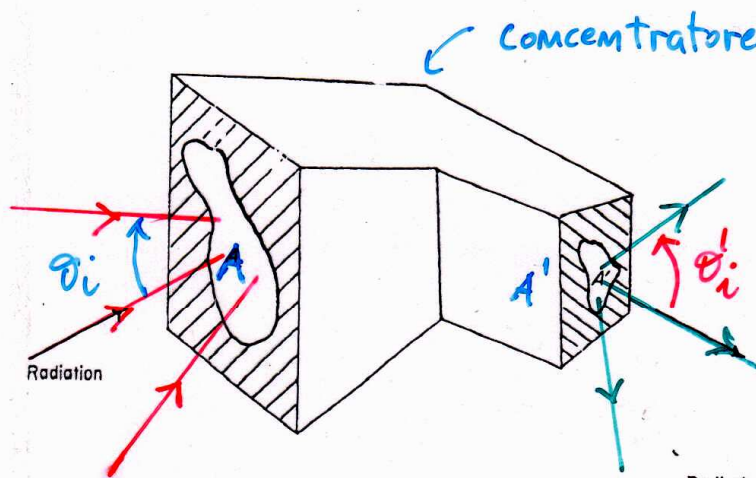


# LA CONCENTRAZIONE DELLA LUCE SOLARE



La concentrazione della luce comporta sempre l'espansione angolare del fascio.

Rapporto di Concentrazione :

$$C = A/A' \quad \underline{3D}$$

{ A = Area apertura d'ingresso

{ A' = Area (ottimizzata) apertura d'uscita

La compressione del fascio avviene sulle due dimensioni trasversali all'asse del concentratore.

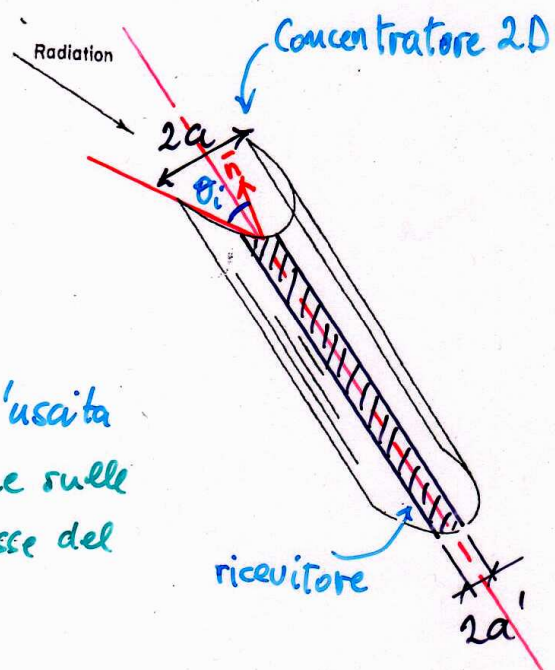
Se il concentratore 3D è ideale:

$$A' = f(A, \theta_i) = A \cdot \sin^2 \theta_i$$

$\theta_i$  = angolo di accettazione



$$C = A/A' = \frac{1}{\sin^2 \theta_i}$$



Rapporto di concentrazione:

$$C = a/a' \quad \underline{2D}$$

{ 2a = larghezza apertura d'ingresso  
 { 2a' = " " " d'uscita

Se il concentratore 2D è ideale:

$$C = a/a' = 1/\sin \theta_i$$

## ALCUNE DEFINIZIONI

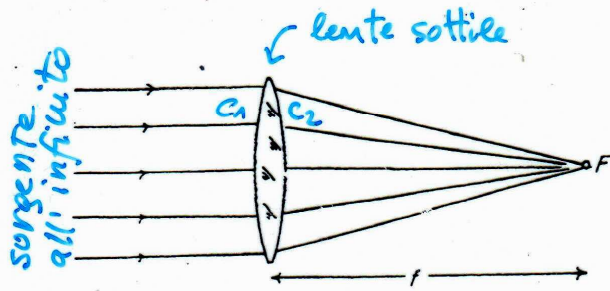
Rapporto di Concentrazione Geometrico:  $C_{\text{geo}}$

Efficienza Ottica del Sistema:  $E_{\text{opt}}$

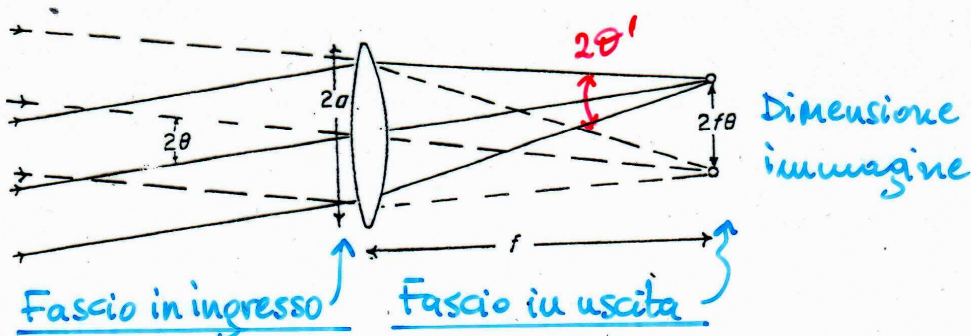
Rapporto di Concentrazione Ottica:  $C_{\text{opt}}$

$$C_{\text{opt}} = E_{\text{opt}} * C_{\text{geo}}$$

# IL CONCETTO DI "ÉTENDUE" NELL'OTTICA GAUSSIANA

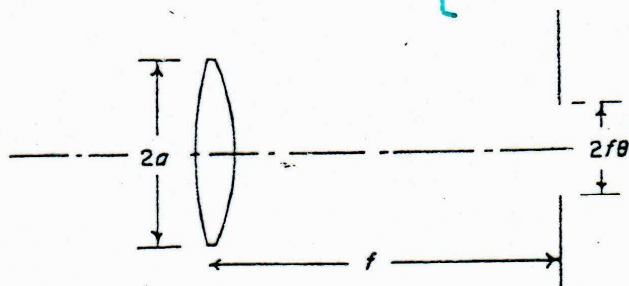


$$1/f = (n-1)(c_1 - c_2)$$



diametro =  $2a$       diametro =  $2f\theta$   
 estens. angolare =  $2\theta$       estens. angolare =  $2a/f$   
 prodotto:  $4a\theta$       prodotto:  $4a\theta$

QUANTITÀ INVARIANTE:       $\left\{ \begin{array}{l} a\theta \text{ (2D)} \\ a^2\theta^2 \text{ (3D)} \end{array} \right.$       Étendue, extent, acceptance, Lagrange invariant



se  $L$  ( $W/m^2 \cdot sr$ ) è la radianza  $\rightarrow$   
 $L \cdot \pi \cdot \theta^2 \cdot a^2$  ( $W$ ) è il flusso che attraversa il sistema  $\Rightarrow$

Fig. 2.7 An optical system of acceptance, throughput, or étendue  $a^2\theta^2$ .

$\Rightarrow$  La quantità  $a^2\theta^2$  (Étendue) è una misura del flusso di energia che attraversa il sistema, a parità di radianza.  
 Rapporto di concentrazione:  $C = \left(\frac{a}{f\theta}\right)^2 = \dots = \left(\frac{\theta'}{\theta}\right)^2$

# GENERALIZZAZIONE DELLA "ÉTENDUE" ALL'OTTICA NON-PARASSIALE

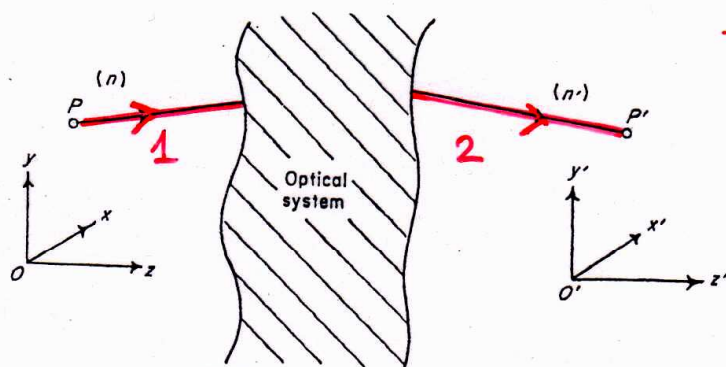


Fig. 2.16 The generalized étendue.

Sistema ottico  
generico

Ingresso:

$$P(x, y, z)$$

coseni direttori del fascio:

$$(L, M, N)$$

Uscita:

$$P'(x', y', z')$$

coseni direttori:

$$(L', M', N')$$

Variando posizione di  $P(x, y, z)$  rispetto a  $x, y$  ;

" La direzione del raggio 1 " " ;

si genera un fascio di area  $(dx \cdot dy)$  e di estensione angolare  $(dL \cdot dM)$ . Corrispondenti variazioni si hanno sul raggio di uscita 2.

Si trova la quantità invariante:

$$n^2 \cdot dx \cdot dy \cdot dL \cdot dM$$

INVARIANTE DI LAGRANGE

$$(n'^2 \cdot dx' \cdot dy' \cdot dL' \cdot dM') = (n^2 \cdot dx \cdot dy \cdot dL \cdot dM)$$

Si definisce quindi la: Generalized Etendue

$$(dx \cdot dy \cdot dp \cdot dq)$$

dove:

$$p = nL \quad ; \quad q = nM$$

ANCORA SULLA "ETENDUE GENERALIZZATA"  
L'EQUIVALENTE MECCANICO

Principio di Fermat:

$$\delta \int_{P_1}^{P_2} m(x,y,z) \cdot ds = 0$$

ponendo:  $ds = [dx^2 + dy^2 + dz^2]^{1/2} = dz [ \dot{x}^2 + \dot{y}^2 + 1 ]^{1/2}$  (derivate rispetto a z)

si ottiene: 
$$\delta \int_{P_1}^{P_2} m(x,y,z) \cdot [1 + \dot{x}^2 + \dot{y}^2]^{1/2} dz = \delta \int_{P_1}^{P_2} \mathcal{L}(x,y,z, \dot{x}, \dot{y}) \cdot dz = 0$$

dove  $\mathcal{L}$  è la funzione Lagrangiana del sistema.

$$\begin{cases} \text{Coordinate generalizzate: } x, y \\ \text{Momenti generalizzati: } p, q \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} p = m \cdot \frac{dx}{ds} = m \cdot \frac{\dot{x}}{[1 + \dot{x}^2 + \dot{y}^2]^{1/2}} \\ q = m \cdot \frac{dy}{ds} = m \cdot \frac{\dot{y}}{[1 + \dot{x}^2 + \dot{y}^2]^{1/2}} \end{cases}$$

Si ricava poi la funzione Hamiltoniana del sistema:

$$\mathcal{H} = -(m^2 - p^2 - q^2)^{1/2} = -m \cdot N$$

dove  $N = \cos \alpha$  direttore lungo l'asse z.

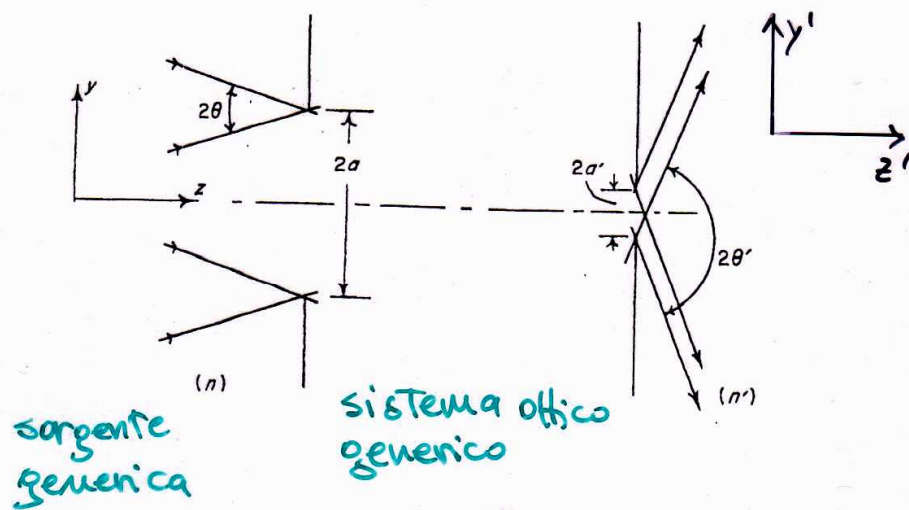
Si individua uno spazio delle fasi:  $(x, y, p, q)$

Dal teorema di Liouville: "volume costante occupato dal sistema nello spazio delle fasi"  $\Rightarrow$

$$\Rightarrow (dx \cdot dy \cdot dp \cdot dq) = \text{cost.} \Rightarrow$$

$\Rightarrow$  equivalente alla "Generalized Etendue" -

## FORMULE PER IL RAPPORTO DI CONCENTRAZIONE



Applichiamo il concetto di "étendue generalizzata":

$$n \cdot dy \cdot dM = n' \cdot dy' \cdot dM'$$

$$4n \cdot a \cdot \sin\theta = 4n' \cdot a' \cdot \sin\theta'$$

2D:

$$C = \left(\frac{a}{a'}\right) = \frac{n' \cdot \sin\theta'}{n \cdot \sin\theta} \Rightarrow C_{\max}^{2D} = \frac{n'}{n \cdot \sin\theta}$$

3D:

$$C = \left(\frac{a}{a'}\right)^2 = \left(\frac{n' \cdot \sin\theta'}{n \cdot \sin\theta}\right)^2 \Rightarrow C_{\max}^{3D} = \left(\frac{n'}{n \cdot \sin\theta}\right)^2$$

Nel caso di concentrazione della luce solare:

$\theta$  fissato:  $\theta \approx 0,005 \text{ rad}$ ;  $n=1 \Rightarrow$

2D:

$$C = \left(\frac{a}{a'}\right) \approx 200 \cdot n' \cdot \sin\theta' \Rightarrow C_{\max}^{2D} \approx 200 \cdot n'$$

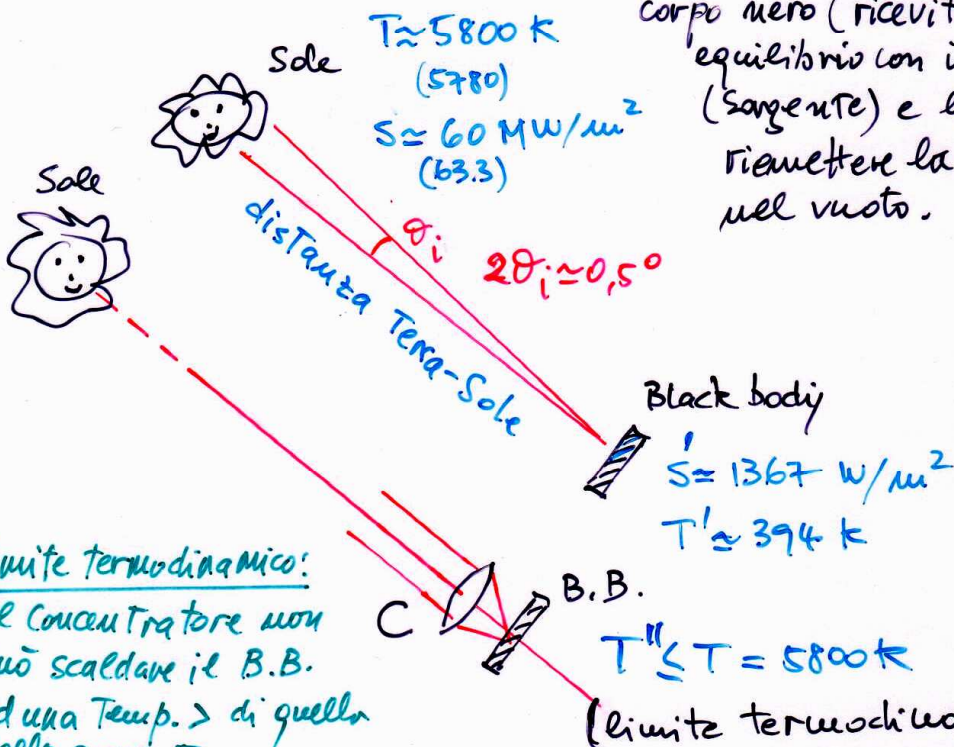
3D:

$$C = \left(\frac{a}{a'}\right)^2 \approx 46.000 \cdot n'^2 \cdot \sin^2\theta' \Rightarrow C_{\max}^{3D} \approx 46.000 \cdot n'^2$$

## LIMITI ALLA CONCENTRAZIONE DELLA LUCE SOLARE

Esiste un limite termodinamico alla concentrazione della luce solare, che dipende dalle caratteristiche geometriche e fisiche del sistema sorgente  $\rightarrow$  ricevitore, ovvero sole  $\rightarrow$  terra.

Sia dato il caso di un corpo nero (ricevitore) in equilibrio con il sole (sorgente) e libero di riemettere la radiazione nel vuoto.



Limite termodinamico:  
Il concentratore non può scaldare il B.B. ad una Temp.  $>$  di quella della sorgente.

Legge della radiazione del corpo nero:  $S = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4$   
 $\sigma =$  costante di Stefan-Boltzmann  $= 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$

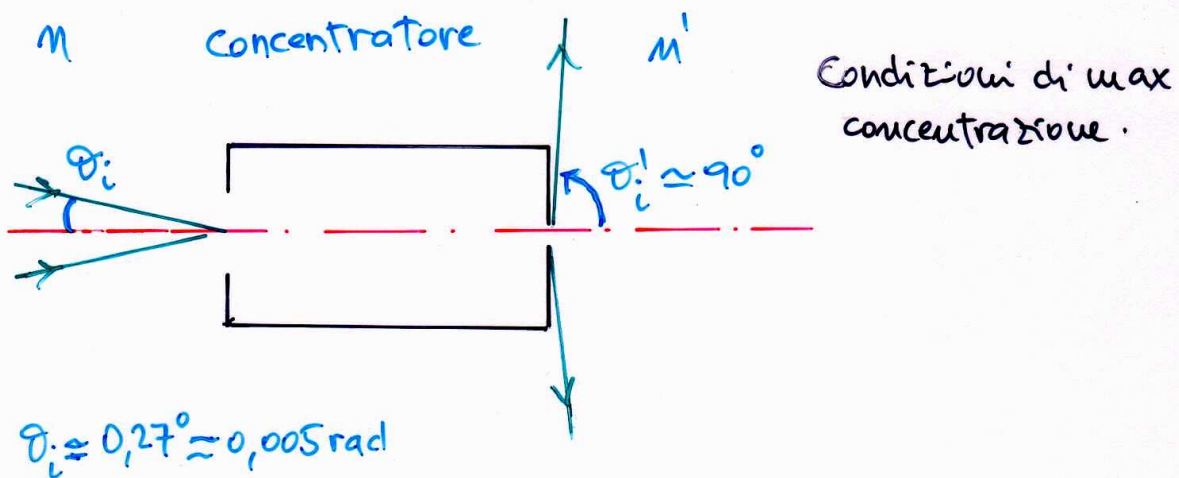
Max. concentrazione raggiungibile:

$$C_{\text{max}} = \left( \frac{T}{T'} \right)^4 = \left( \frac{5780}{394} \right)^4 \approx 46.000 \leftarrow \text{limite termodinamico}$$

$$S = S_{\text{sole}} = C_{\text{max}} \cdot 1367 \text{ W/m}^2 \approx 60 \text{ MW/m}^2 \quad (63.3)$$

$$C_{\text{max}} = \left( \frac{S}{S'} \right) \approx 46.000$$

## LIMITI ALLA CONCENTRAZIONE DELLA LUCE SOLARE



La  $C_{\text{max}}$  la si può ricavare, in maniera del tutto equivalente, dalla espressione della concentrazione.

Concentrazione 3D: 
$$C = \left( \frac{M' \cdot \sin \theta'_i}{M \cdot \sin \theta_i} \right)^2$$

Concentrazione 2D: 
$$C = \left( \frac{M' \cdot \sin \theta'_i}{M \cdot \sin \theta_i} \right)$$

Ponendo: 
$$\begin{cases} M' = M = 1 \\ \theta_i \approx 0,27^\circ \approx 0,005 \text{ rad} \end{cases}$$

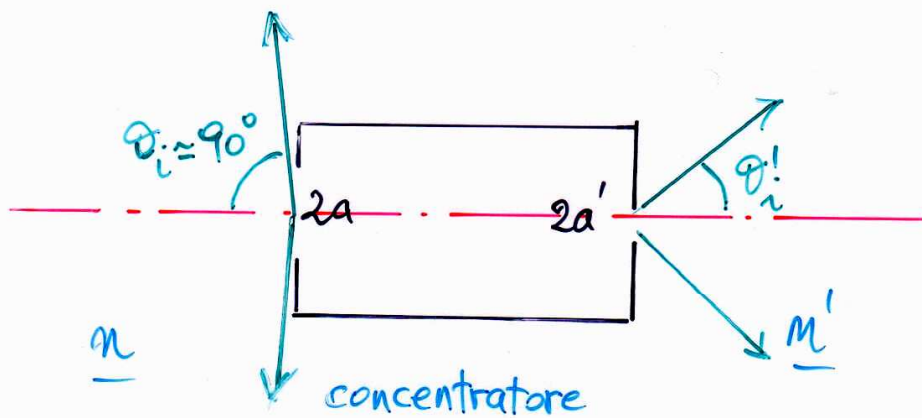
e considerando che la max concentrazione si raggiunge in corrispondenza della max divergenza del fascio in uscita al concentratore;  $\theta'_i \approx 90^\circ$ , si ricava:

$$\underline{3D}: \quad C_{\text{max}} = \left( \frac{1}{\sin \theta_i} \right)^2 \approx \frac{46.000}{(46.200)}$$

$$\underline{2D}: \quad C_{\text{max}} = \left( \frac{1}{\sin \theta_i} \right) \approx \frac{200}{(215)}$$



## CONCENTRAZIONE DI LUCE DIFFUSA



2D:

$$C^{2D} = \left( \frac{n' \cdot \sin \theta'_i}{n \cdot \sin \theta_i} \right) = n' \cdot \sin \theta'_i$$

$$C_{\max}^{2D} = n'$$

3D:

$$C^{3D} = \left( \frac{n' \cdot \sin \theta'_i}{n \cdot \sin \theta_i} \right)^2 = n'^2 \cdot \sin^2 \theta'_i$$

$$C_{\max}^{3D} = n'^2$$

Tipicamente si hanno materiali con  $n' \approx 1,5 \Rightarrow$

limiti di concentrazione  
per la luce diffusa:

$$C^{2D} \approx 1,5$$

$$C^{3D} \approx 2,25$$

## LIMITI ALLA CONCENTRAZIONE DELLA LUCE SOLARE

Le formule per il Rapporto di Concentrazione in un Concentratore 3D danno:

$$C^{3D} = \left(\frac{a}{a'}\right)^2 = \left(\frac{n' \cdot \sin \theta'}{n \cdot \sin \theta}\right)^2$$

Per la concentrazione della luce solare ( $\theta \sim 0.005$  rad,  $n=1$ ), abbiamo quindi:

$$C^{3D} \sim 46.000 \cdot (n' \cdot \sin \theta')^2 \quad \Rightarrow \quad C_{\max}^{3D} \sim 46.000 \cdot (n')^2$$

Ipotizzando  $n = 1.5$ , è allora possibile raggiungere valori di  $C \sim 100.000$

Alla Chicago University, Nonimaging Optics/Solar Energy Group, sotto la direzione del Prof. R. Winston, sono stati progettati nuovi concentratori basati sulla Nonimaging Optics.

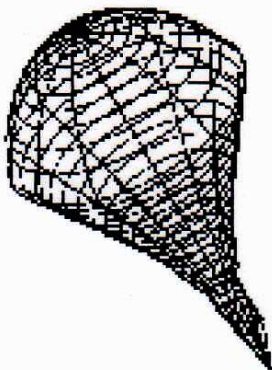
E' stata dimostrata la possibilità di concentrare la luce solare di  $C \sim 84.000$ , raggiungendo in tal modo valori di irradianza superiori a quelli presenti sulla superficie del Sole ( $\sim 60$  MW/m<sup>2</sup>).

### “The 50.000 Suns experiment”

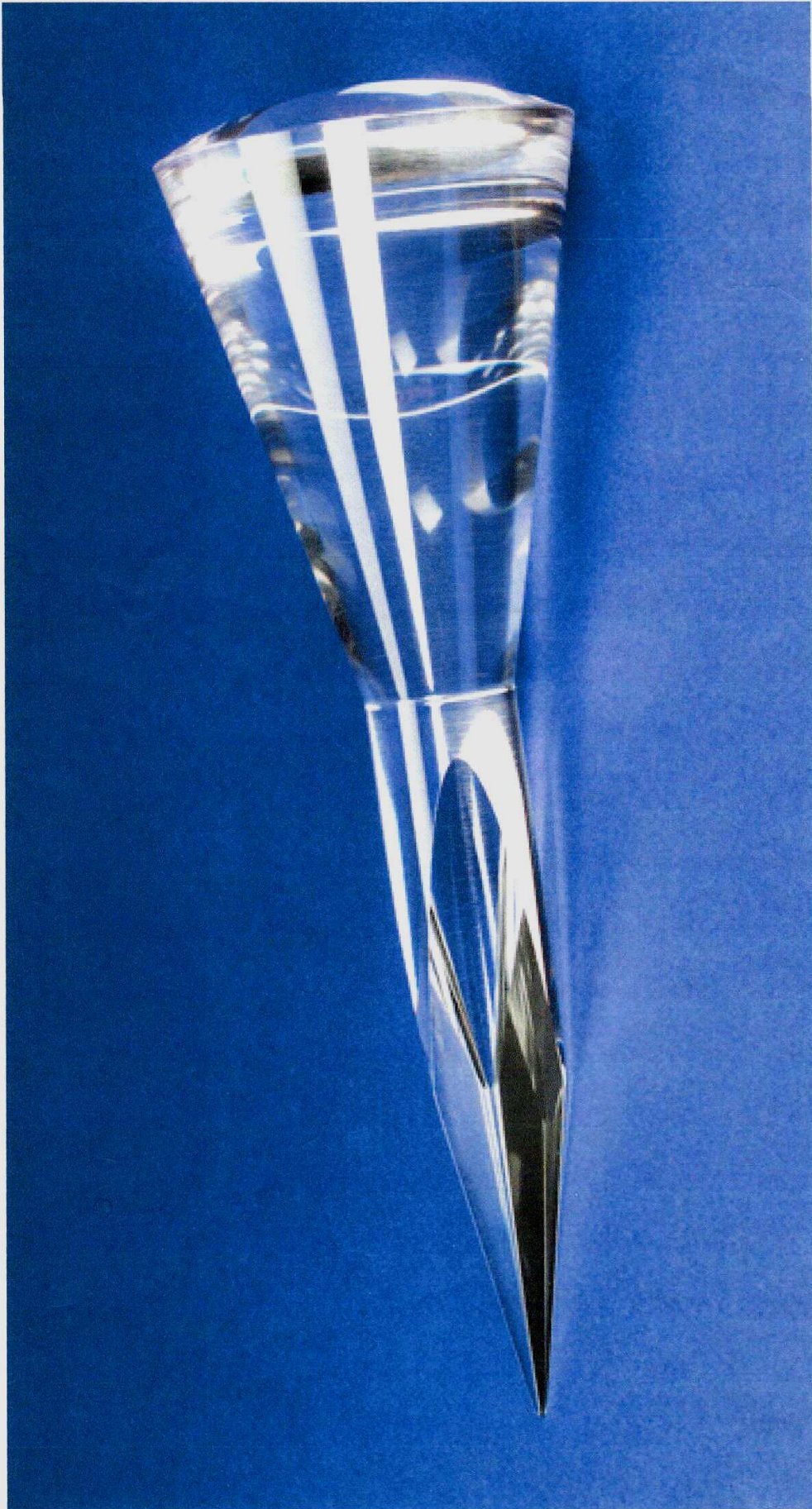
Realizzato, alla Chicago University, il “Dielectric Total Internal Reflection Concentrator (DTIRC)”.

Con questo concentratore, in un esperimento al NREL/HFSF (High Flux Solar Fornace), raggiunta  $C \sim 50.000$  con una potenza di 860 W su un'apertura di 4.6 mm di diametro.

Altri esperimenti con i concentratori nonimaging alla Chicago University:



- A 57 W Sun-Pumped Nd:YAG Laser
- Solar Generation of Fullerenes
- Fundamental Techniques of Nonimaging Optics
- Efficient Illumination Systems



## CAUSE DI NON IDEALITA' NEI CONCENTRATORI:

### *Sistemi Image-Forming (IF)*

In linea di principio, un Imaging Concentrator (IC) ideale si potrebbe progettare, ma la teoria non è ancora in grado di indicare come eliminare le aberrazioni.

Inoltre, anche se si fosse in grado di individuare un IC privo di aberrazioni, non sempre esistono materiali con le caratteristiche indicate (es.  $n=2$ ), né è sempre possibile realizzare tali sistemi quando essi risultino molto complessi.

In pratica, quindi, le aberrazioni sono ineliminabili nei sistemi IF che non lavorino secondo i principi dell'ottica parassiale (gaussiana).

I sistemi a concentrazione IF mostrano una forte sensibilità al *tracking* ed alla precisione con cui sono realizzate le superfici.

In particolare, le superfici riflettenti richiedono una precisione doppia di quelle rifrangenti.

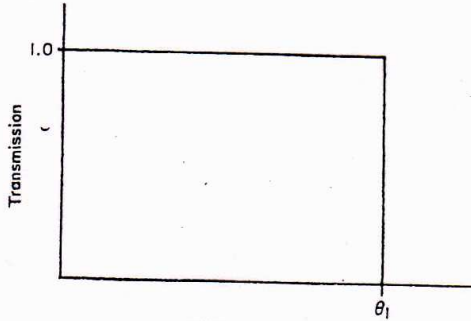


Le considerazioni precedenti hanno portato alla ricerca di nuovi sistemi a concentrazione ed allo sviluppo di un diverso tipo di ottica:

**NON-IMAGING OPTICS**

# IDEALITA' DI UN CONCENTRATORE

Curve di Trasmissione-angolo:



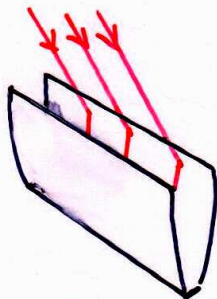
Concentratore ideale

$$E_{opt} = 1$$

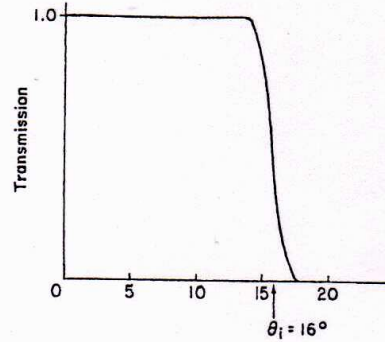
$$C_{opt} = C_{geo}$$

Il concentratore ideale trasmette tutti i raggi incidenti sull'apertura d'ingresso fino all'angolo limite di accettazione.

Esempio di concentratore ideale:



2D (trough) concentrator  
2D-CPC



Concentratore non-ideale

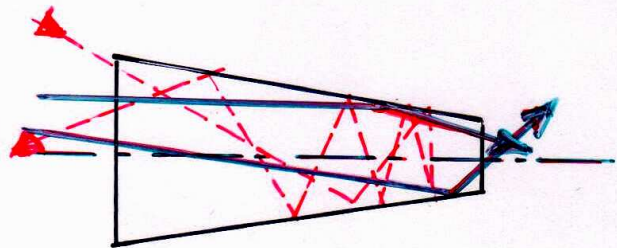
$$E_{opt} < 1$$

$$C_{opt} < C_{geo}$$

Il concentratore non-ideale non trasmette tutti i raggi incidenti.

Tipicamente, una parte dei raggi estremi viene riflessa all'indietro.

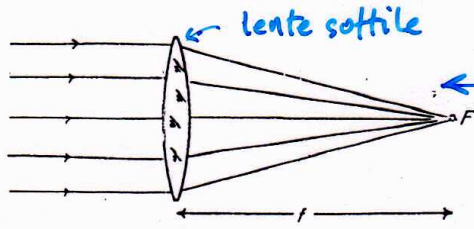
Esempio di concentratore non ideale:



Light cone

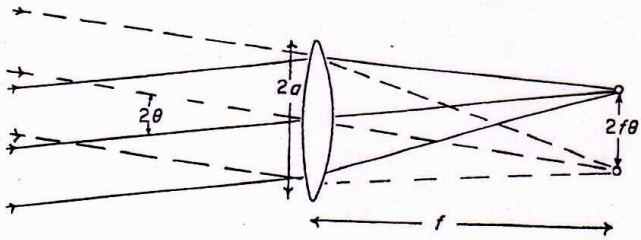
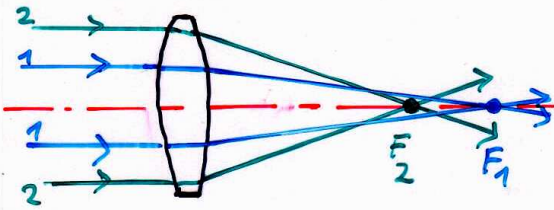
# CAUSE DI NON-IDEALITA' NEI CONCENTRATORI

## Sistemi Image-Forming:



Sistema ottico privo di aberrazioni.

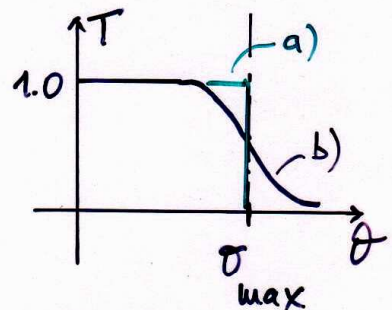
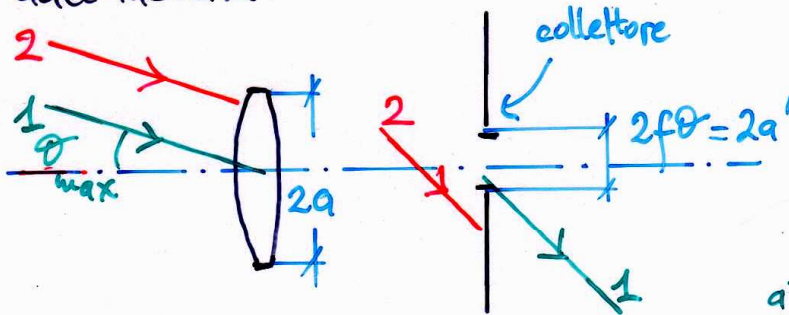
divergenza angolare:  $2\theta$   
dimensione immagine:  $2f\theta$



Sistema ottico con aberrazione sferica.  
(small f-number)

In generale, le aberrazioni off-axis + quelle cromatiche determinano l'allontanamento dall'idealità.

Sistema image forming:  
Tutti i raggi provenienti dalla stessa direzione focalizzano sullo stesso punto dell'immagine.



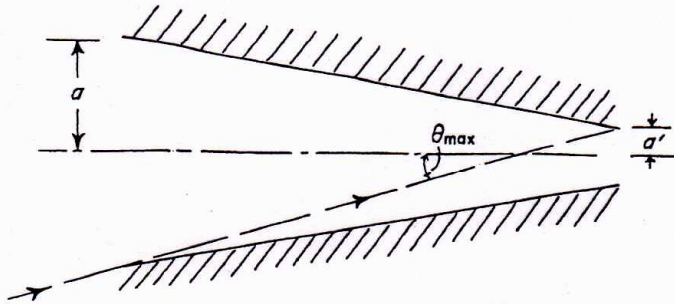
- a) Concentratore ideale
- b) Concentratore con aberrazioni (non ideale)

In un sistema image-forming, le aberrazioni impediscono di raccogliere i raggi in ingresso più divergenti e spostati dall'asse ottico.

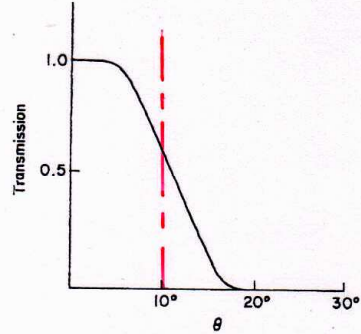
Le aberrazioni riducono il flusso di energia in uscita e quindi il Rapporto di Concentrazione Ottico:  $C_{opt}$ .

# CONCENTRATORI NON-IDEALI

Sono mostrati due esempi di concentratori non-ideali.



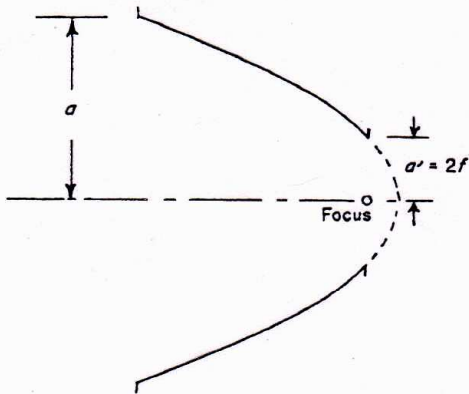
CONE CONCENTRATOR  
(NON-IMAGING CONCENTRATOR)



Transmission-angle curve for a cone;  $\theta_{max} = 10^\circ$ .

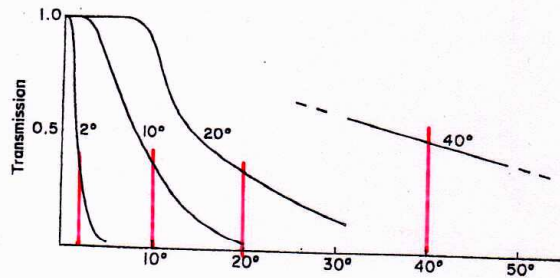
curva di trasmissione/angolo

Total transmission  $\approx 0,8$   
(inside  $\theta_{max}$ )



A paraboloid of revolution as a concentrator.

PARABOLOIDE DI RIVOLUZIONE  
(IMAGING CONCENTRATOR)



Transmission-angle curves for paraboloidal mirrors. The graphs are labeled with angles  $\theta_{max}$  given by  $\sin \theta_{max} = a/f$  in Fig. 4.18.

curva di trasmissione/angolo

Total transmission  $\approx 0,6$   
(inside  $\theta_{max}$ )

## INTRODUZIONE ALLA “NON-IMAGING OPTICS (NIO)”

Pur essendo i concentratori basati sulla *Imaging Optics (IO)* non finalizzati all'ottenimento di un'immagine (quella della sorgente), il modello su cui si basano è quello dell'ottica gaussiana.

Il raggiungimento di alte concentrazioni richiede un allontanamento da questo modello, con l'introduzione di aberrazioni che riducono l'efficienza ottica del sistema,  $E_{opt}$ , e quindi il Rapporto di Concentrazione Ottica,  $C_{opt} = E_{opt} * C_{geo}$ .

I concentratori basati sulla “*Non-Imaging Optics*” sono concepiti con altri criteri:

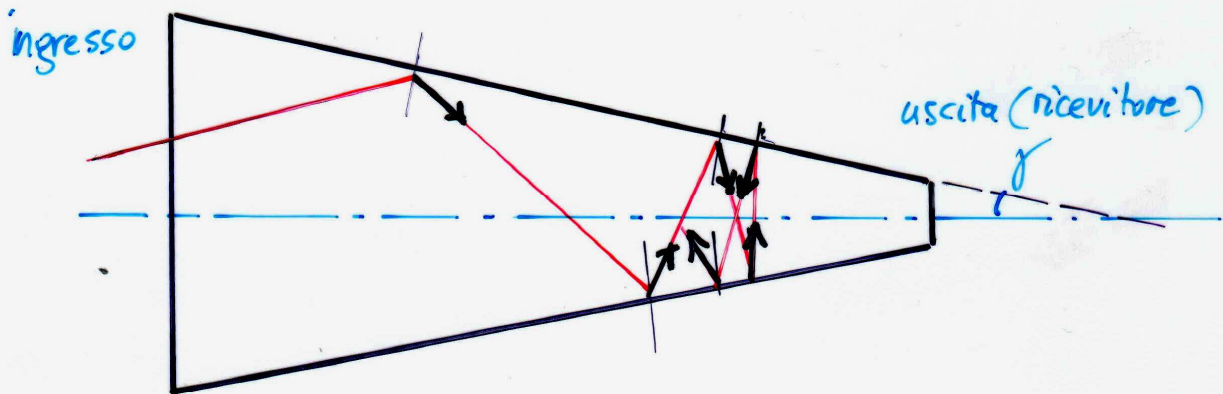
- i) Ottimizzare l'accettazione angolare (e quindi l'efficienza ottica, ovvero raccogliere tutti i raggi incidenti entro un angolo massimo determinato).
- ii) Avvicinare i valori teorici di concentrazione.

Il principio alla base della NIO è l'*edge ray principle*, che definisce come ideale un sistema nel quale tutti i raggi in ingresso fino ad un valore estremo  $\theta_{max}$  attraversano l'apertura di uscita del concentratore.

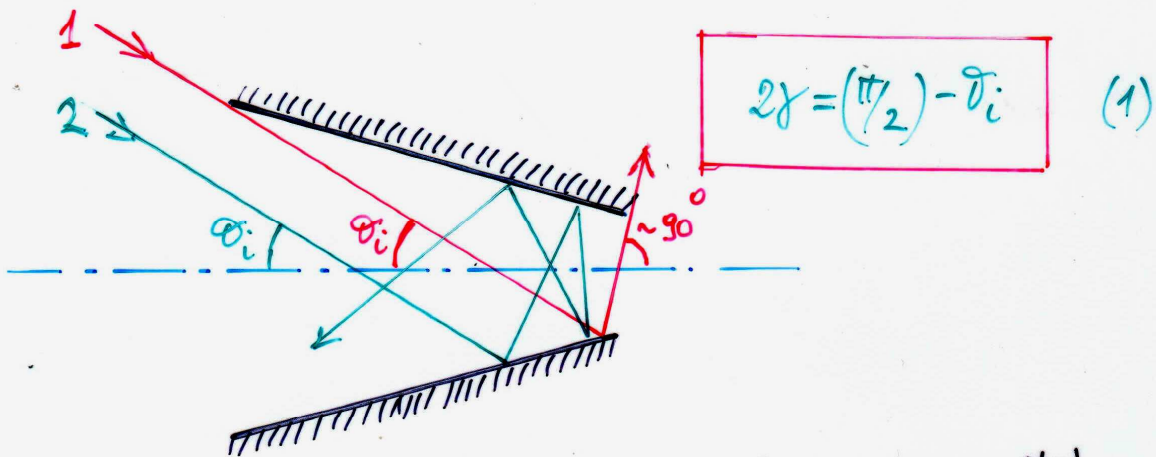
In queste condizioni, non esiste più una corrispondenza tra direzioni di provenienza dei fasci e punto sull'apertura di uscita.



# CONCENTRATORI "NON-IMAGING" (NIC) IL CONO DI LUCE

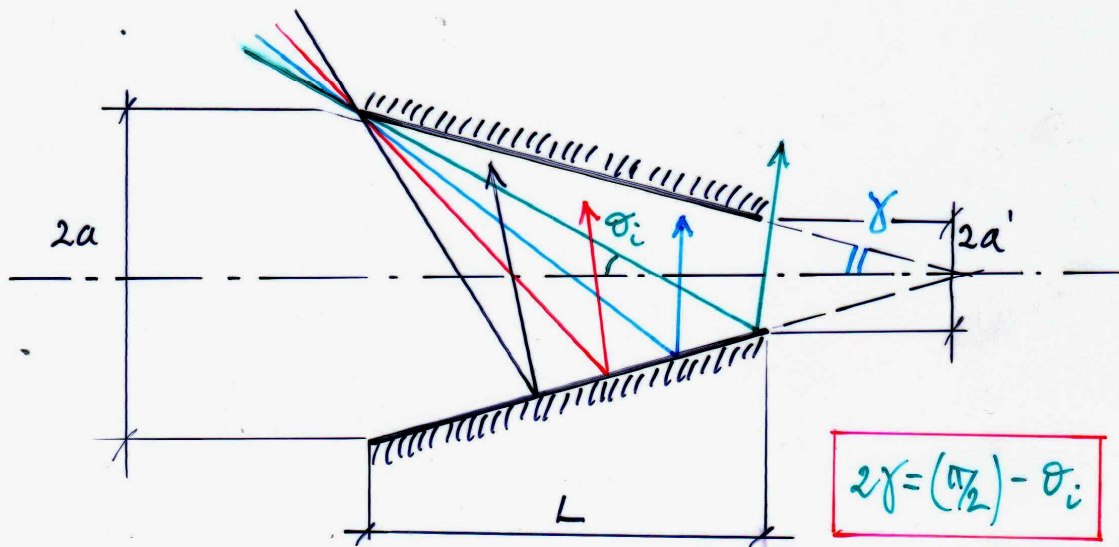


È il precursore degli attuali NIC. Concentra la luce incanalandola verso l'estremità (ricevitore). Non lavora bene con molte riflessioni. Per effetto della inclinazione delle pareti ( $\gamma$ ), ad ogni riflessione il fascio subisce una deviazione angolare verso sinistra (ingresso). Lavora bene quando è progettato per raccogliere la luce con poche riflessioni.



Per alti valori di  $C$  (alta divergenza del fascio in uscita), si pone la condizione (1) che stabilisce la raccolta sul ricevitore a  $\sim 90^\circ$  della luce inclinata all'estremo angolo in ingresso e radente il bordo dell'apertura.

# IL CONO DI LUCE



## CONO DI LUCE (CONE CONCENTRATOR)

È mostrato come il cono opera una selezione sui raggi in ingresso incidenti con vari angoli rispetto all'asse ottico.

Si ottiene:

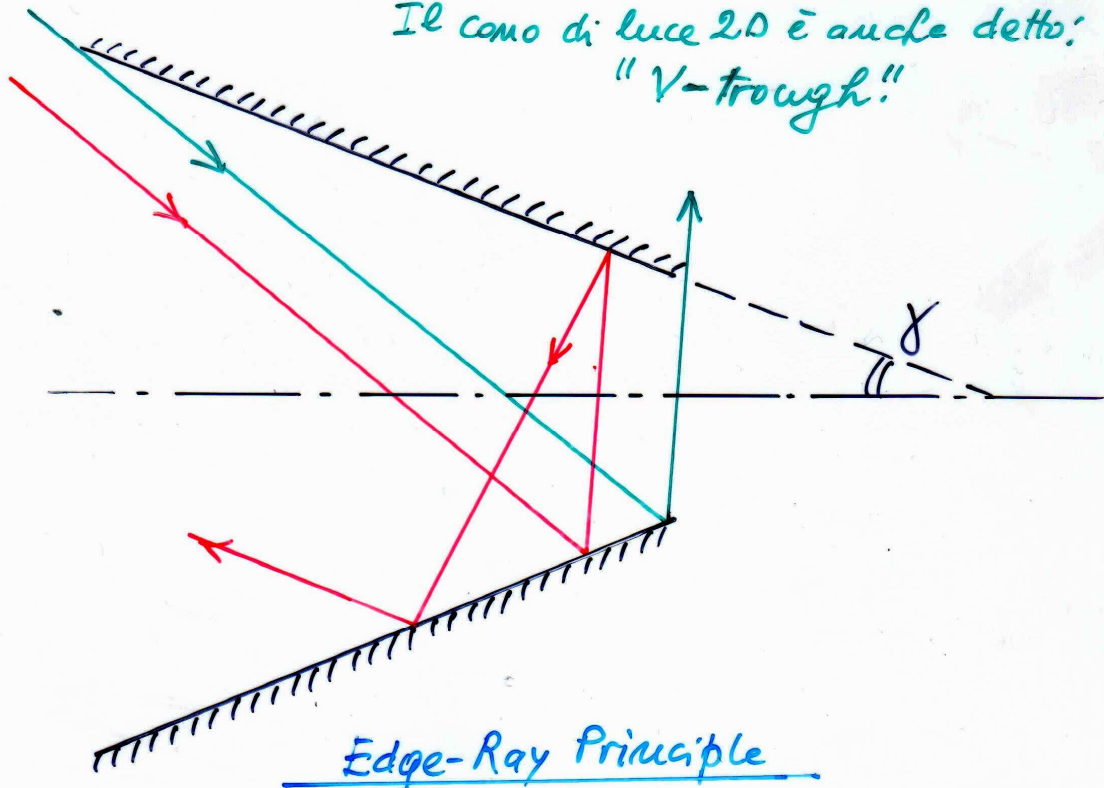
$$C = (a/a')^2 = \left( \frac{\operatorname{tg} \sigma_i + \operatorname{tg} \gamma}{\operatorname{tg} \sigma_i - \operatorname{tg} \gamma} \right)^2$$

$$a = a' + L \cdot \operatorname{tg} \gamma ; \quad L = \frac{2a'}{\operatorname{tg} \sigma_i - \operatorname{tg} \gamma}$$

- Il "Cone Concentrator" è lontano dall'essere un concentratore ideale.
- Pur essendo di forma semplice, è di difficile trattazione per raggi non meridionali (nel caso 3D).
- Nonostante ciò, è considerato il precursore dei moderni concentratori CPC (Compound Parabolic Concentrator).

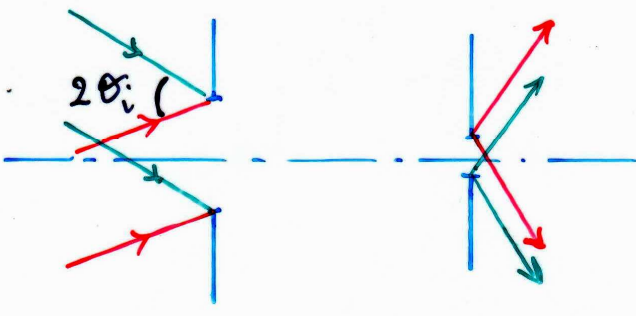
# IL CONO DI LUCE

Il cono di luce 2D è anche detto:  
"V-trough!"



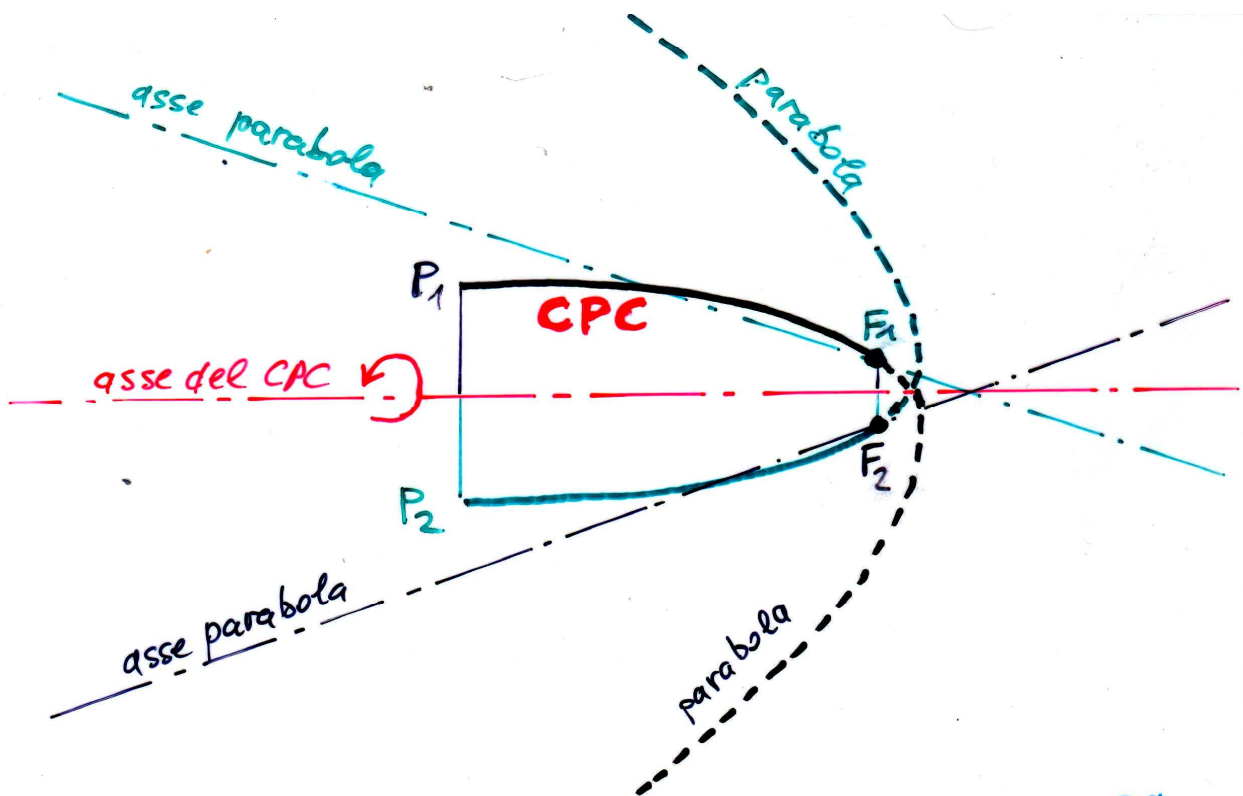
## Edge-Ray Principle

Si applica a tutti i sistemi a concentrazione. Stabilisce come "ideale" un sistema nel quale tutti i raggi estremi siano raccolti in uscita.



Sistema "imaging"

Applicazione del "edge-ray principle" ad un sistema a concentrazione di tipo "imaging".



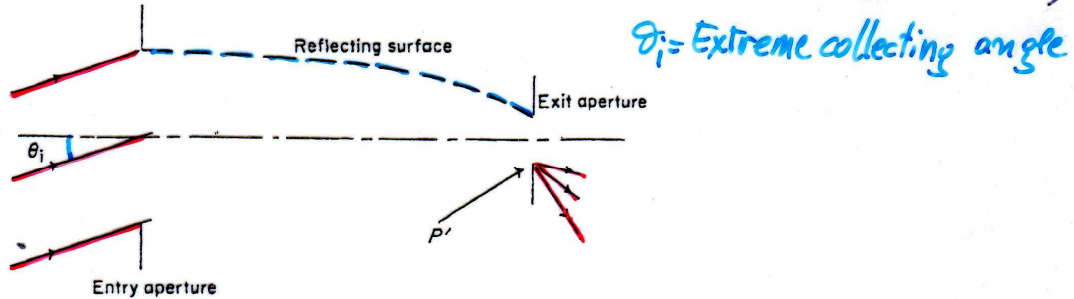
-3D

## COSTRUZIONE DEL "COMPOUND PARABOLIC CONCENTRATOR"

- Ruotando una delle due parabole mostrate attorno all'asse di simmetria del concentratore, si costruisce il CPC-3D.
- Ad esempio, ruotando la parabola verde attorno all'asse di simmetria del CPC, il tratto di parabola  $P_2-F_2$  si sovrappone al tratto  $P_1-F_1$  dopo  $\pi$ , e costruisce l'intero CPC dopo  $2\pi$ .

## COMPOUND PARABOLIC CONCENTRATOR (CPC)

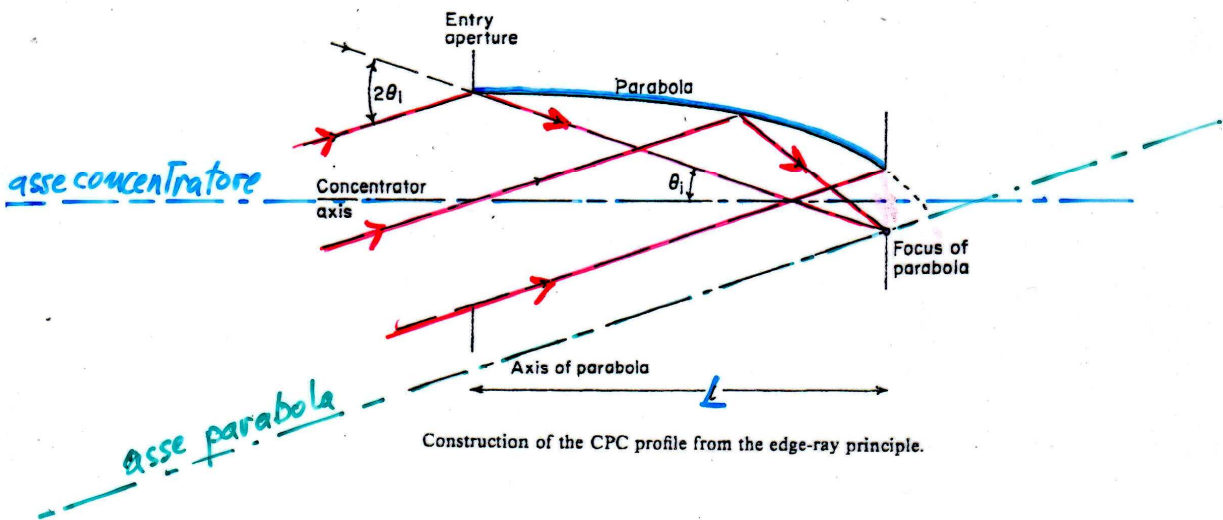
Il CPC è il risultato dell'applicazione sistematica del "Edge-Ray Principle" ai Coni di Luce.



The edge-ray principle.

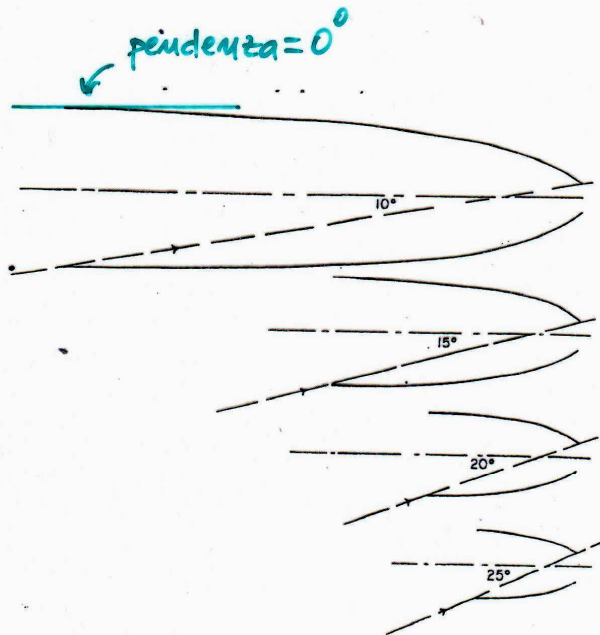
Per raggi meridiani la soluzione è banale!  $\Rightarrow$

$\Rightarrow$  La superficie deve avere il profilo di una parabola con asse lungo la direzione  $\theta_i$  e con fuoco su  $P'$ !



Construction of the CPC profile from the edge-ray principle.

# COMPOUND PARABOLIC CONCENTRATOR



Si trova facilmente:

$$f = a' (1 + \sin \theta_i)$$

(lunghezza focale parabola)

$$L = a' (1 + \sin \theta_i) \cdot \cos \theta_i / \sin^2 \theta_i$$

(lunghezza del CPC)

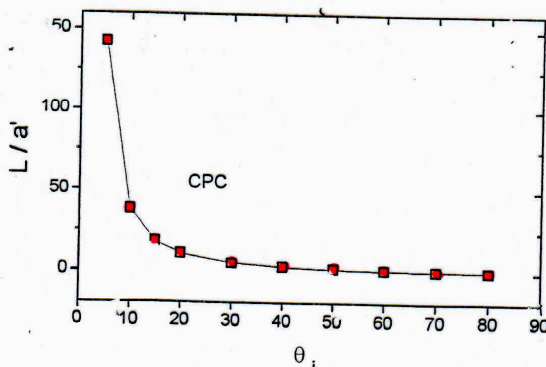
$$a = a' / \sin \theta_i$$

( $2a$  = diametro apert. ingresso)  
( $2a'$  = " " uscita)

- Esempi di concentratori CPC con diversi angoli di collezione,  $\theta_i$ . Il diametro del collettore è mantenuto costante:  $a \approx \text{cost.}$

$$L = (a + a') \cdot \cot^2 \theta_i$$

- la pendenza del CPC, rispetto all'asse del concentratore, è sempre  $0^\circ$  in corrispondenza dell'apertura d'ingresso.

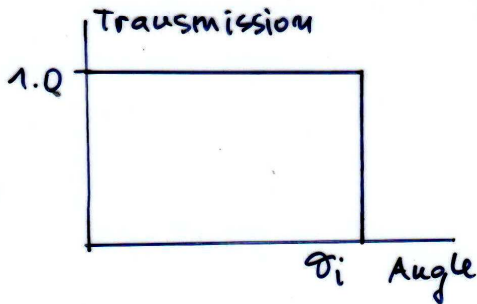


Lunghezza del CPC,  $L$ , relativa all'apertura di uscita,  $a'$ , in funzione dell'angolo (massimo) di accettazione.

## COMPOUND PARABOLIC CONCENTRATOR 2D-CPC

Si trova:  $(a/a') = 1/\sin \theta_i = C_{max}^{2D}$

"I concentratori 2D-CPC raggiungono il limite max teorico per il rapporto di concentrazione".



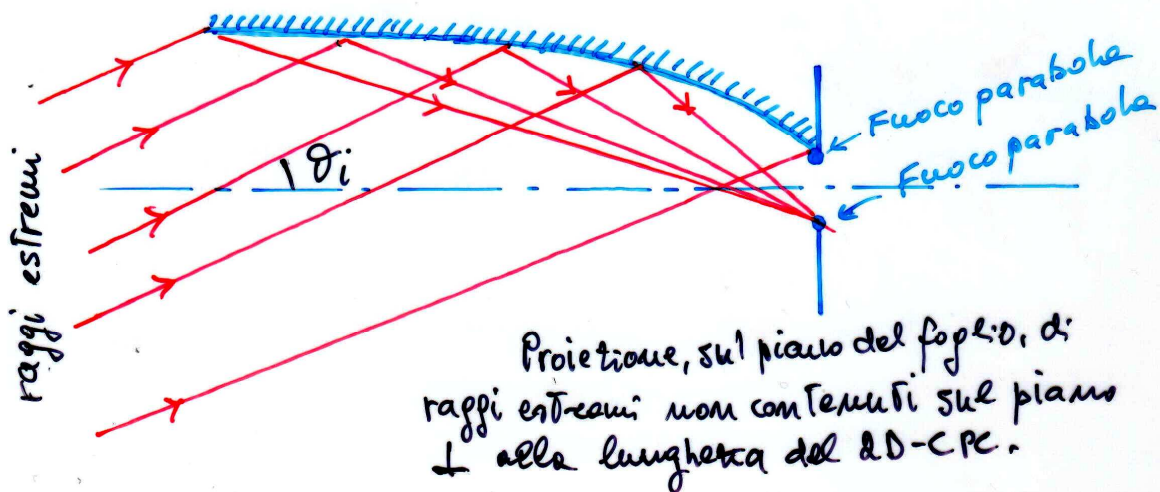
Curva Transmission / angle di un 2D-CPC.

"Tutti i raggi entro  $\theta_i$ , in ingresso, raggiungono l'apertura di uscita".

"Il 2D-CPC o trough-like CPC è un concentratore ideale".

"Il ray-tracing è semplice anche per i raggi non-meridionali, ovvero per i raggi non contenuti in un piano  $\perp$  alla lunghezza del 2D-CPC".

"Questo risultato scaturisce dal fatto che le leggi della riflessione possono essere applicate in 2 dimensioni, ovvero solo sul piano  $\perp$  alla lunghezza del CPC".



## COMPOUND PARABOLIC CONCENTRATOR: 3D-CPC

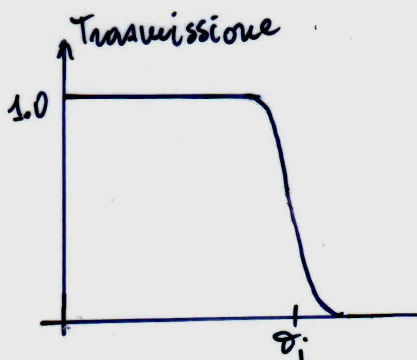
Il concentratore 3D-CPC si costruisce per rivoluzione della parabola attorno all'asse del concentratore.

È una differenza fondamentale tra 2D-CPC e 3D-CPC:

"Nei 3D-CPC i raggi non-meridionali possono tornare indietro per riflessioni multiple" (skew-rays).

"Nei 2D-CPC, al contrario, la riflessione di raggi non  $\perp$  alla lunghezza del CPC, è equivalente alla riflessione nel piano  $\perp$  a questa lunghezza".

Nonostante la presenza di "skew-rays" non raccolti sul ricevitore, la curva trasmissione/angolo per i 3D-CPC, calcolata per "ray tracing" si avvicina di molto alla curva ideale (spadrata):



Curva Trasmissione/angolo per un 3D-CPC con angolo di accettazione  $\theta_i$ .

Rapporto di concentrazione (geometrico) max per un 3D-CPC:

$$C_{\max}^{\text{3D}} = (a/a')^2 = (1/\sin \theta_i)^2$$

In Conclusione:

"Il concentratore CPC si avvicina molto ad un concentratore ideale".

"Il CPC è semplice da costruire".

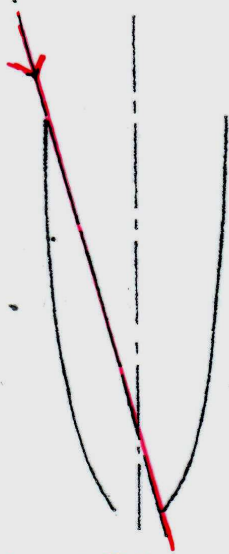
"Il CPC richiede, in fase di principio, soltanto una superficie riflettente". "Questo è un grande vantaggio in presenza di luce non-monocromatica (luce solare)".

"Ha lo svantaggio di essere lungo rispetto alle aperture di ingresso e uscita". "La sua lunghezza può essere limitata progettando un sistema ibrido, contenente mezzi rifrangenti al suo interno".



# CONCENTRATORI NON-IDEALI

## 3D-CPC (Compound Parabolic Concentrator)



3D-CPC  
(non-imaging)

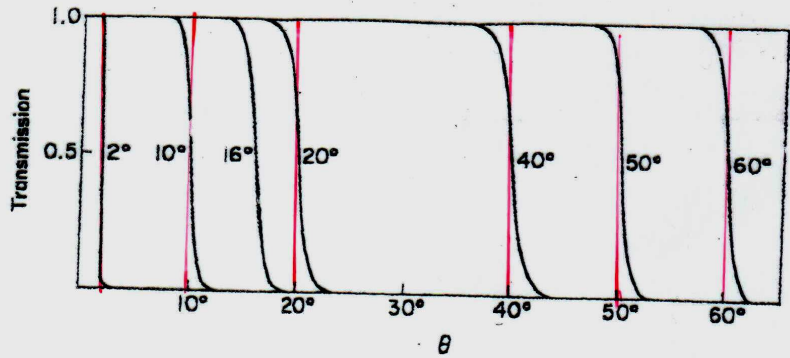


Fig. 4.12 Transmission-angle curves for 3D CPCs with  $\theta_{max}$  from 2° to 60°.

Curve di trasmissione / angoli

Le curve  $T(\theta, \theta_{max})$  vs.  $\theta$  si avvicinano molto a quelle ideali.

Si ottiene:

Frazione di flusso trasmesso:  
(entro l'angolo  $\theta_{max}$ )

$$\frac{\int_0^{\theta_{max}} d\theta \cdot \sin 2\theta \cdot T(\theta, \theta_{max})}{\int_0^{\theta_{max}} d\theta \cdot \sin 2\theta}$$

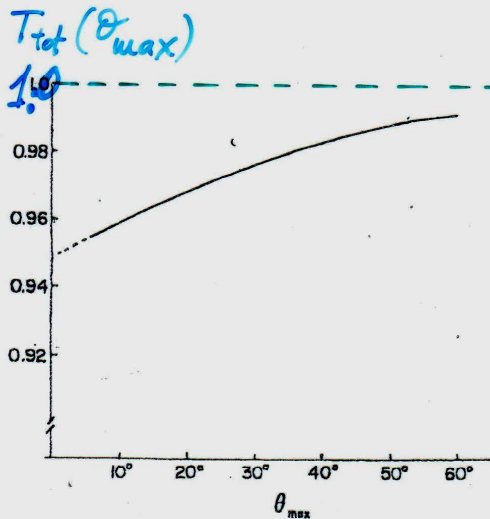


Fig. 4.13 Total transmission within  $\theta_{max}$  for 3D CPCs.

La frazione di flusso trasmesso,  $T_{tot}(\theta_{max})$ , corrisponde all'efficienza ottica del sistema,  $E_{opt}$ .

$$C_{opt} = E_{opt} \cdot C_{geo}$$

TRASMISSIONE TOTALE ENTRO  $\theta_{max}$

## DIMOSTRAZIONE CHE UN CONC. 2D-CPC E' IDEALE

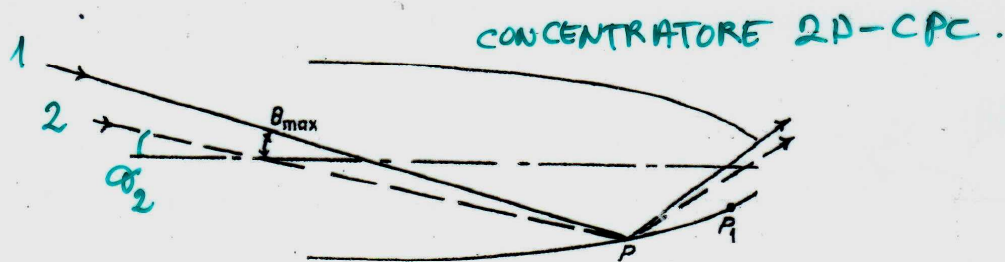
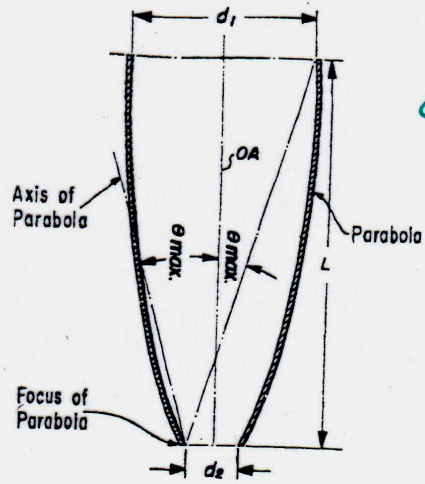


Fig. 4.9 To prove that a 2D CPC has an ideal transmission-angle characteristic.

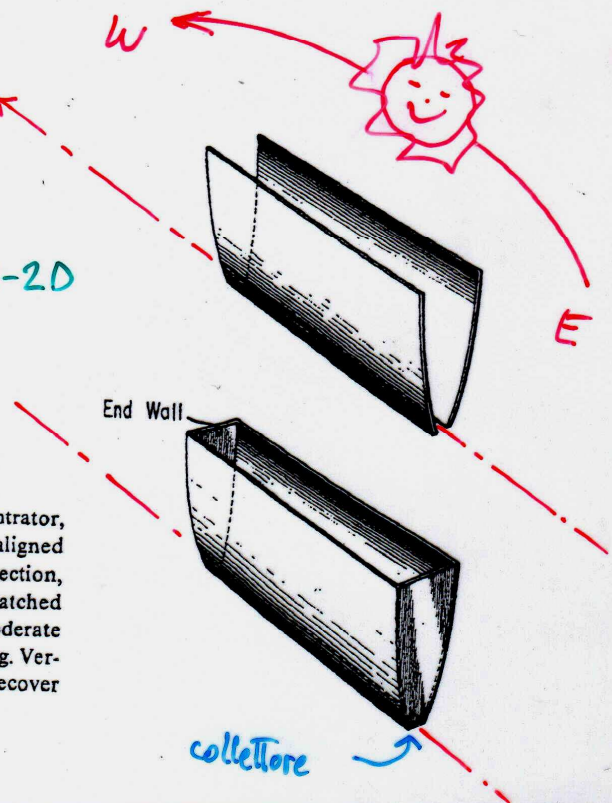
- Sia dato il raggio estremo 1, con incidenza  $\theta_{max}$  sul punto P. Il raggio 1 è raccolto dal concentratore.
- Sia dato il raggio 2, con incidenza  $\alpha_2 < \theta_{max}$ .
- Vi sono due possibilità:
  - a) il raggio 2 incide sul punto P, e quindi è trasmesso dal concentratore.
  - b) il raggio 2 incide su un altro punto, P<sub>1</sub>, del concentratore.  
In questo caso si considera il raggio estremo incidente sul punto P<sub>1</sub>, e la conclusione è la stessa che nel punto a).
- I raggi mostrati in figura non necessariamente sono raggi contenuti in un piano meridiano.  
Nella figura sono mostrate le proiezioni dei raggi sul piano meridiano.



CPC-3D

Cross-sectional profile of nonimaging cone concentrator. The device collects radiation entering the circular entrance aperture of diameter  $d$  within angle of  $\pm\theta_{max}$  and directs it to the smaller diameter aperture  $d_2$  with negligible losses, and thus closely approaches the thermodynamics limit.

CPC-2D

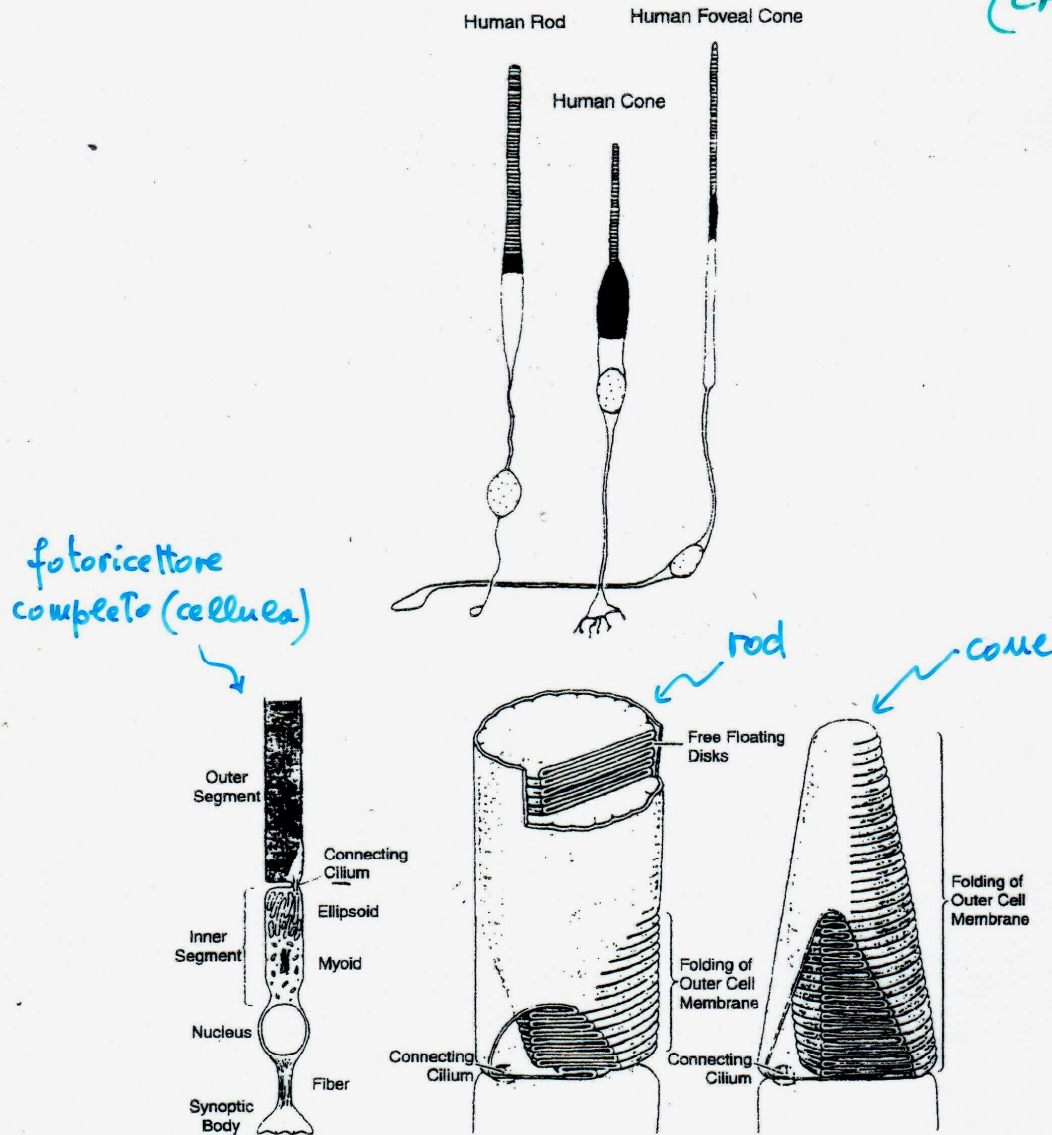


2D or trough concentrator, having the same profile as Fig. 10.6 aligned with its  $y$  axis in the east-west direction, has an acceptance field of view well matched to solar motion and can achieve moderate concentration with no diurnal tracking. Vertical reflecting walls effectively recover shading and end losses.

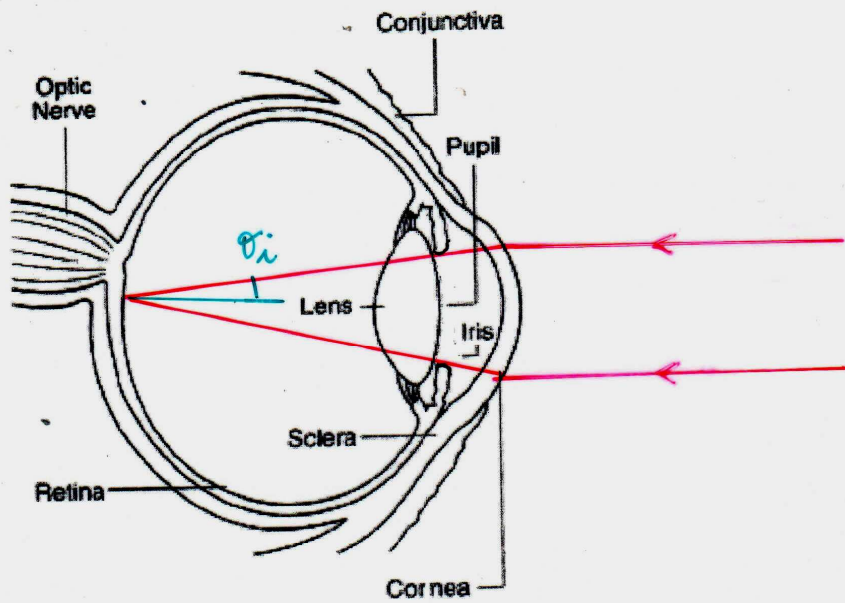
# NATURA E "NON-IMAGING OPTICS"

La Natura ha già applicato i principi delle "non-imaging optics" nei fotorecettori chiamati "coni".

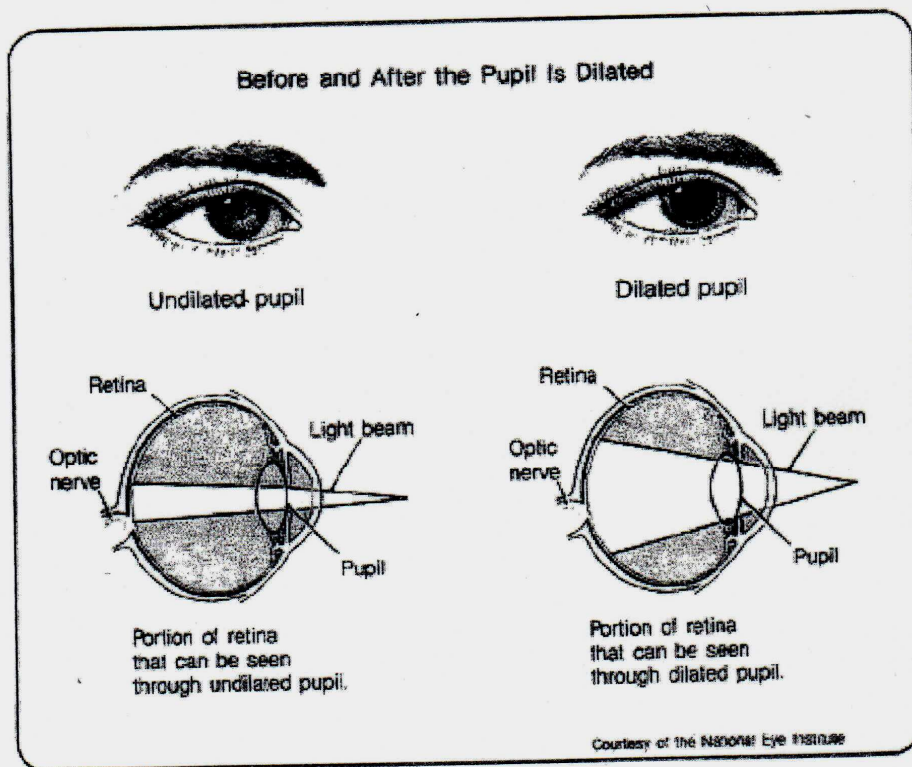
I "coni" operano come dei "Compound Parabolic Concentrators" (CPC)



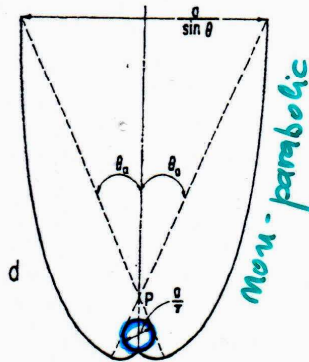
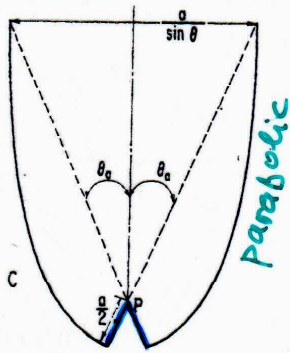
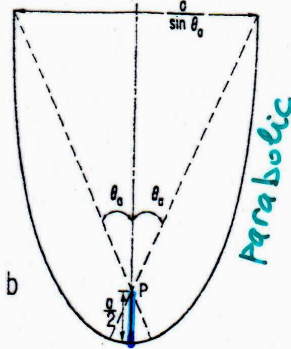
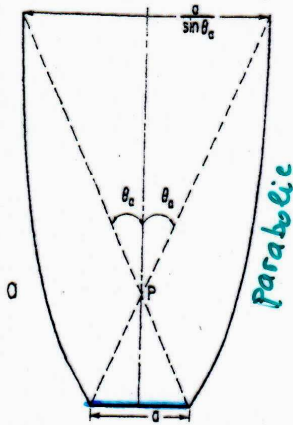
Top: This diagram illustrates that the human foveal cone looks very rod-like. It is not until one looks at extra-foveal cones (middle receptor) that they take on a cone-like appearance. (from Dowling, 1987)  
 Bottom: At the left is a generalized conception of the important structural feature of a vertebrate photoreceptor cell. At the right are shown the differences between the structure rod (left) and cone (right) outer segments. (From Young, 1970, 1971.)



In condizioni di visione al buio (pupilla dilatata) l'angolo  $\theta_i$  corrisponde all'angolo di accettazione dei coni.



# APPLICAZIONI DEI TROUGH-CPCs



a), b), c):  
ricevitori lineari  
d):  
ricevitore cilindrico.

Cross-sectional profiles of ideal trough concentrators generalized to absorbers of different shapes. In practice, the reflectors are usually truncated to about half their full height to save reflector material with only negligible loss of concentration.

concentratori ideali trough-CPC con diversa geometria dei ricevitori.

I concentratori sono generalmente troncati a metà della lunghezza ottimale, senza sensibili perdite sulla concentrazione.

# APPLICAZIONI AL FOTOVOLTAICO

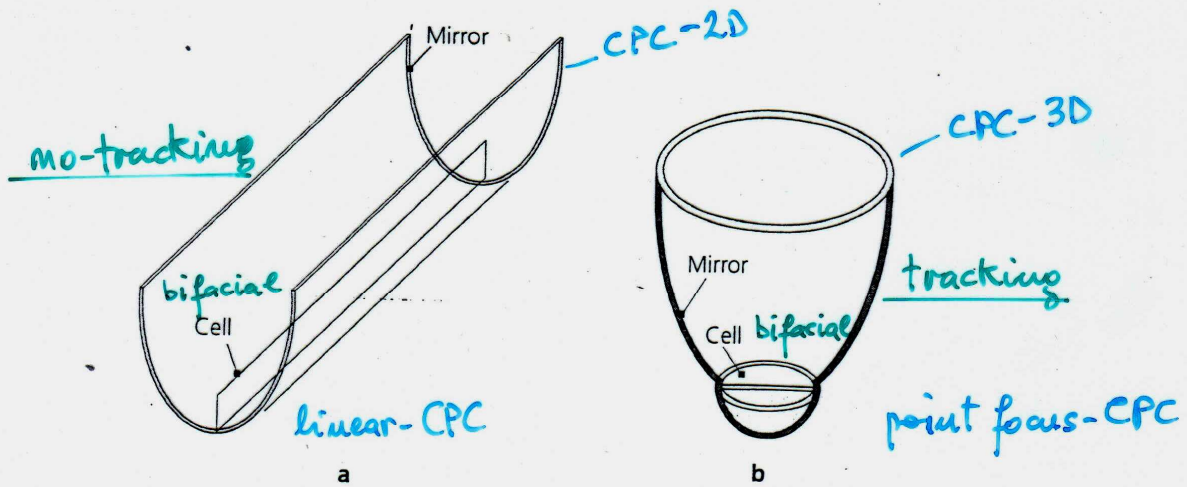
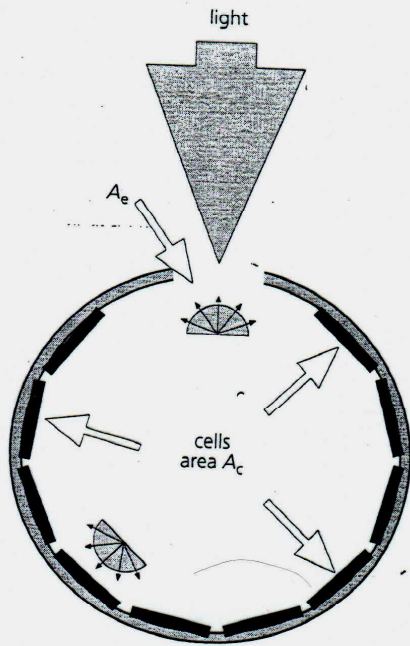
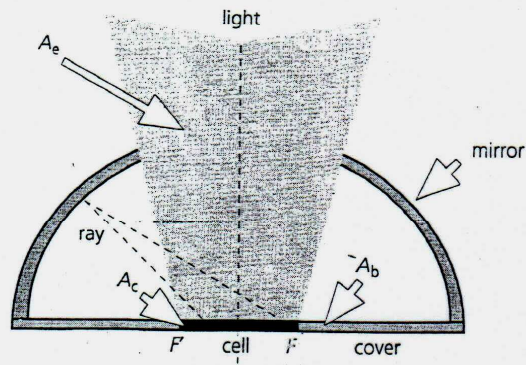


FIGURE 6: Static concentration concepts are shown: a) linear component parabolic concentrator (CPC) with a bifacial cell; and b) point focus CPC with a hemisphere for coupling the CPC to a bifacial cell.



La luce concentrata è inviata all'interno di una sfera integratrice. Celle distribuite all'interno della sfera.

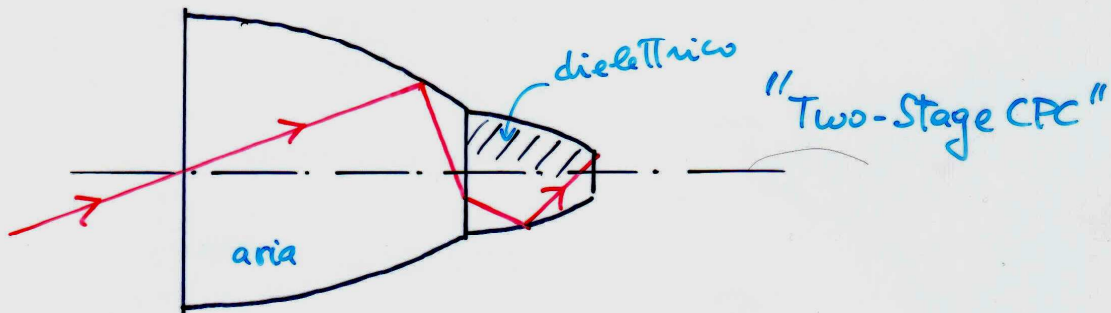
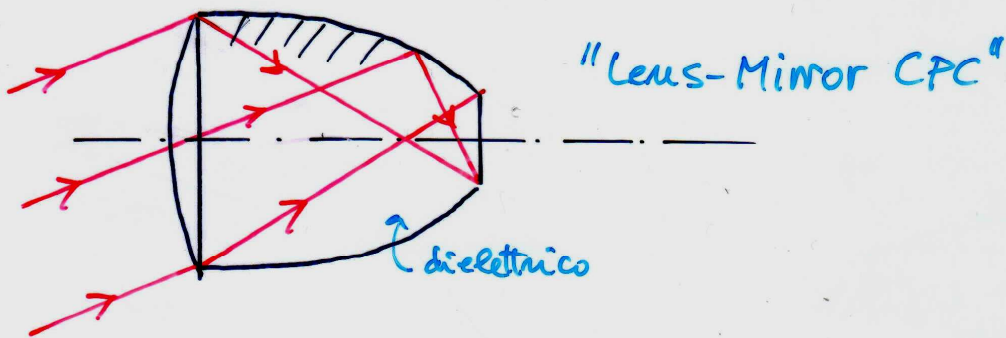
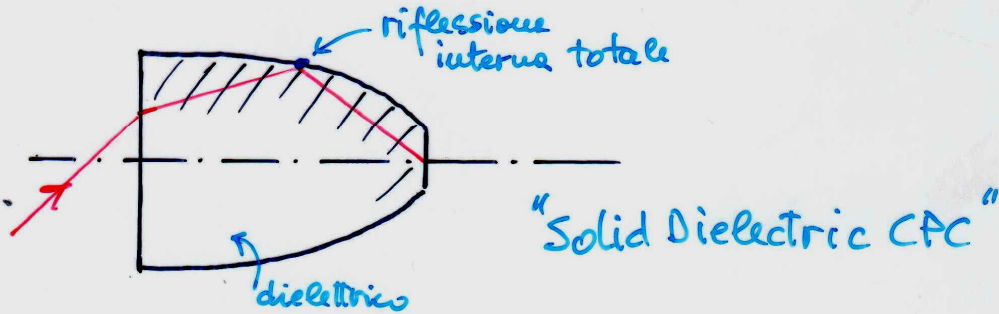


Celle all'interno di una cavità ellissoidale.

## MODIFICHE AL CONCENTRATORE CPC DI BASE

7

La più importante prevede l'uso di un solido dielettrico che sfrutta il fenomeno della riflessione totale interna.

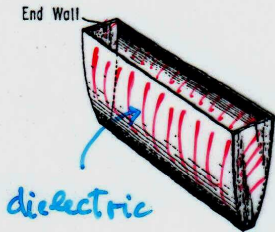


ulteriori modificazioni del CPC  $\Rightarrow$  "Non-plane Absorbers"



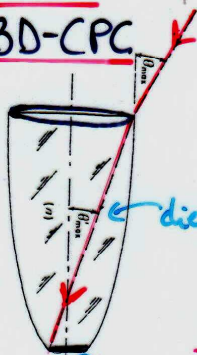
# "DIELECTRIC-FILLED CPCs"

Filled 2D-CPC



dielectric

Filled 3D-CPC



dielectric

ricevitore

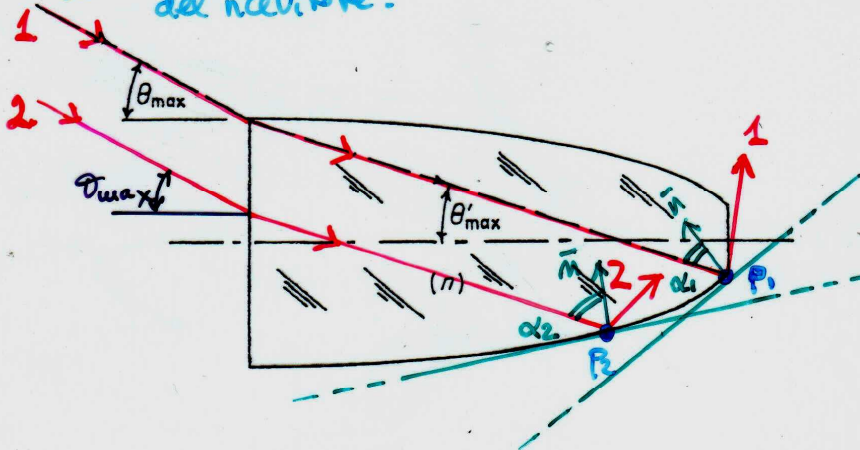
Lavoriamo sul principio della Riflessione Interna Totale (TIR)

Definizione:

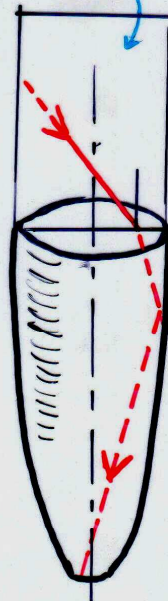
Nei 2D-CPC sono chiamati raggi meridiani tutti i raggi  $\perp$  alla direzione del ricevitore.

Definizione:

Nei 3D-CPC sono chiamati raggi meridiani quei raggi contenuti in un piano meridian (piano passante per l'asse di simmetria).



piano meridian



Filled 3D-CPC

Consideriamo tutti i 2D-CPC ed i soli raggi meridiani nei 3D-CPC. Per avere la rifl. int. totale (TIR) per tutti i raggi incidenti con angolo estremo ( $\theta_{max}$ ), è sufficiente che si abbia in TIR per il raggio estremo 1 (incidente sul dielettrico/aria con angolo  $\alpha_1$ ).

Condizione di TIR su tutti i punti:

$$\sin \theta_i \leq 1 - (2/m^2)$$

o

$$\sin \theta_i \leq m - (2/m)$$

## "DIELECTRIC-FILLED CPCs"

Le condizioni precedenti danno luogo al diagramma mostrato. Sono indicati i valori di  $\theta_{max}$  e  $\theta_{max}$  per i quali si ha "Total Internal Reflection" (TIR), in funzione dell'indice di rifrazione  $n$ .

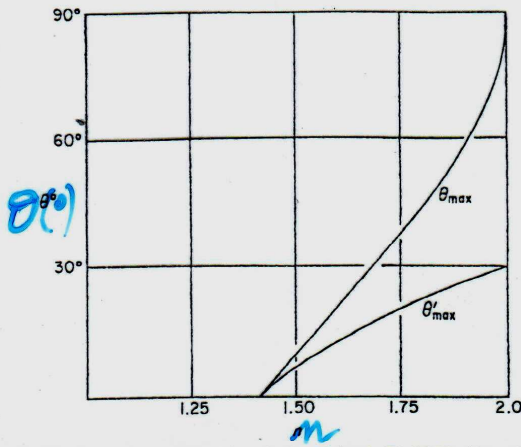


Fig. 5.2 The maximum collecting angles for a dielectric-filled CPC with total internal reflection, as functions of the refractive index.

Se si tiene conto che i vetri ottici hanno:

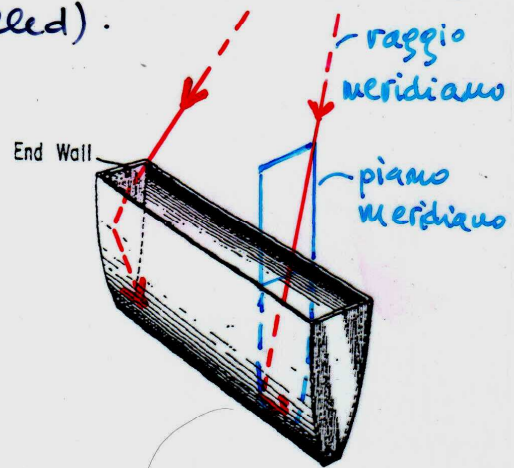
$$n \approx 1,5 \div 2,0$$

esiste ampia scelta di materiali per i diversi angoli di accettazione.

Si trova che, nei collettori "trough" (2D-CPC), si ha sempre riflessione interna totale sulle pareti terminali (end-walls).

Si trova facilmente che, nei 3D-CPC, i raggi non meridionali, a parità di angolo di incidenza sul concentratore, sono più radenti sul dielettrico rispetto ai raggi meridionali.

QUINDI, i risultati trovati, valgono per tutti i raggi sia nei 2D-CPC che nei 3D-CPC (filled).



Filled 2D-CPC

# IPERBOLOIDI DI RIVOLUZIONE

Detti anche: Flow-Line Concentrators (FLC)

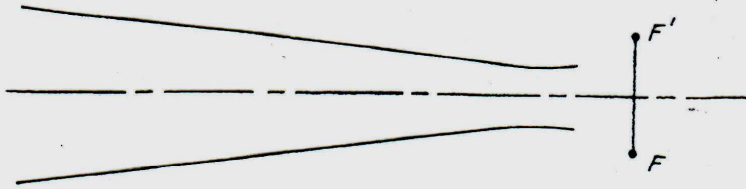
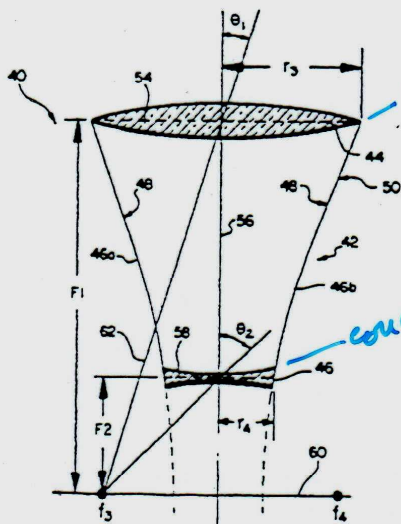
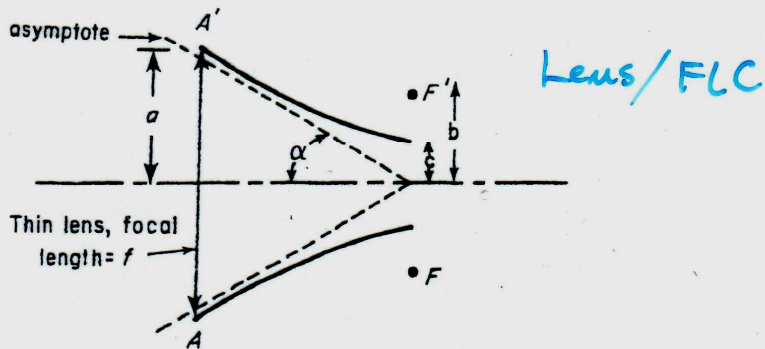


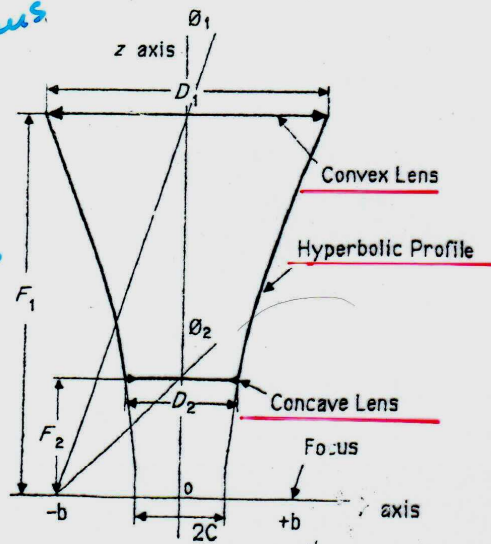
Fig. 7.11 The truncated hyperboloid of revolution as a concentrator.

Iperboloide troncato.



convex lens

concave lens



Two-lens / FLCs

## IPERBOLOIDE DI RIVOLUZIONE

La ricerca di più efficienti concentratori 3D ha portato allo sviluppo di una nuova teoria: "Flow Line Approach"

E' introdotta la grandezza:

$\vec{J}$  = geometrical vector flux

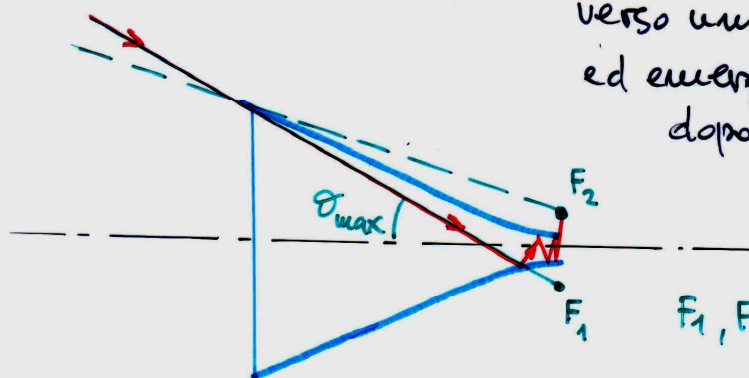
Si trova:  $\int \vec{J} \cdot d\vec{A} = \text{cost.}$  INVARIANTE di Poincaré

(in assenza di sorgenti e di attenuazione)

$$J_z = \int n^2 \cdot d\Omega \cdot \cos \theta_z = \text{cost}$$

Concentratori ideali si possono realizzare ponendo delle superfici riflettenti lungo le linee di flusso del vettore  $\vec{J}$ .

I raggi estremi ( $\theta_{\max}$ ), ad ogni riflessione, puntano verso uno dei due fuochi, ed emergono dal concentratore dopo un numero  $\infty$  di riflessioni.



$F_1, F_2$ : fuochi delle iperbol.

Iperboloide di rivoluzione come concentratore.

## *Commercialization of Solar Collectors*

---

A company has been formed to build solar collectors based on nonimaging principles. It is Solar Enterprises International. Prototypes of evacuated tube collectors are being built. These are evacuated quartz tubes that have a high absorptance-low emittance absorber tube and a concentrating silvered reflector inserts. The reflectors use to the principles of nonimaging optics to maximize concentration.

There are several types of nonimaging concentrators under development. They are:

- The Integrated Compound Parabolic Concentrator (ICPC)
- A Tailored Secondary for a Circular Cylindrical Primary

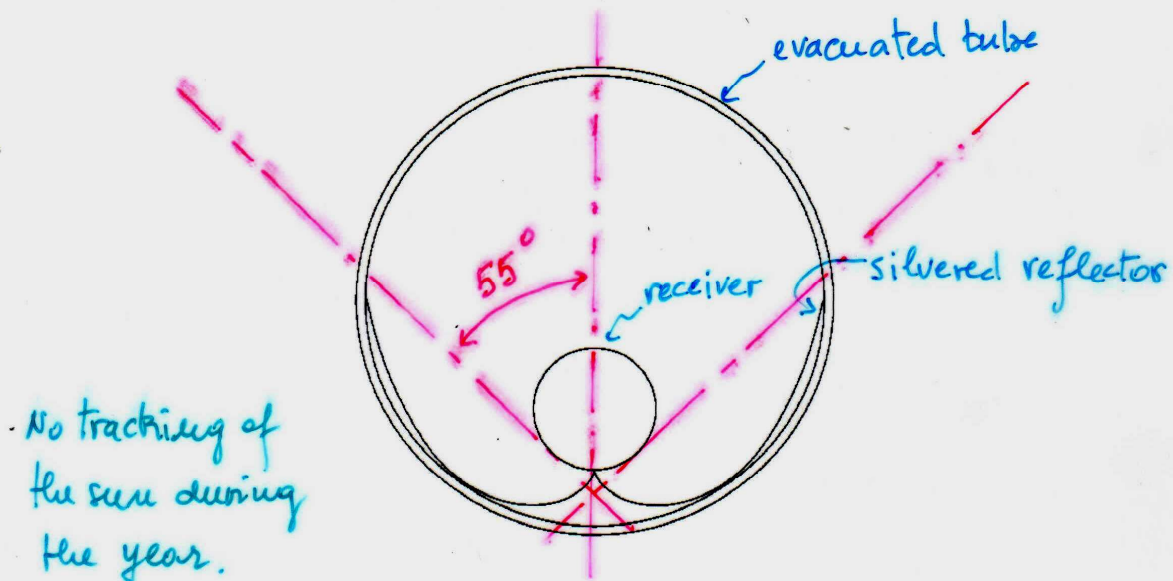
# ICPC: Integrated Compound Parabolic Concentrator

## The ICPC

The ICPC is a very practical collector than concentrates sunlight to the ideal limit. The features that it has are:

- It is a one-stage stand-alone collector system.
- A single component that doesn't track the sun throughout the year. An huge advantage over parabolic troughs and other tracking systems.
- A constant and wide angular range is accepted giving good collection of diffuse radiation
- The sun normally moves  $\pm 30$  degrees off latitude (the position of the sun during the middle of spring--the equinox) during the year. An angular acceptance range of  $> 30$  degrees collects a majority of the available sunlight throughout the year.
- The tube is evacuated minimizing heat losses and prevents tarnishing of a silvered reflector surface
- Decreasing the angular range of acceptance, increases concentration available, but causes slightly less power to be collected.

A picture of a 55 degree acceptance ICPC is below.



ICPC with 55 Degree Acceptance--Concentration 1.15

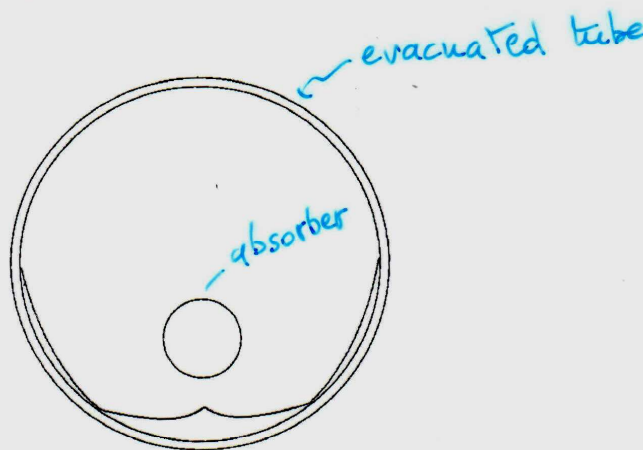
One-stage stand-alone collector system.

## Variable Angle Concentrator (VAC)

The is part of a two-stage collector system. The first stage is a circular cylindrical mirror that concentrates the light onto the aperture of the VAC. Interesting points of this concentrator are:

- The radiance distribution onto the secondary is very non-uniform and by tailoring the concentrator, greater concentration is achieved than is available using standard ICPCs above.
- Evacuated tube surrounds both absorber and reflector. This minimizes heat losses and protects the silvered reflector.
- The VAC is pivoted from the center of of the primary mirror to track the sun. The advantage of using a circular arc is that the primary mirror doesn't track the sun and is held fixed. Moving less stuff makes the system simpler to maintain.
- System has an overall concentration of 30 and compares well with standard parabolic troughs.
- A large absorber-reflector gap not seen in previous nonimaging concentrators is allowed in this design with only a 0.1% loss in power collection.
- Reflector shape has a discontinuity in its slope, because of gaps in the radiance distribution of light on the VAC's aperture.

The pretty shape is below:



VAC for Circular Primary-- Concentration 1.45 is 25% higher than attained by using standard ICPCs with 55 degree acceptance

Two-stage collector system.