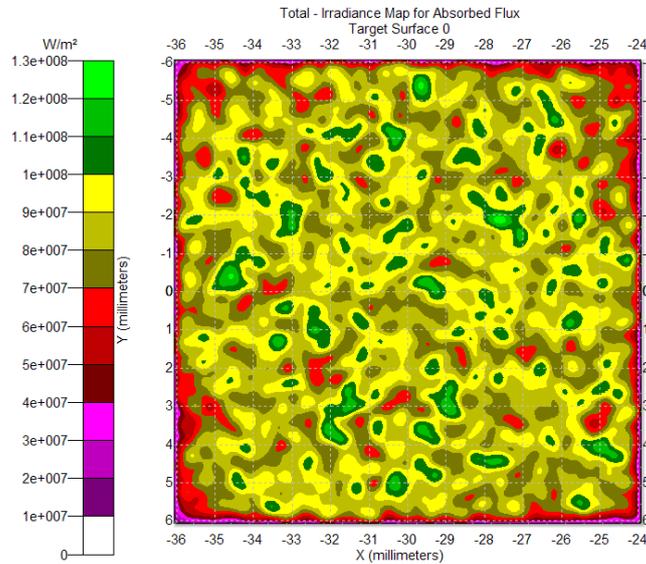


**Fig.5.2.1.5:** “Rectangular candela distribution” del DISR per cinquecentomila raggi: ogni curva nel grafico mi rappresenta un differente angolo azimutale



**Fig. 5.2.1.6:** “Polar candela distribution” per cinquecentomila raggi

Il problema del picco nel flusso si evidenzia anche negli altri due plot, infatti si vede soprattutto nel rectangular iso candela che in prossimità degli angoli polari già trovati nel polar iso candela ha un picco nel flusso. Effettuando però una simulazione volta a rivelare l'omogeneità del flusso sul nostro rivelatore posto all'uscita del flussimetro si ottiene una mappa d'irradianza che presenta un flusso abbastanza costante .



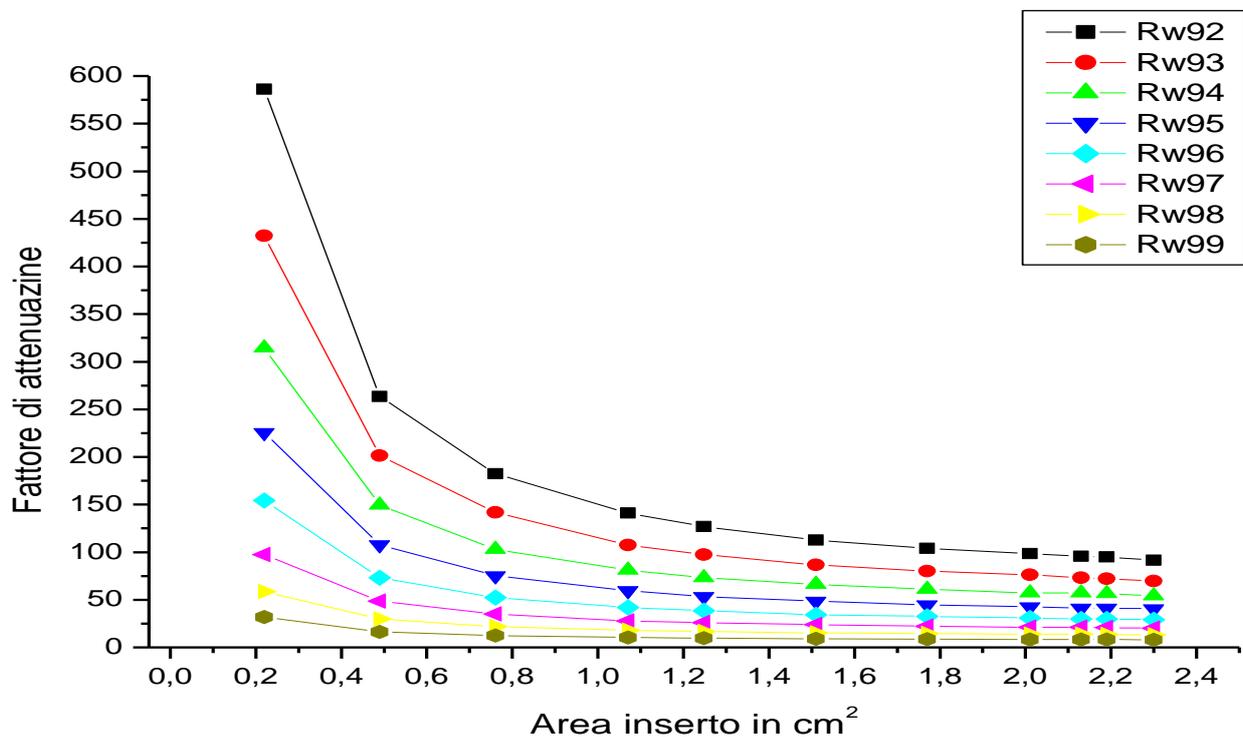
**Fig.5.2.1.7:**Mappa d'irradianza della superficie posta a chiusura dell'uscita del DISR risultante da una simulazione di cinquecentomila raggi.

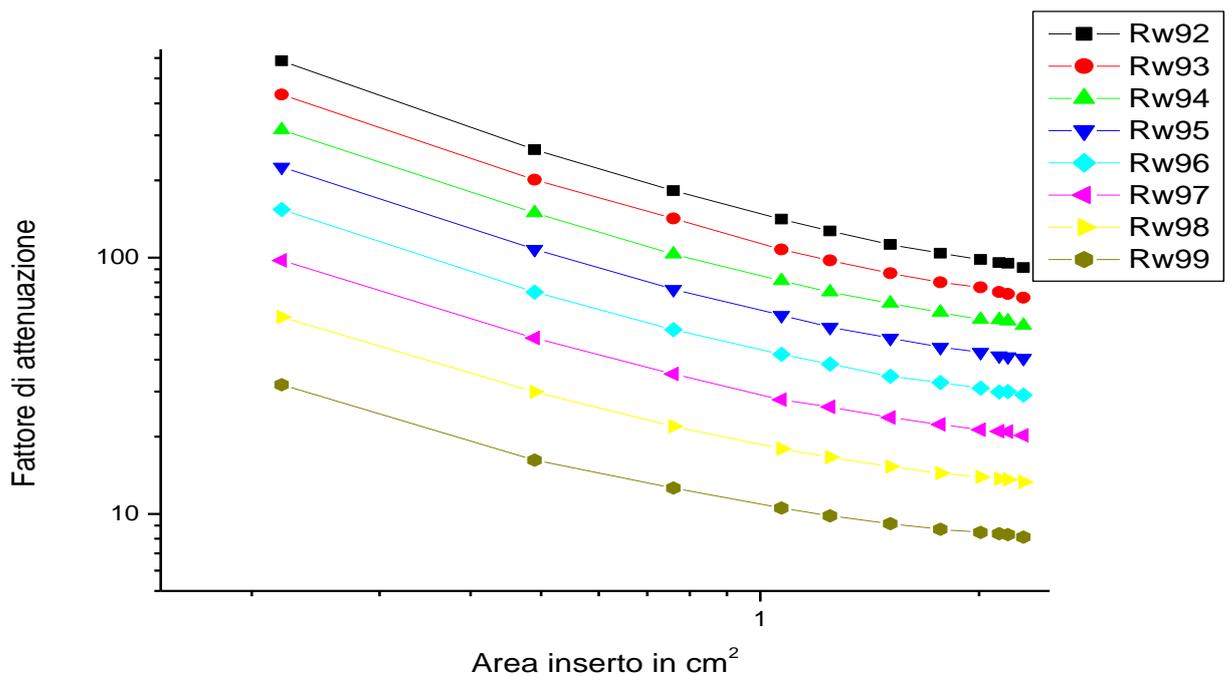
Questo perché la mappa d'irradianza della superficie posta all'uscita dell'apparato integra la luce che arriva sul rivelatore e quindi rivela un flusso abbastanza costante . Il picco così ( diretto) direzionale può eventualmente creare problemi nel caso in cui si utilizzi un rivelatore che risente della direzionalità della radiazione luminosa

## 5.2.2 Come varia il fattore di attenuazione al variare della porta intermedia e della riflettenza di parete

Noto il funzionamento del flussimetro e della distribuzione del flusso all'interno delle sue componenti si è andato poi a studiare l'influenza della variazione d'area dell'insero e della riflettenza di parete sul fattore di attenuazione. Le simulazioni sono state fatte per aree dell'insero pari a: 0,22 cm<sup>2</sup> 0,49 cm<sup>2</sup> 0,76 cm<sup>2</sup> 1,07 cm<sup>2</sup> 1,25 cm<sup>2</sup> 1,51 cm<sup>2</sup> 1,77 cm<sup>2</sup> 2,01 cm<sup>2</sup> 2,13 cm<sup>2</sup> 2,19 cm<sup>2</sup> e infine per il DISR senza insero che ha un'area intermedia di 2,3 cm<sup>2</sup> e riflettanze delle sfera (R<sub>w</sub>) che vanno dal 92% al 99%. I raggi mandati in entrata sono per ogni prova 5500000 con un flusso per raggio di 1W. Sono stati ricavati i seguenti dati:

Porta intermedia in cm <sup>2</sup>	Rw 92%	Rw 93%	Rw 94%	Rw 95%	Rw 96%	Rw 97%	Rw 98%	Rw99%
0,22	586,19	432,38	314,46	225,74	154,22	97,5	58,5	31,86
0,49	263,4	201,3	149,49	107,7	73,3	48,5	29,89	16,18
0,76	182,2	141,8	103,09	75,1	52,3	35,1	21,95	12,62
1,07	141	107,4	81,07	59,59	41,9	27,85	17,94	10,52
1,248	126,8	97,45	73,3	53,5	38,4	26,1	16,62	9,82
1,51	112,5	86,8	66,3	48,5	34,4	23,77	15,25	9,14
1,77	103,9	80	61,06	44,7	32,5	22,3	14,4	8,7
2,01	98,3	76,4	57,3	42,7	30,9	21,3	13,9	8,45
2,13	95,6	73,3	57,1	41,42	29,9	21	13,7	8,36
2,19	94,9	72	56,4	41,1	29,97	20,9	13,6	8,3
2,3	91,4	69,8	54,2	40,5	29,1	20,2	13,3	8,1





Dai grafici si nota come il fattore di attenuazione viene influenzato dall'area dell'inserto e dalla riflettanza di parete  $R_w$ , in particolare a parità di area di inserto e variando la riflettanza si nota che un incremento/decremento molto alto del fattore d'attenuazione, mentre variando l'area dell'inserto e a parità di riflettanza, si hanno in media minori variazioni. I valori del fattore di attenuazione vanno da un minimo di 8,1 per una riflettanza del 99% e con il DISR senza inserto, mentre si ha un fattore di attenuazione massimo pari di 586; si deve però considerare che generalmente si lavora solo con riflettività di parete abbastanza alta che prende come valore minimo una riflettività del 95%, questo perché altrimenti come detto precedentemente, si avrebbero problemi per quanto riguarda il dissipamento del calore e il caso ottimale sarebbe lavorare con riflettanze del 98% e 99%

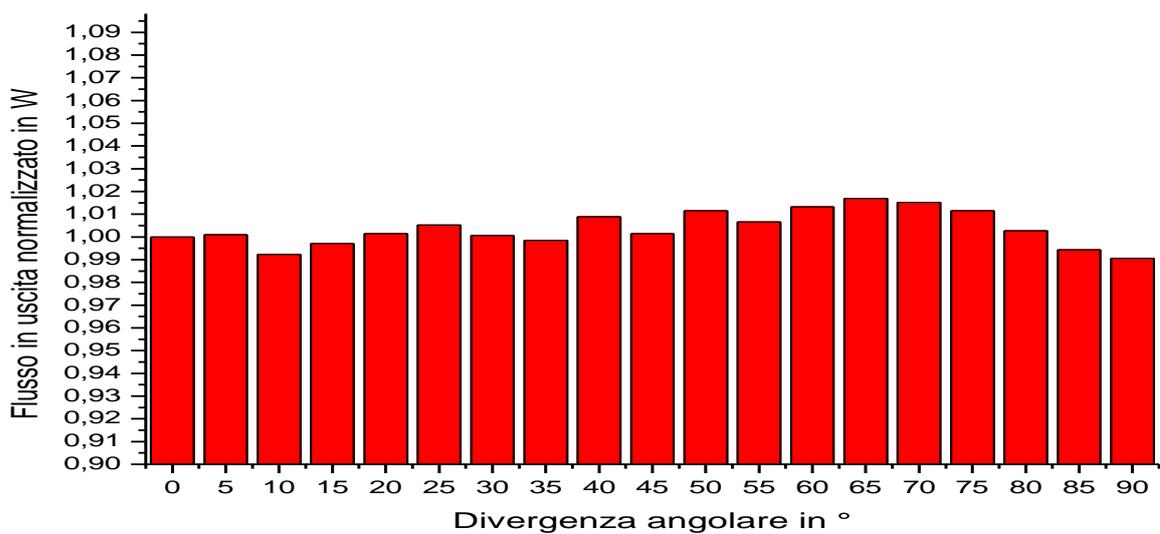
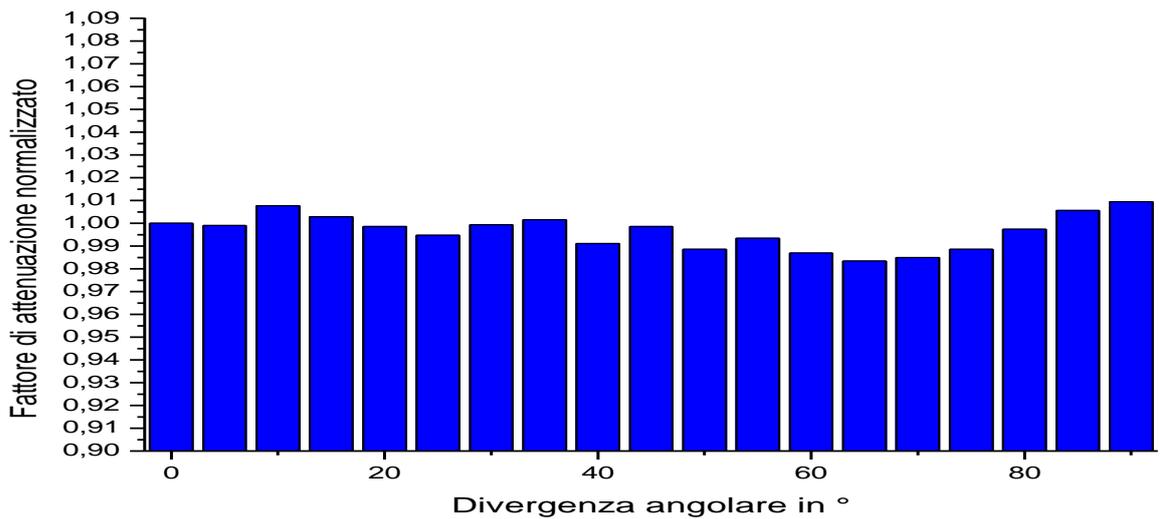
### 5.2.3 Come la divergenza del fascio influenza il fattore di attenuazione nel DISR

Si è poi indagato la dipendenza del fattore d'attenuazione dalla divergenza del fascio in ingresso, questa infatti è la prima motivazione per la quale si è costruito il DISR come evoluzione del DCR ,che invece aveva un'incertezza del 5% e questo era un errore troppo alto per gli standard dei radiometri per luce solare concentrata .

Si ricorda che gli elementi introdotti nel flussimetro per migliorare questo aspetto sono principalmente due: il primo è il diffusore conico che impedisce che i raggi meno divergenti riescano dalla sfera dopo una prima riflessione e il secondo invece è lo schermo con una superficie che ha proprietà di riflettanza speculare, questa sostituisce quelli che nel DCR erano i baffles e fa in modo che i raggi più divergenti non escano, situazione che avveniva con i baffles. Si è quindi inviato in entrata al flussimetro 5500000 raggi aventi 1 W di potenza per raggio, si ha perciò in entrata un flusso costante di 550000 W per ogni prova con divergenza angolare differente.

Dalle simulazioni sono stati ottenuti i seguenti dati:

Divergenza angolare del fascio	Flusso normalizzato	Fattore attenuazione normalizzato
0	1	1
5	1,00097	0,99903
10	0,9923	1,00776
15	0,99708	1,00293
20	1,00146	0,99854
25	1,00527	0,99476
30	1,00065	0,99935
35	0,99846	1,00154
40	1,00892	0,99116
45	1,00146	0,99854
50	1,01151	0,98862
55	1,00657	0,99347
60	1,01322	0,98695
65	1,01687	0,98341
70	1,01524	0,98498
75	1,01151	0,98862
80	1,00268	0,99733
85	0,9944	1,00563
90	0,99059	1,0095



Dalla tabella e dagli istogrammi si evince che per il DISR non è totalmente indipendente dalla divergenza dei fasci in ingresso, ma a differenza del DCR ha una variazione percentuale del flusso rivelato in uscita e quindi del fattore di attenuazione minore/uguale all' 1%, quindi accettabile per gli standard previsti per un ottimo misuratore di flusso.

### 5.3 Come il DISR influenza lo spettro della luce concentrata

L'ultima indagine fatta sul DISR è stata quella di verificare come la risposta spettrale del coating delle sfere influenza lo spettro della radiazione in entrata al DISR e quindi che tipo di spettro si ha all'uscita dell'apparecchio, infatti nelle prove precedenti si è definito un fattore di attenuazione, ma si è sempre supposto che non venisse alterato lo spettro incidente; in realtà lo spettro viene alterato per il fatto che la parete interna riflette in maniera diversa le diverse lunghezze d'onda, ovvero ha una riflettanza spettrale non piatta, di conseguenza, il fattore di attenuazione sarà diverso alle diverse lunghezze d'onda:  $F_A = F_A(\lambda)$ .

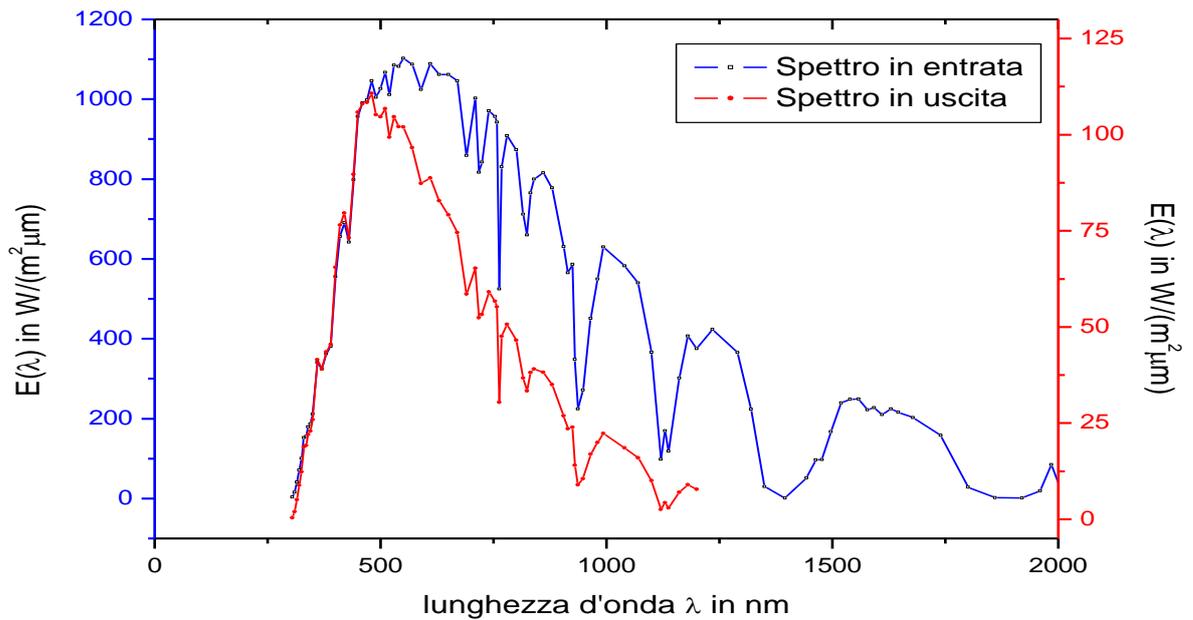
Per ottenere  $F_A(\lambda)$  si necessita innanzitutto di conoscere  $R(\lambda)$  e cioè la riflettanza di parete in funzione delle diverse lunghezze d'onda e si deve assumere che il flusso in ingresso sia costante in  $\lambda$ . Nota  $R(\lambda)$  si vanno a fare tre simulazioni nelle quali viene variata la riflettanza di parete e dove il flusso in entrata al DCR rimane costante. Per queste simulazioni è stato utilizzato il DISR senza inserto e quindi con area massima e si è mandato in entrata un flusso parallelo costituito da 500000 raggi di luce; la prima simulazione si è fatta con una riflettanza di parete pari a 1 in modo che le uniche perdite nel flusso si avessero a causa dell'uscita di quest'ultimo dalla porta d'ingresso si tiene conto che l'unica superficie non diffondente è quella specchiata dello schermo che ha una riflettanza speculare costante al variare della lunghezza d'onda della radiazione incidente. Successivamente sono state effettuate le altre due simulazioni rispettivamente con riflettività di parete del 98% e del 95%.

Riflettanza parete $R_w$	Flusso in entrata in W	Flusso in uscita in W	Fattore di attenuazione
1	500000	116690	4,285
0.98	500000	37628	13,228
0.95	500000	12322	40,578

Utilizzando ora le formule già viste nel DCR 4.4.1/4.4.2/4.4.3/4.4.4/4.4.5 si ricava il numero di riflessioni medio che un raggio fa all'interno del DISR  $\Rightarrow N=36$ .

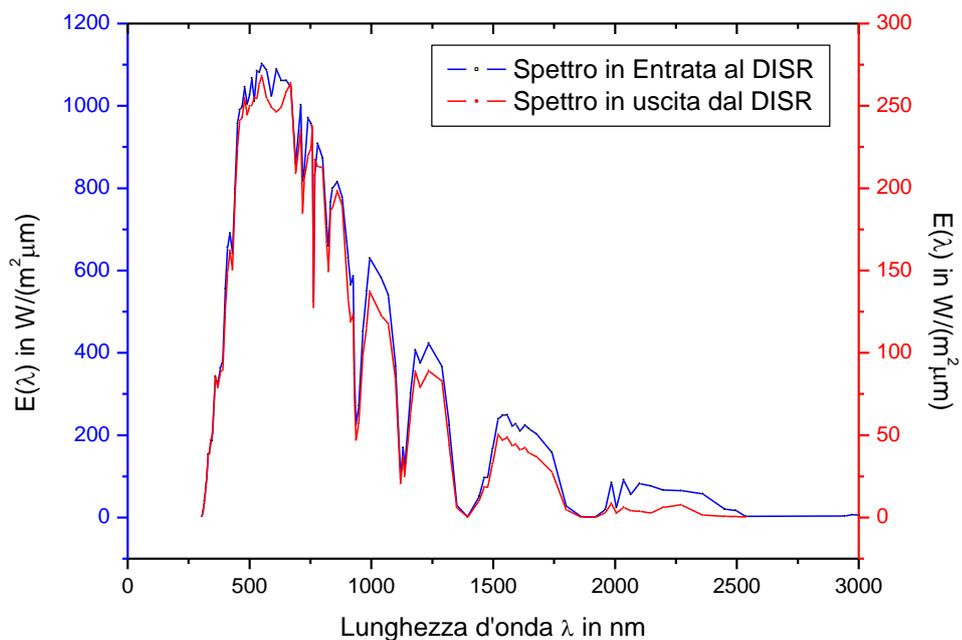
Una volta ottenuto il numero di riflessioni, conoscendo  $R(\lambda)$  e conoscendo il fattore di attenuazione per riflettanza uguale a uno si può ricavare:

$$E_{out}(\lambda) = \frac{S_{in}}{S_{out}} \cdot E_{in}(\lambda) \cdot \frac{R(\lambda)^N}{f_A(1)}$$



Anche nel caso del DISR si vede che lo spettro viene attenuato soprattutto nella componente rossa, lo spettro che si ottiene all'uscita del DISR non è molto differente da quello del DCR dato che le riflessioni che i raggi effettuano all'interno dei due radiometri non sono molto differenti.

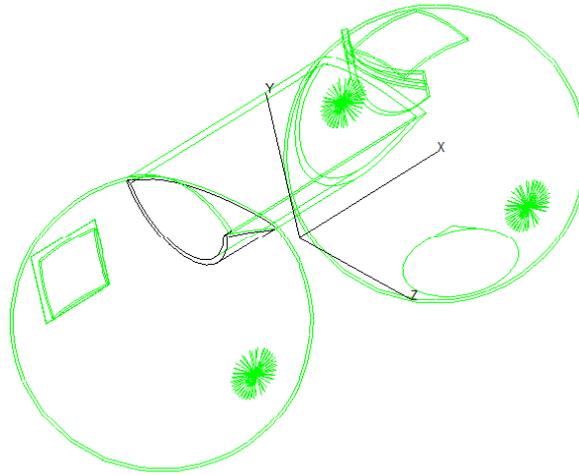
Se si va a cambiare il coating del DISR: sostituendo il BaSO<sub>4</sub> con il Zenith (vedi R(λ) nel capitolo del DCR) e andiamo a vedere come le riflessioni del DISR vanno ad influire nello spettro della luce diretta otteniamo:



Si vede anche nel caso del DISR come il miglioramento del coating di parete comporti una minor modificazione dello spettro della luce diretta in entrata.

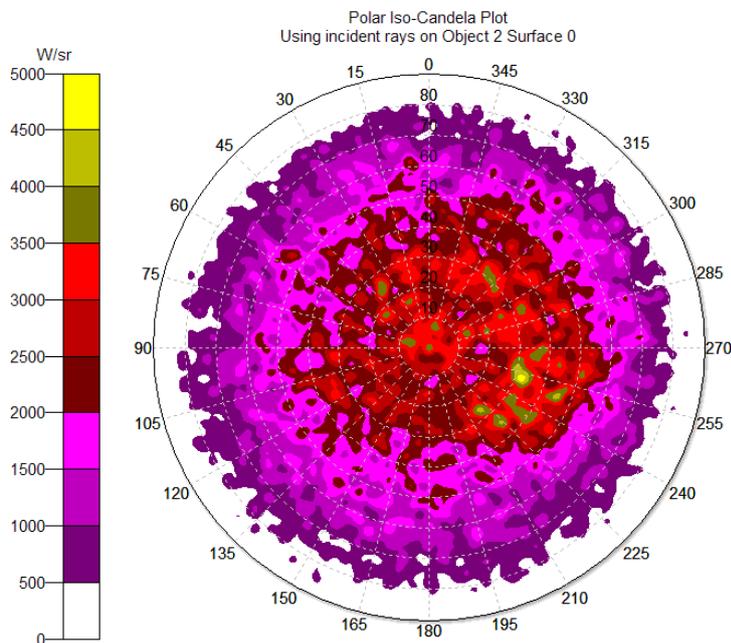
## 5.4 DISR modificato

Si è creato inoltre una versione modificata del DISR in modo da ovviare al problema del picco di flusso che compariva quando si studiava la distribuzione di flusso all'uscita del flussimetro. Nota già la direzione dalla quale proviene la radiazione incriminata si è cercato di introdurre un elemento schermante che diffondesse di nuovo tale radiazione senza interferire nel lavoro di integrazione, attenuazione della luce, nell'indipendenza del fattore di attenuazione dalla divergenza angolare e nel buon funzionamento in generale come radiometro. Dopo differenti tentativi si è trovato un elemento schermante con una forma che soddisfaceva tali esigenze: la forma in questione è il prolungamento della parte inferiore del canale ottico nella seconda sfera.



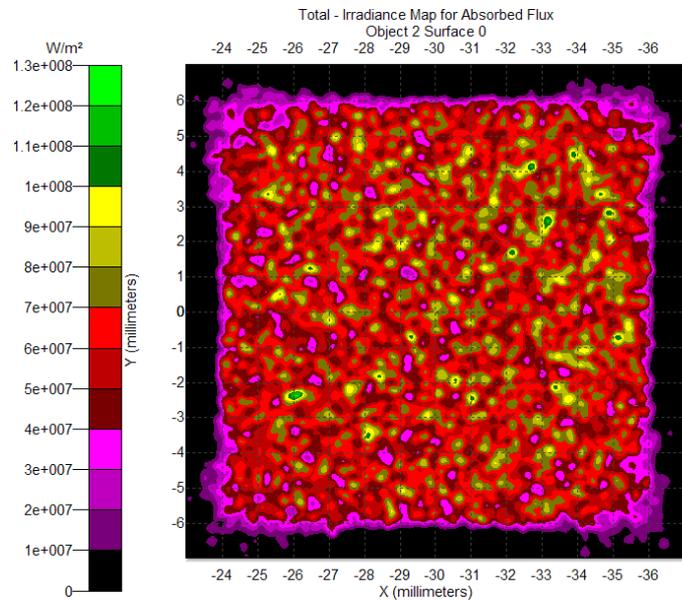
**Fig.5.3.1;**DISR modificato in TracePro

Questa parte del radiometro fa sì che i raggi che creavano il picco nel flusso venissero ridistribuiti all'interno della seconda sfera, questo si verifica anche quando si va a vedere il polar iso candela relativo



**Fig.5.3.2:** “Polar iso Candela” del DISR modificato

Si nota come non si è tolta completamente la disomogeneità del flusso infatti si hanno ancora parti nelle quali si hanno dei picchi di flusso seppur minore. Infatti rispetto al DISR “non modificato” si ha una differenza tra il flusso minimo e il flusso massimo all’interno del plot pari a 4000 W mentre prima si aveva una differenza pari a 9000 W. Questa peculiarità si ripercuote anche sull’omogeneità del flusso sul rivelatore infatti si constata un minimo miglioramento anche in questo frangente.



**Fig.5.3.3:** mappa d’irradianza del rivelatore posto all’uscita del DISR modificato

Questa modifica sicuramente incide anche sul fattore di attenuazione anche se, dal momento che non si sono andati a modificare gli elementi che rendono indipendente il fattore di attenuazione del DISR dalla divergenza angolare dei raggi si è supposto che il DISR modificato posseda ancora questa proprietà.

## Conclusioni

In questo lavoro di tesi sono state studiate le caratteristiche di due flussimetri per verificare la loro capacità di misurazione della luce solare concentrata, attraverso diverse prove di simulazione ottica.

Il DCR si è dimostrato essere un buon dispositivo di integrazione della luce, ottima proprietà per un flussimetro perché distribuisce in modo omogeneo la luce sul rivelatore e quindi permette a quest'ultimo di lavorare in condizioni ottimali, ha inoltre un fattore di attenuazione alto anche per pareti con riflettività alta, necessario nella pratica per avere uno strumento esente da problemi di dispersione del calore, quindi utilizzabile anche per potenze che si aggirano sui 200/300 soli . Il DCR però presenta un'eccessiva dipendenza del flusso in uscita dalla divergenza angolare dei raggi in entrata, infatti si ha una variazione percentuale del fattore d'attenuazione tra il 4%-5%, una variazione troppo alta per gli standard richiesti dal nostro obiettivo e cioè avere un radiometro universale. Il DISR a differenza ha un fattore di attenuazione molto meno dipendente dalla divergenza angolare del fascio in entrata, infatti si ha una variazione percentuale di quest'ultimo pari all'1%, presenta però una forte direzionalità nel flusso di uscita che si traduce in una minor omogeneità del flusso sul rivelatore e un potenziale problema in caso si utilizzino rivelatori che risentono della direzione da cui proviene la luce. Per questo motivo si è creata una versione modificata del flussimetro DISR che vede l'utilizzo di un elemento schermante posto all'interno della seconda sfera per diffondere la luce che creava quel picco; in questo modo si è visto che il flusso viene ridistribuito e si ha una situazione più omogenea anche se alcuni picchi minori di flusso permangono. Dal momento che non si sono andati a modificare gli elementi che rendono indipendente il fattore di attenuazione del DISR dalla divergenza angolare dei raggi si è supposto che il DISR modificato posseda ancora questa proprietà. L'ultima caratteristica che si è studiata per entrambi i dispositivi è stata l'influenza che il DCR e il DISR hanno sulla forma dello spettro della luce in entrata, per entrambi i radiometri si hanno delle variazioni nello spettro e tali variazioni sono molto simili tra loro, questo perché la luce compie quasi lo stesso numero di riflessioni al loro interno. Dalle prove effettuate si nota che più che dal tipo di radiometro lo spettro in uscita è influenzato dal coating applicato alla parete del dispositivo; quindi nel caso in cui si debbano fare anche delle prove di analisi spettrale conviene utilizzare un coating migliore, in modo che lo spettro della luce non venga eccessivamente influenzato dal passaggio attraverso il radiometro . Confrontando i due nuovi apparecchi con i precedenti radiometri per luce concentrata si può dire che i due flussimetri che sono stati studiati in questa tesi sono migliori rispetto ai precedenti; questo perché con un solo apparecchio è possibile avere differenti fattori di attenuazione grazie alla possibilità di cambiare gli inserti e quindi di poterli adattare a diverse tipologie di concentrazione della luce che necessitano diversi tipi di attenuazione. Permettendo una misura stazionaria della radiazione, senza che ciò comporti il surriscaldamento del fotorivelatore; inoltre per le loro caratteristiche di costruzione e le loro dimensioni limitate possono essere introdotti in diversi punti del fascio concentrato e possono essere impiegati all'esterno su vari impianti di concentrazione.

## **Bibliografia:**

- [1] R.M. Swanson, "The promise of Concentrators", Prog. Photovolt. Res. Appl. **8**, 93-111 (2000).
- [2] "Diffuse Reflectance Coatings and Materials", Labsphere, 1996 Catalog.
- [3] "Sphere Systems and Instrumentation", Labsphere, 2000-2001 Catalog II.
- [4] "A Guide to Integrating Sphere Radiometry and Photometry", Labsphere Catalog.
- [5] "Handbook of Applied Photometry", ed. by C. DeCusatis, Optical Society of America and Springer-Verlag New York, Inc., 1988, p. 1.
- [6] "TracePro User's Manual" Release 3.0. Copyright © 2002 by Lambda Research Corporation.
- [7] Integrating sphere : Desing and application Hoffman sphereoptics
- [8] Teoria delle sfere integratrici, dalle lezioni di Ottica applicata 2008/2009 A.Paretta
- [9]AutoDesk® Inventor™ Professional 2008 User's Manual by Autodesk inc.
- [10] Relazione tecnica:" radiometro a doppia cavità per alte densità di flusso DCR", Antonio Parretta, Giuseppe Nenna, Michele Pellegrino, Giovanni Flaminio, Stefano Bolognesi.
- [11]Relazione tecnica : "radiometro a doppia sfera integratrice DISR" Antonio Parretta
- [12] Methods of Characterizing the Performance of Radiometers and Photometers, CIE Publication #53, 1982.(also published as DIN 5032, Parts 6-7 (12.85)).
- [13]"spettro della radiazione diretta" photovoltaic mesurment science and engeniring Keth A. Eney David L. King
- [14] Bass,Michael : Handbook Of Optics Vol1 2<sup>nd</sup> Ed,Fundamentals,Techniques,Design