



Università di Ferrara

fondata nel 1391



University of Ferrara  
Department of Physics

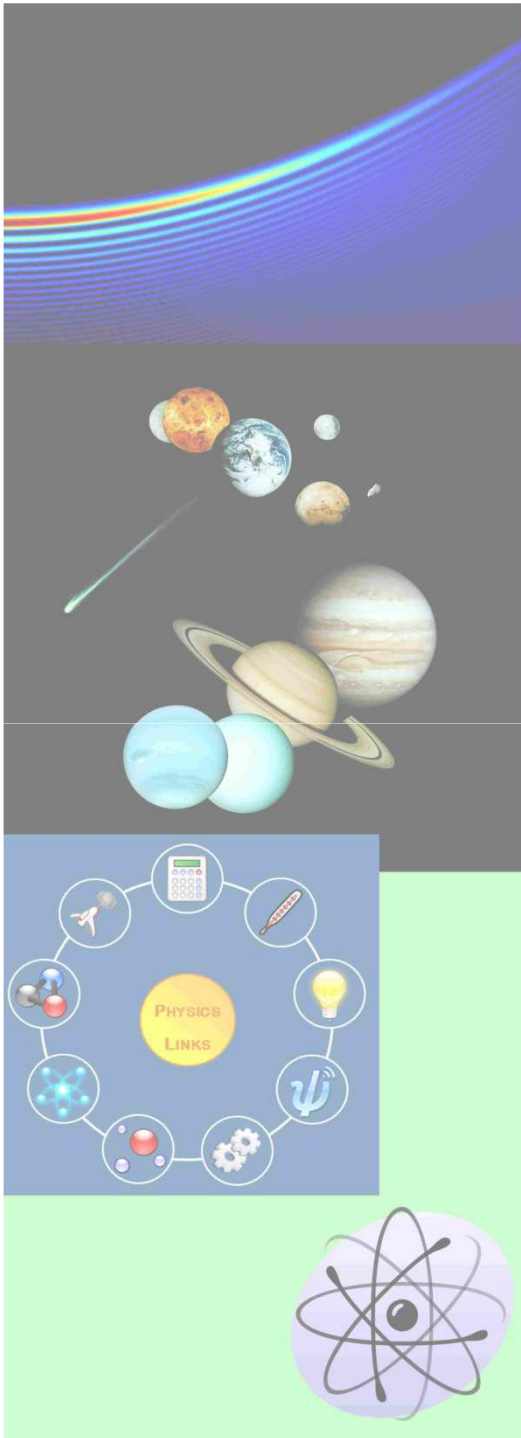


**CORSO DI ECCELLENZA  
PER SCUOLE SECONDARIE  
"Le sfide della Fisica Moderna"  
a.a. 2010-2011**

***Collezione e concentrazione della luce:  
teorie e tecnologie per l'energia solare***

*A. Parretta*

martedì 12 aprile 2011, ore 15:30

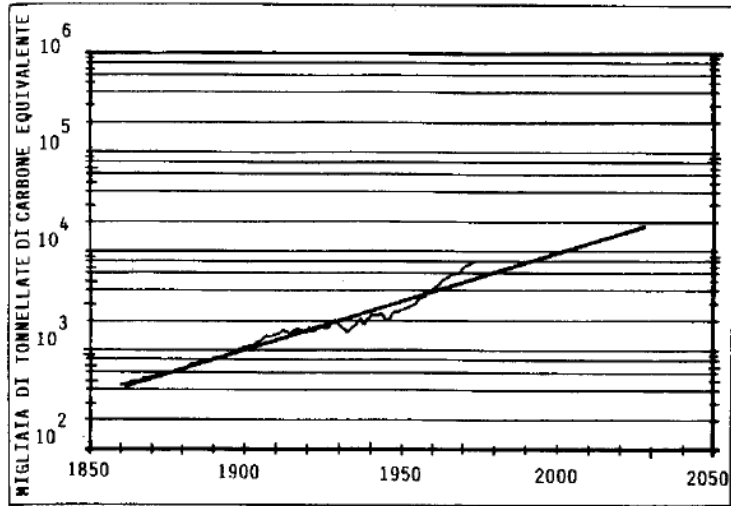


...ripensando alla mia vita, mi sembra di essere stato un bambino che si balocca sulla spiaggia, osservando e raccogliendo qualche ciottolo particolarmente lucido e ben levigato, mentre dinnanzi a lui si stende il mare sterminato della conoscenza ...

(Isaac Newton)



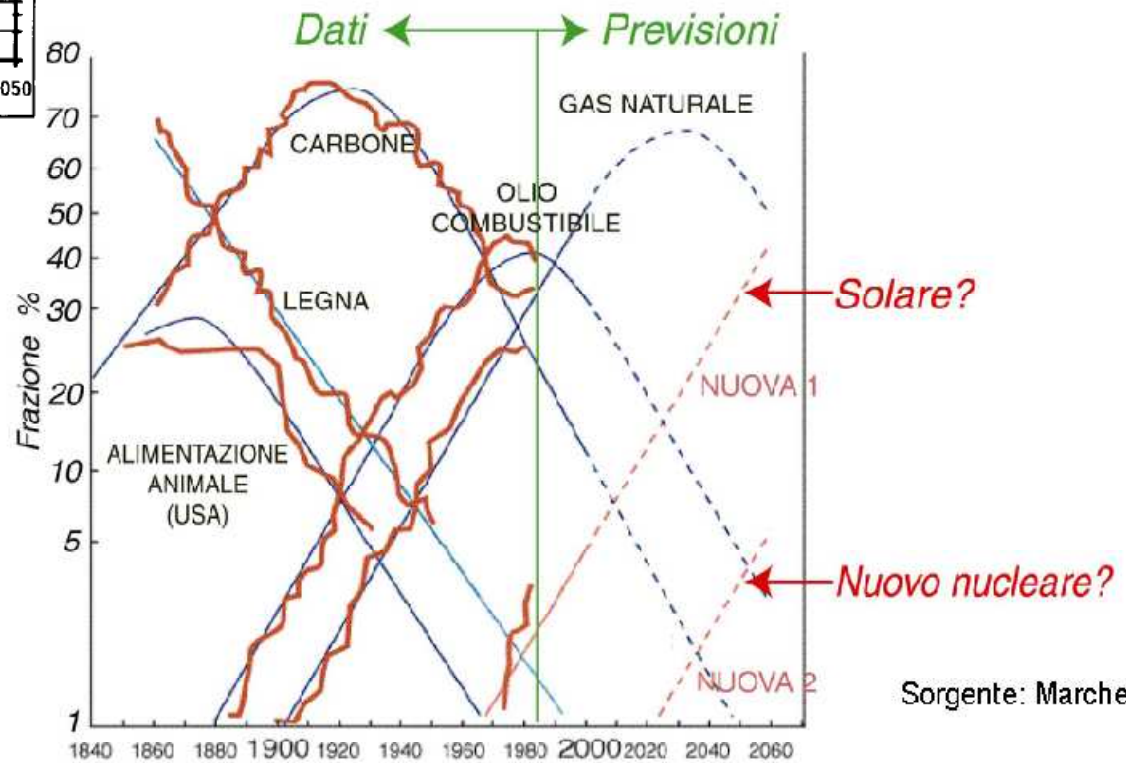
# L'ENERGIA E IL FUTURO



Consumo totale di energia nel mondo (TCE)

$$\log \frac{F}{1-F} = a + b \cdot t$$

Funzione logistica  
(F=frazione di mercato)



Sorgente: Marchetti

L'evoluzione delle fonti di energia primaria

## Fattori di emissione di sostanze gassose inquinanti (g/kWh) ciclo totale del combustibile (produzione energia elettrica) per le diverse fonti energetiche

Sorgente	CO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>
Carbone	322,8	1,8	3,4
Petrolio	258,5	0,88	1,7
Gas Naturale	178	0,9	0,01
Nucleare	7,8	0,003	0,030
<b>Fotovoltaico</b>	<b>5,3</b>	<b>0,007</b>	<b>0,020</b>
Biomasse	0,0 <sup>(1)</sup>	0,6	0,140
Geotermico	51,5	TR	TR
Eolico	6,7	TR	TR
Solare termico	3,3	TR	TR
Idroelettrico	5,9	TR	TR

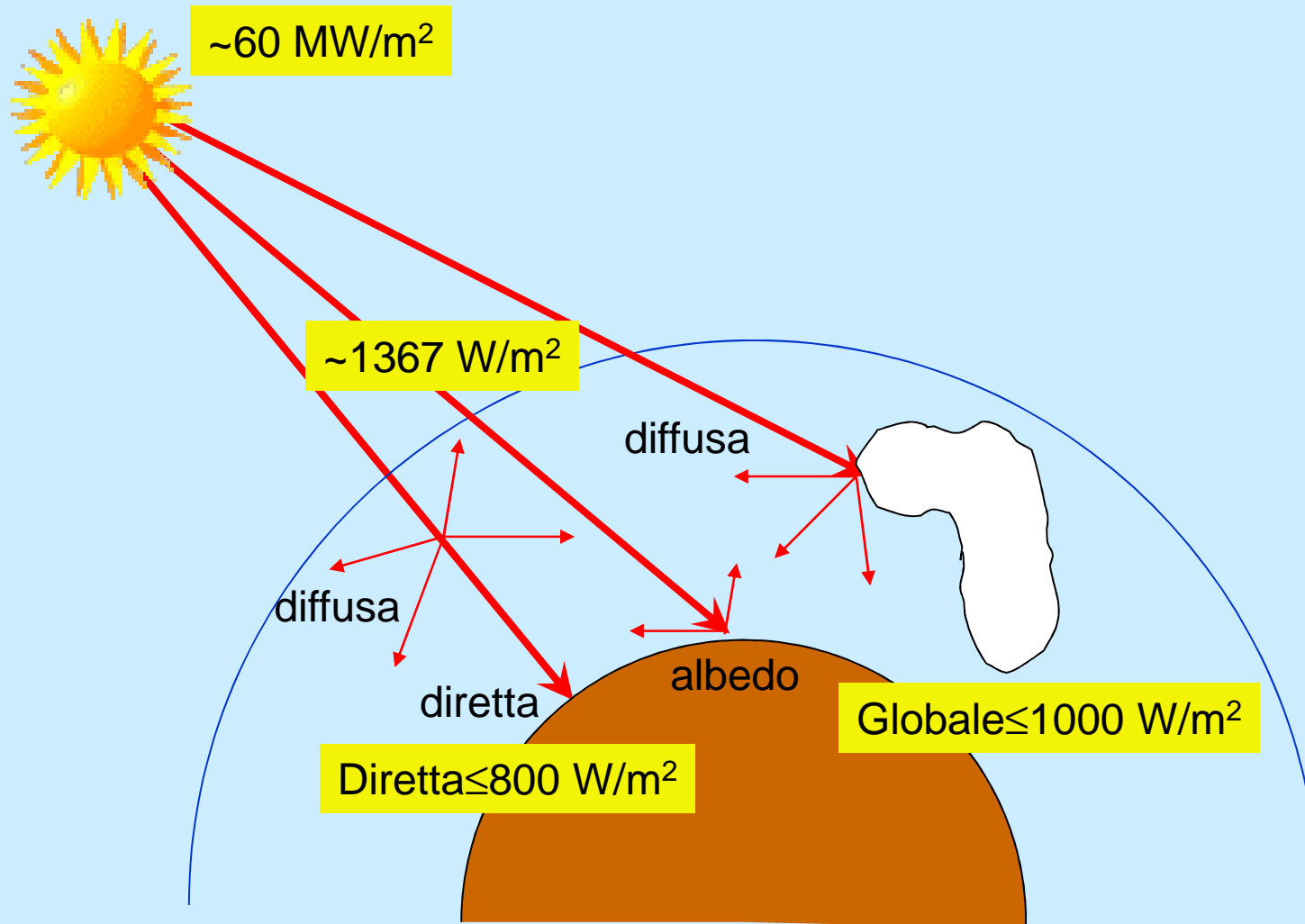
(1) con il programma di riforestazione; TR=Tracce

A bright sun with prominent rays is positioned in the upper left quadrant of a clear blue sky. Several white, fluffy clouds are scattered across the lower half of the frame, with a larger, more defined cloud on the right side. The overall scene is bright and clear.

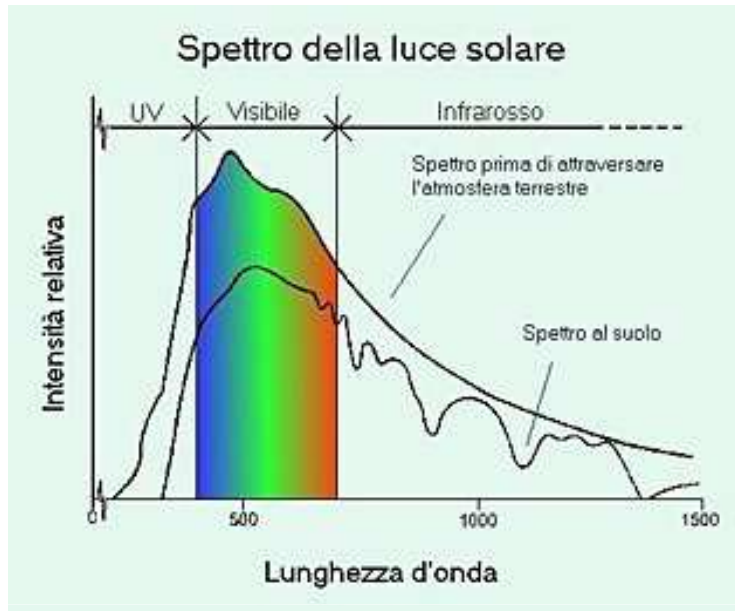
**IL SOLE**

**“LAST BUT NOT LEAST”**

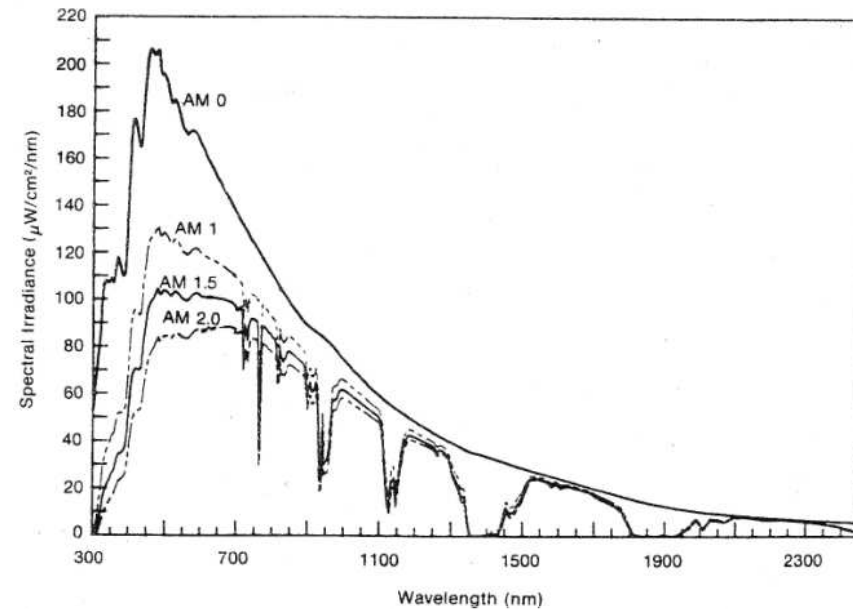
# LE COMPONENTI DELLA RADIAZIONE SOLARE



# LA RADIAZIONE SOLARE

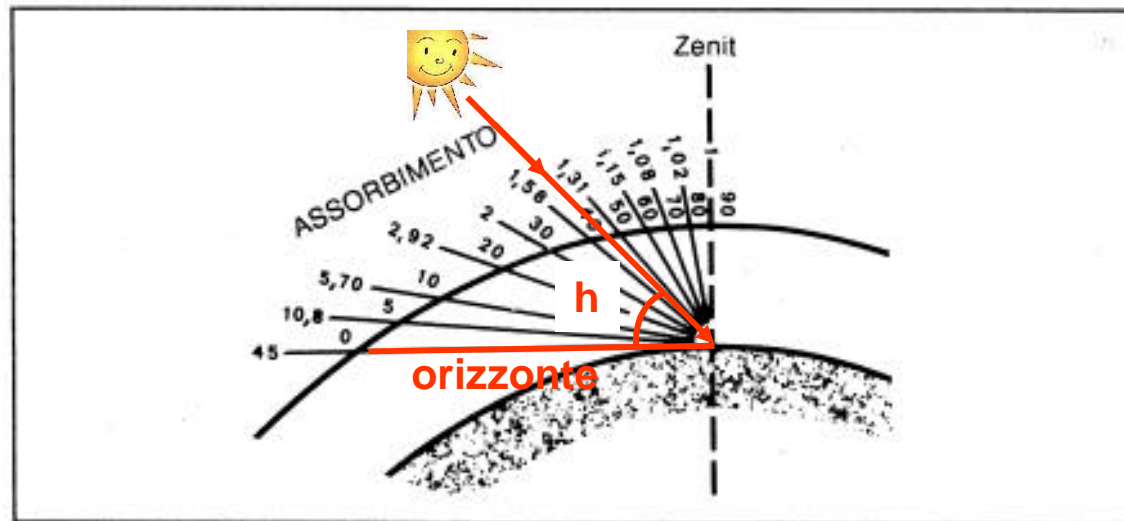


Lo spettro del Sole



Lo spettro si modifica con l'AM

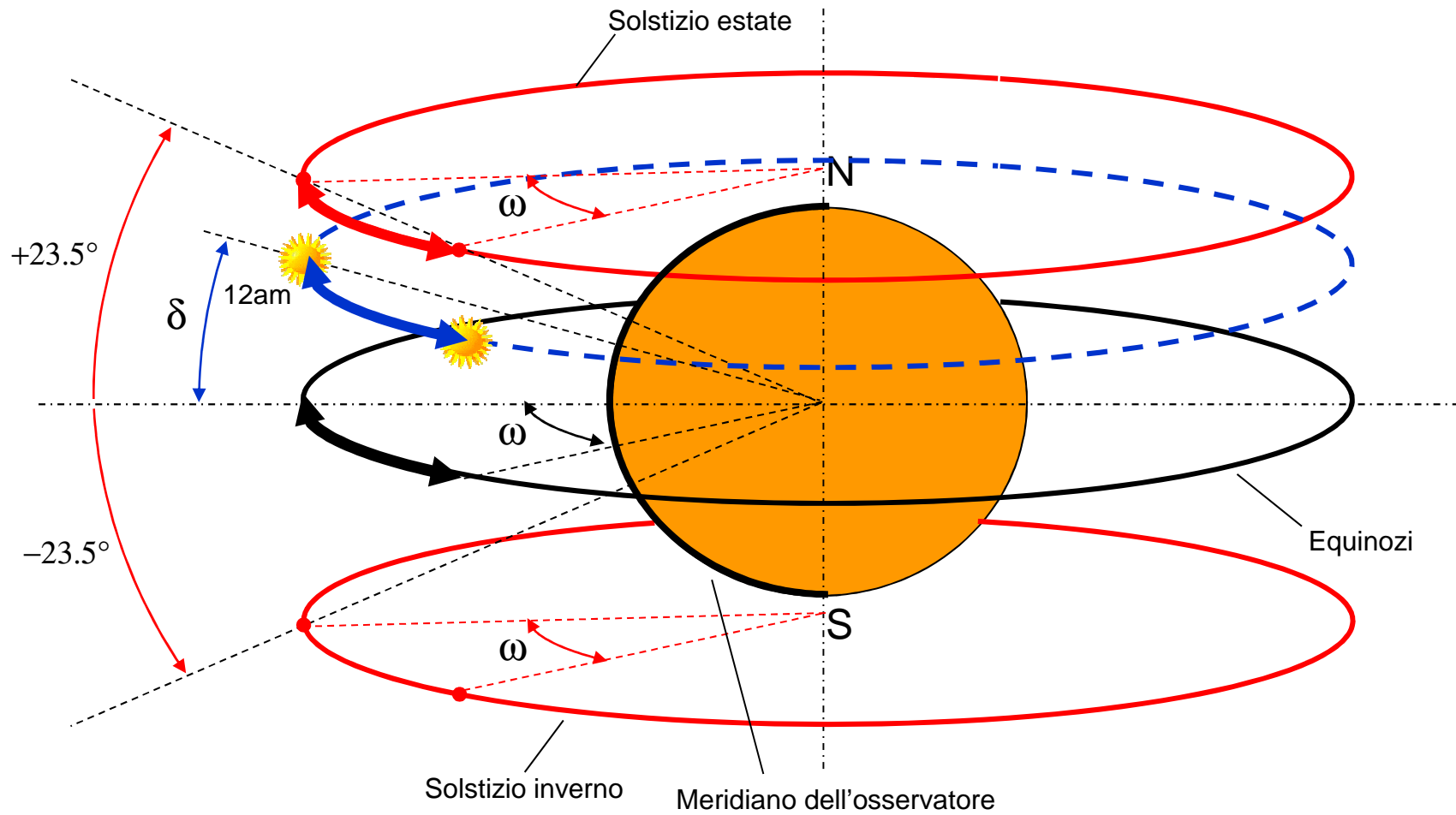
L'Air Mass (AM)  
(Massa d'aria)



Influenza dell'atmosfera: assorbimento e modificazione dello spettro

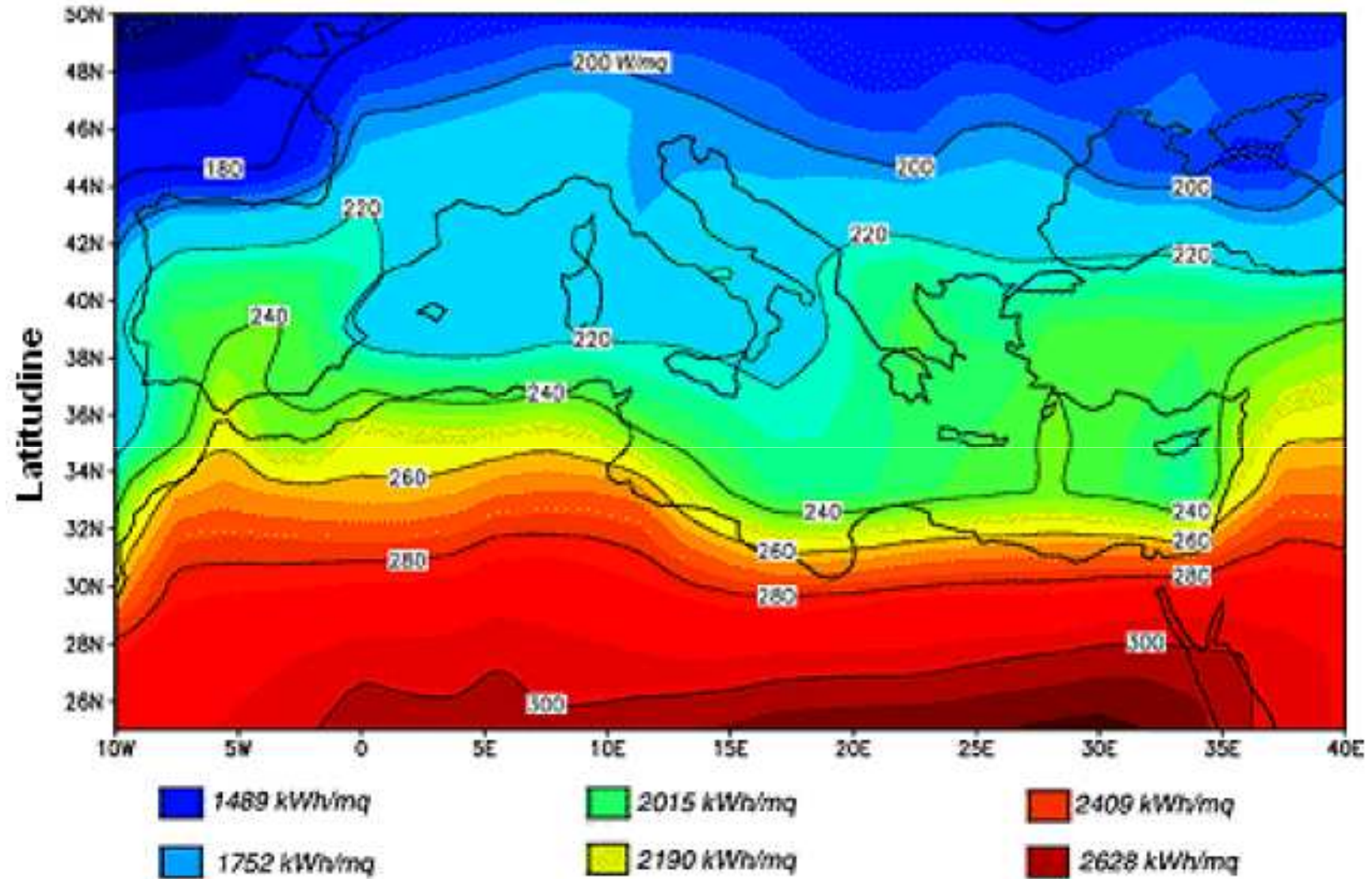
# IL PERCORSO DEL SOLE (in una visione tolemaica)

$-23.5^\circ \leq \delta \leq 23.5^\circ$  declinazione  
 $-180 \leq \omega \leq +180^\circ$  angolo orario





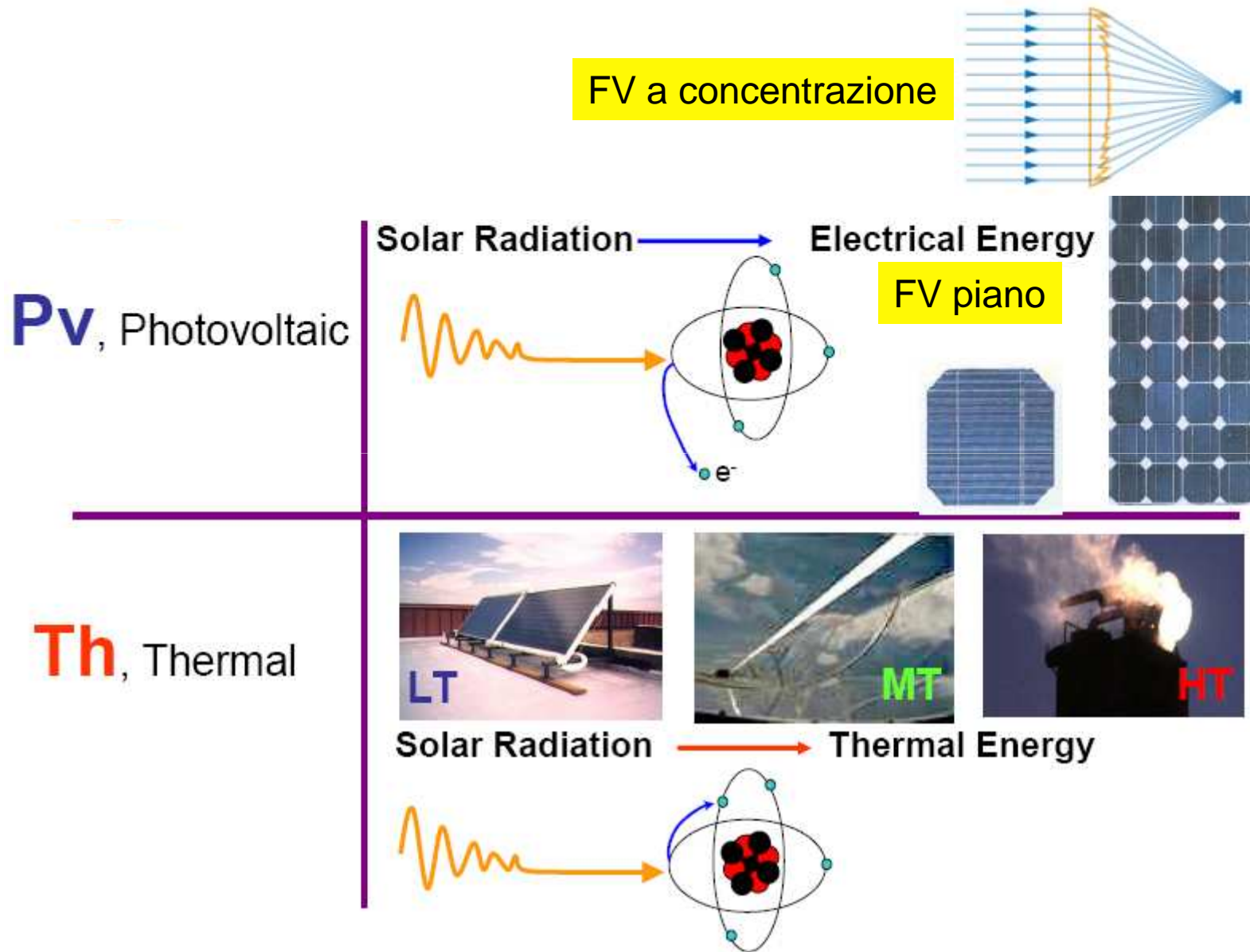
# MAPPA DI RADIAZIONE SOLARE



Distribuzione della radiazione solare nell'area mediterranea

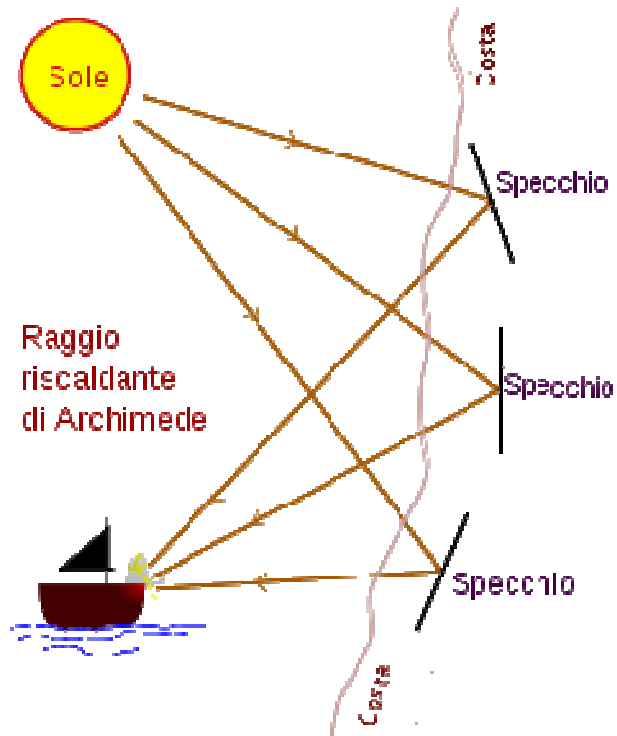
COME UTILIZZIAMO  
L'ENERGIA DELLA  
RADIAZIONE SOLARE ?

# LE PRINCIPALI TECNOLOGIE SOLARI



**CONCENTRATORI SOLARI :**  
**UNA BREVE RASSEGNA STORICA**

# GLI SPECCHI USTORI DI ARCHIMEDE (Leggenda o realtà?)



Archimede  
287 – 212 a.C.



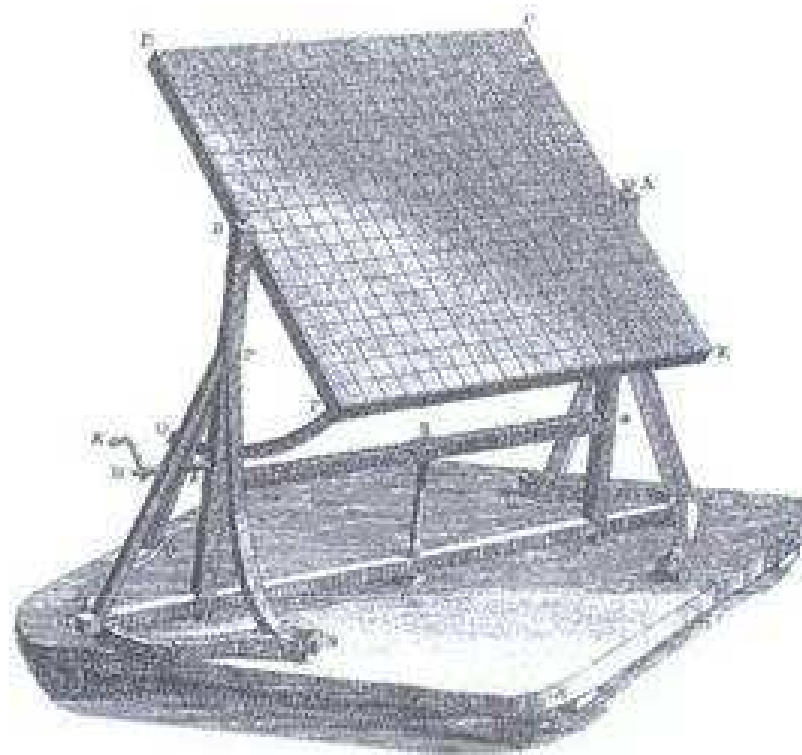
*Battaglia di Siracusa (212 a.C.)*

***Era materialmente possibile  
bruciare una nave con quel sistema?***

## IL CONCENTRATORE DI LECLERC



Georges Louis Leclerc  
1707-1788



### *L'esperimento di Georges Louis Leclerc, Conte di Buffon, del 1747*

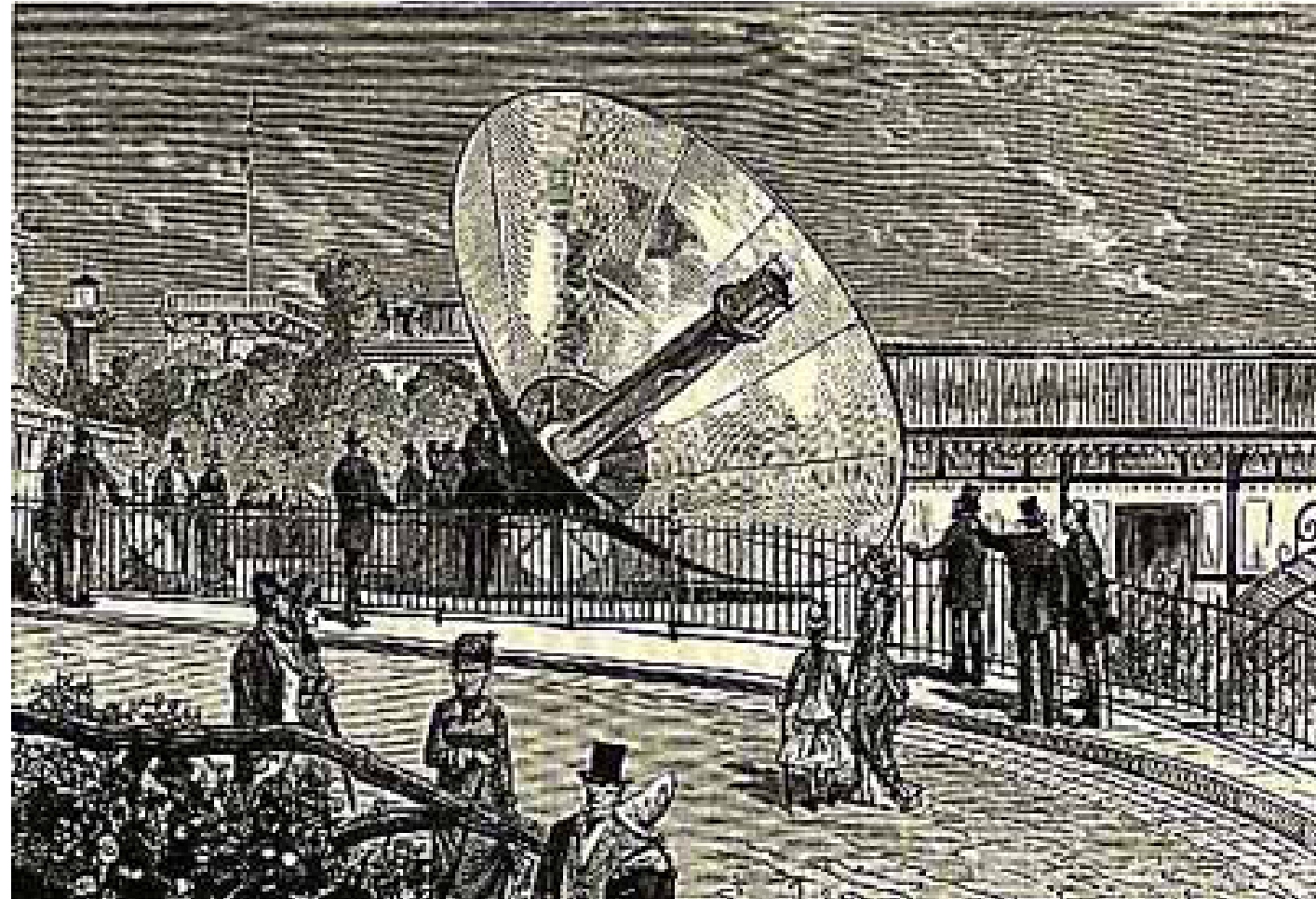
150 specchi piani fatti con vetro  
ricoperto di un impasto a base di stagno  
Dimensioni: 16x22 cm.  
Area totale:  $\approx 2 \text{ m}^2$

*Con questa struttura, la quale era tale per cui era possibile variare il fuoco e adattarsi alla posizione assunta, il conte di Buffon riuscì a portare a combustione legno di abete, e riuscì a fondere del piombo e dello stagno. Fu uno dei pochi scienziati a sostenere la veridicità storica dell'esperienza degli specchi di Archimede.*

## LA CALDAIA SOLARE DI MOUCHOT



Augustin B. Mouchot  
1823 - 1912

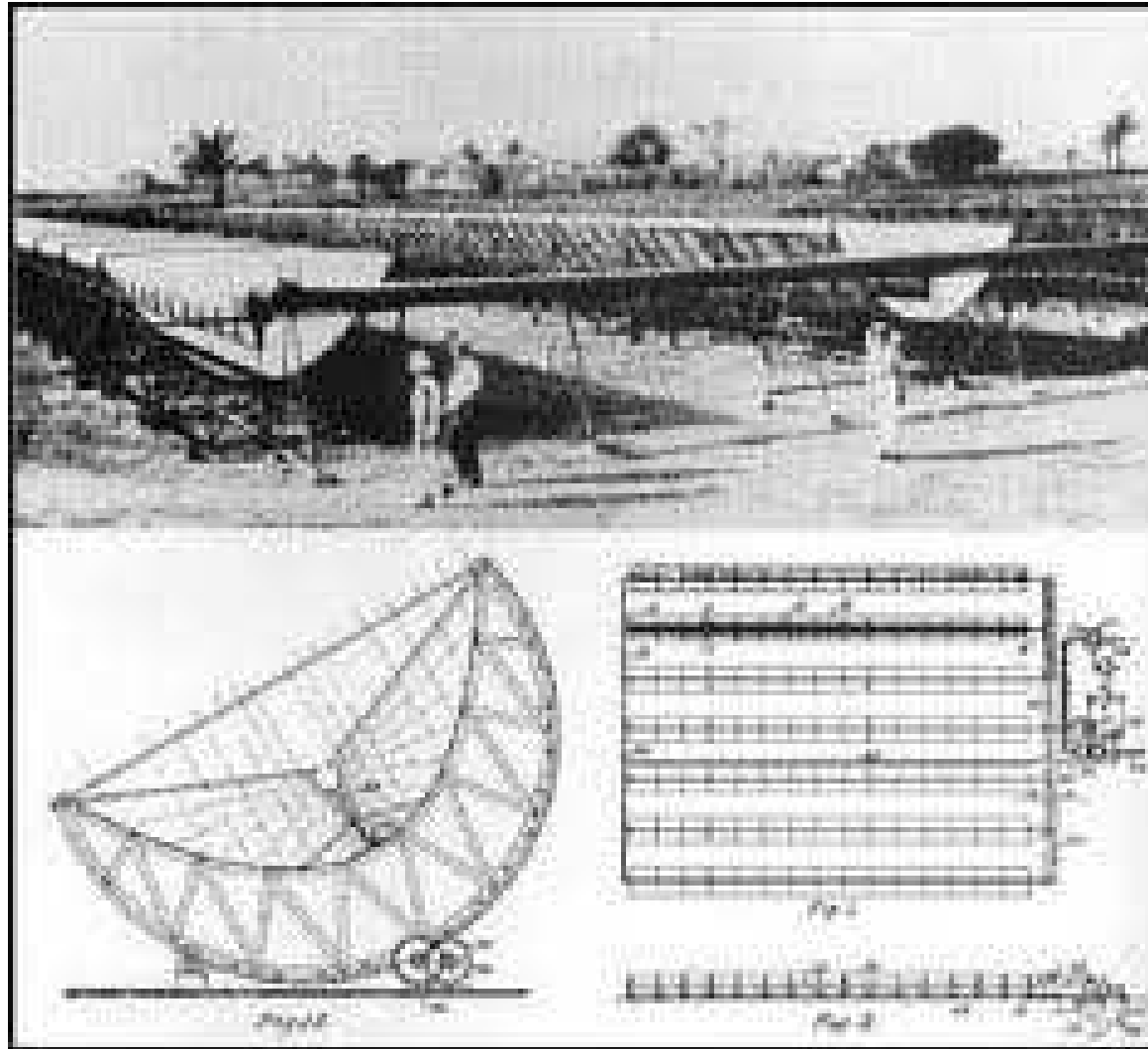


Motore solare costituito da uno specchio di diametro 4m ed una caldaia con una capienza di 70 litri di acqua, che per mezzo di vapore a pressione poteva produrre ghiaccio.

## IMPIANTO SOLARE DI SHUMAN



Frank Shuman  
1862-1918



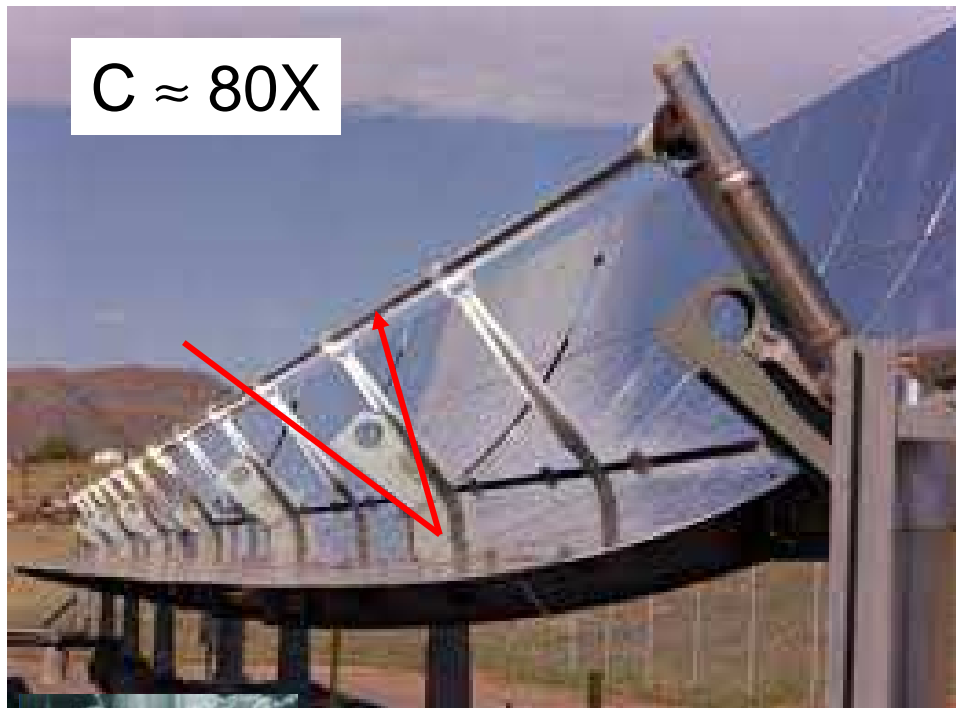
1200m<sup>2</sup> di collettori solari, sistema di accumulo termico ad acqua calda  
Alimentava un impianto di pompe da irrigazione della potenza di 55 cavalli  
capacità di pompaggio fino a 27000l di acqua al minuto.



RASSEGNA DI  
IMPIANTI SOLARI MODERNI

# CONCENTRATORE SOLARE (Termodinamico 2-D a specchi parabolici)

**VIDEO**



Carlo Rubbia  
Nobel per la Fisica  
1984

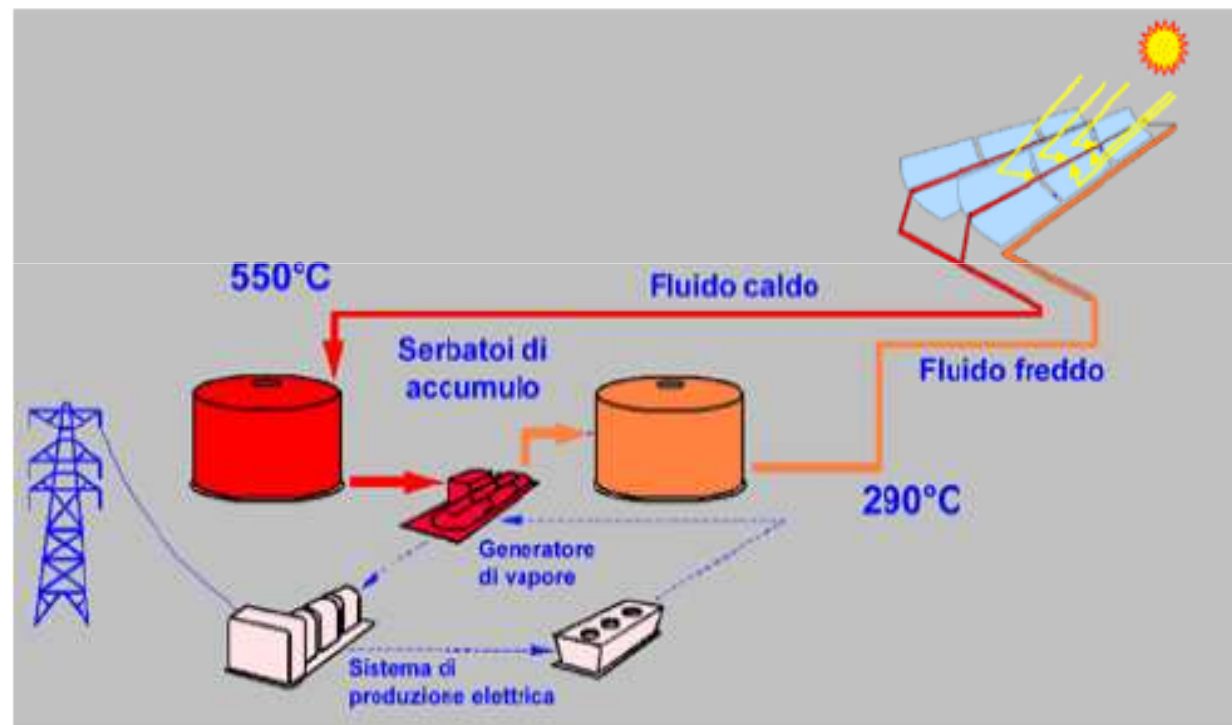


**VIDEO progetto Archimede**

Progetto Archimede ENEL - ENEA (Priolo, SR)

# Progetto ENEA Archimede

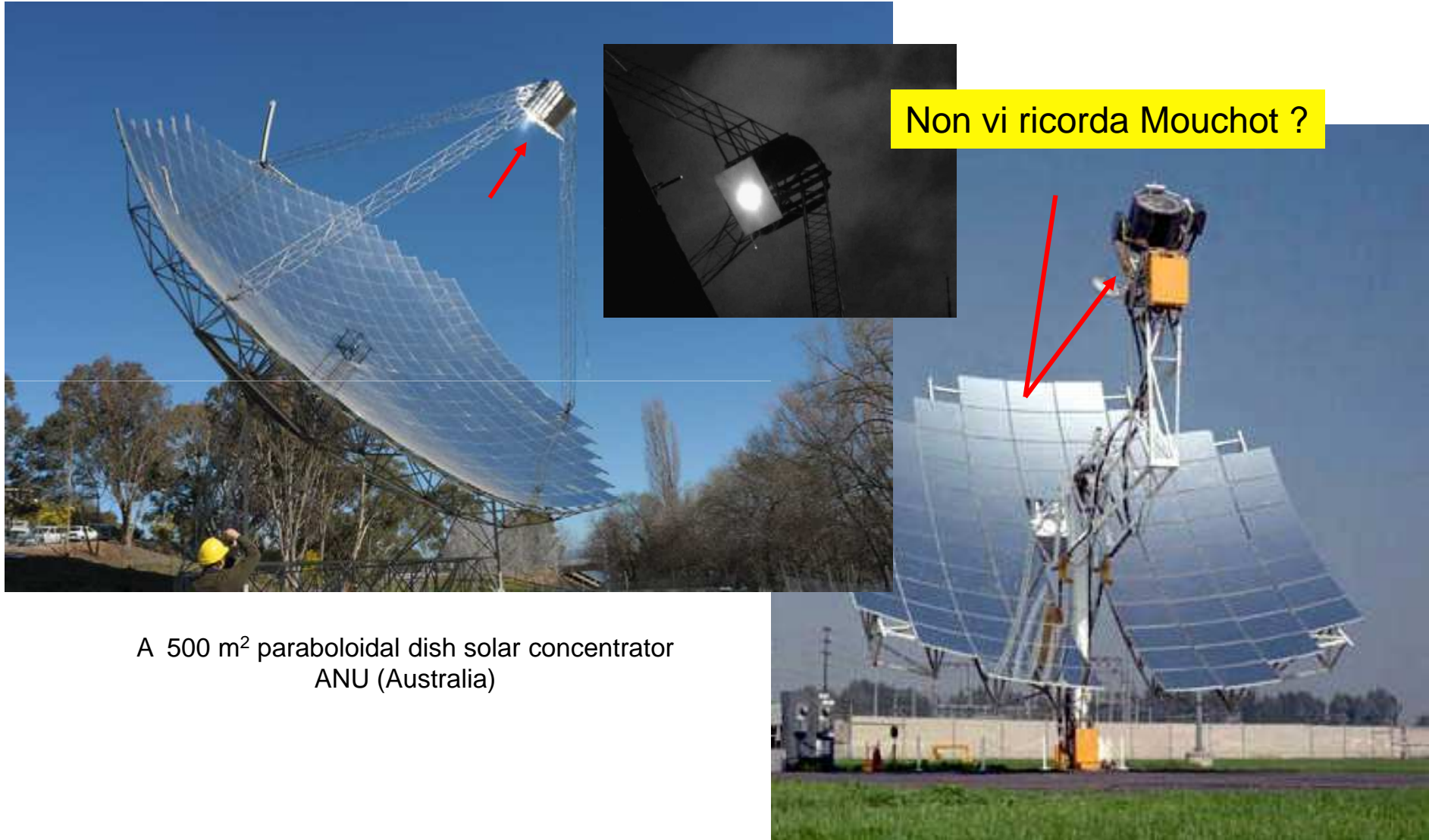
La generazione e lo stoccaggio di *fluidi a media temperatura* (<550°C) per la generazione elettrica e *alta temperatura* (>850°C) per la generazione di idrogeno.



**Il progetto solare-termodinamico ENEA (40 MWe)**

# CONCENTRATORE SOLARE

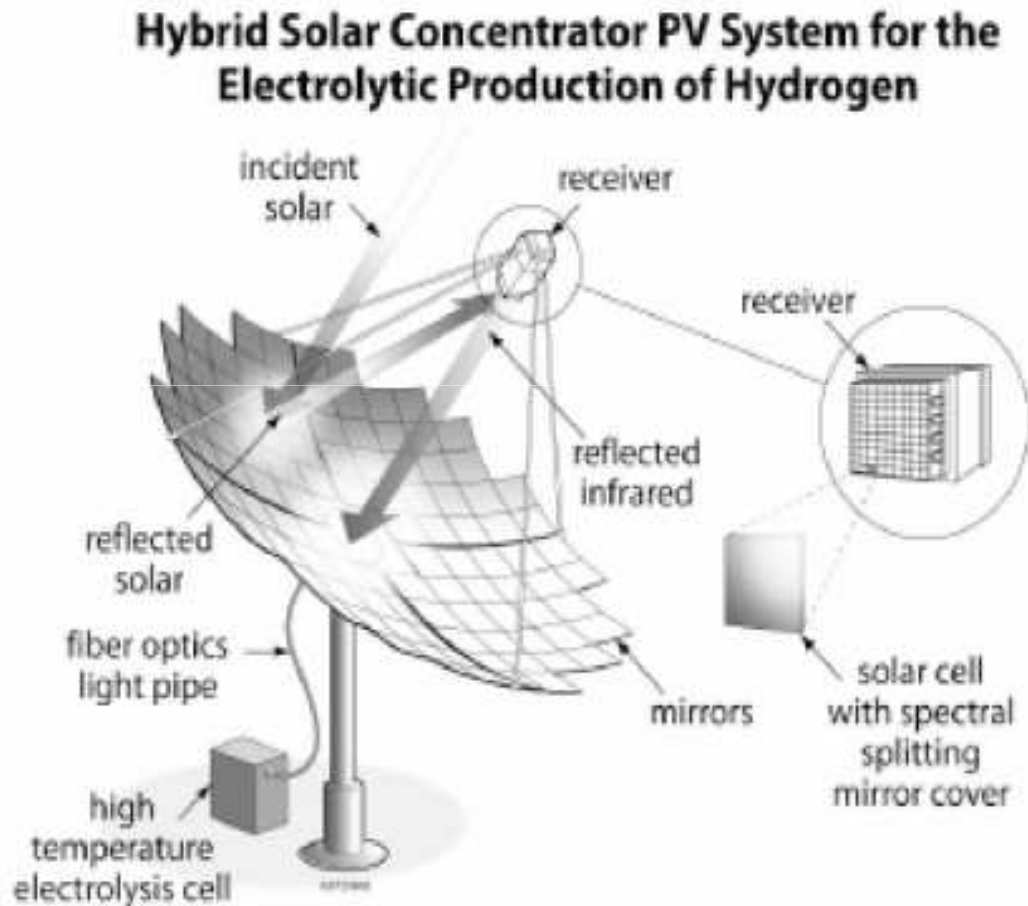
(Termodinamico 3-D a mosaico di specchi)



A 500 m<sup>2</sup> paraboloidal dish solar concentrator  
ANU (Australia)

Archimede Solar Energy, Angelantoni (Massa Martana)

## Applicazioni innovative: produzione di H<sub>2</sub>



La luce riflessa è focalizzata su un ricevitore che invia la componente infrarossa tramite guida ottica a fibra ad una cella elettrolitica a stato solido ad alta temperatura per la produzione di idrogeno, mentre la componente UV e visibile della luce è inviata ad un array di celle che alimenta la cella elettrochimica

# CONCENTRATORE SOLARE (Termodinamico 3-D a campo di specchi)



Andalusia (Spagna)

# CONCENTRATORE SOLARE (Fotovoltaico 2-D)



a bassa concentrazione



Euclide

a media concentrazione



Euclides (Spagna)

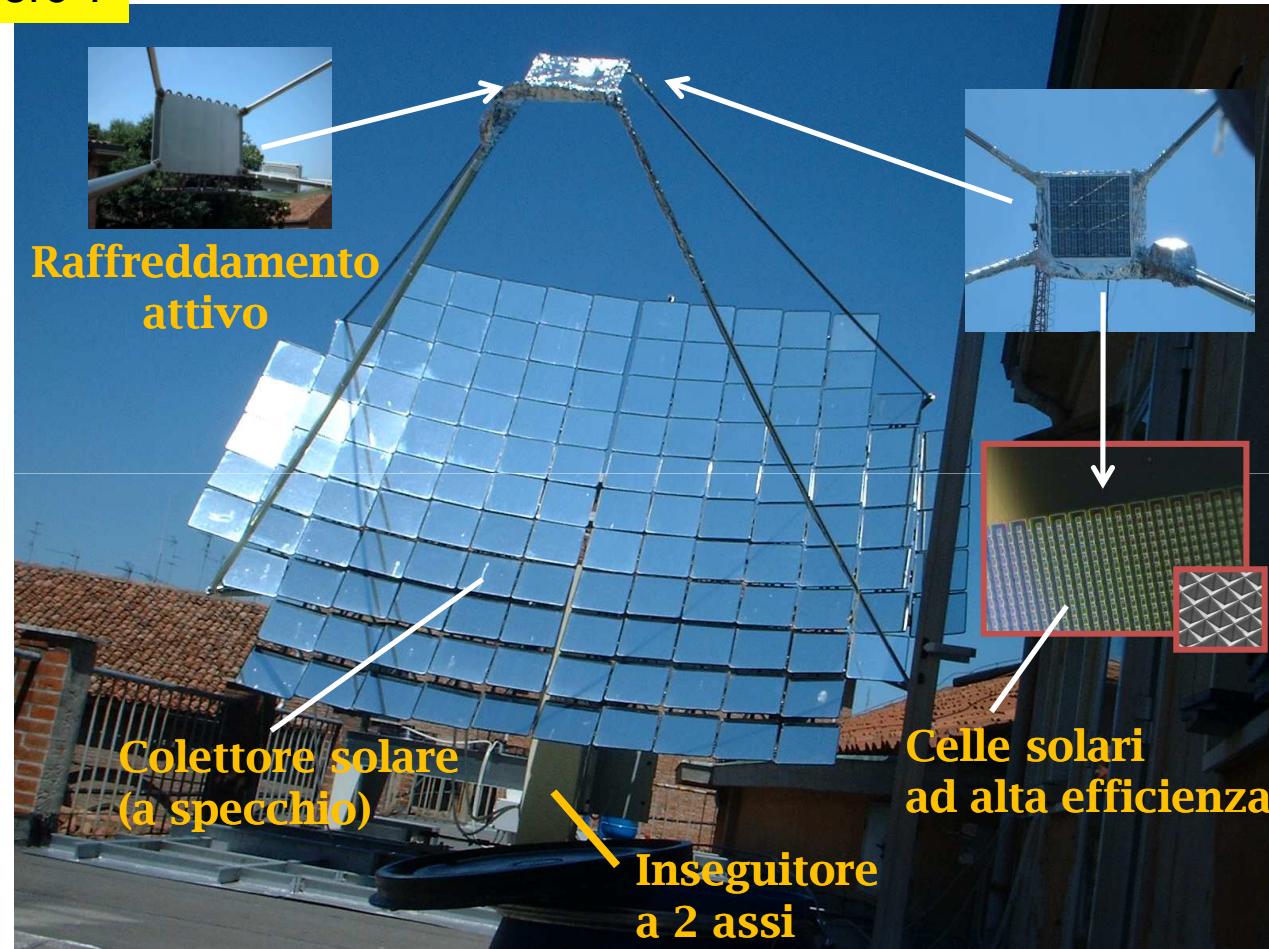
# CONCENTRATORE SOLARE

(Fotovoltaico 3-D a mosaico di specchi)

Non vi ricorda Leclerc ?



Prof. G. Martinelli



Università di Ferrara. Dipartimento di Fisica



# CONCENTRATORE SOLARE

(Fotovoltaico 3-D a bassa-media concentrazione)



**Wp: = 39 W**  
**Eff.: = 12%**  
**C = 25X**



**Wp: = 95 W**  
**Eff.: = 12%**  
**C = 25X**



Lo staff CPower



Università di Ferrara



≈4kWp Rondine system, Ostellata (Italia)

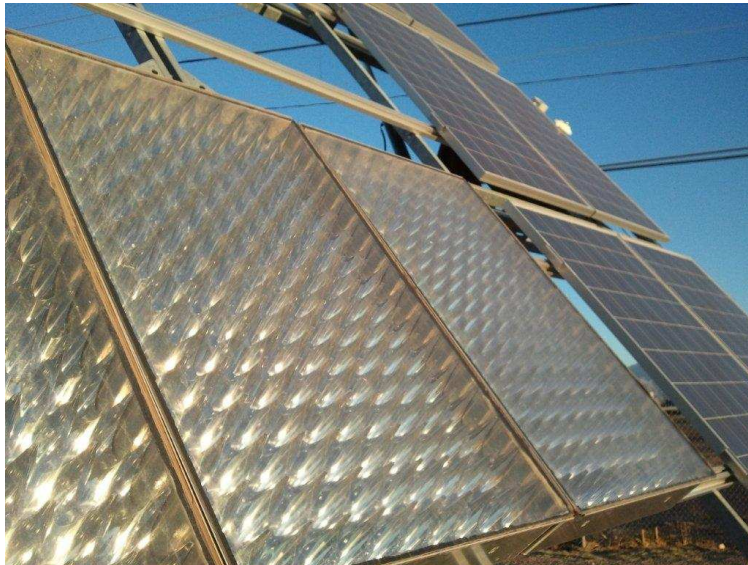
## CONCENTRATORE SOLARE RONDINE



≈4kWp Rondine system, Ostellata (Italia)



≈4kWp Rondine system, Ostellata (Italia)

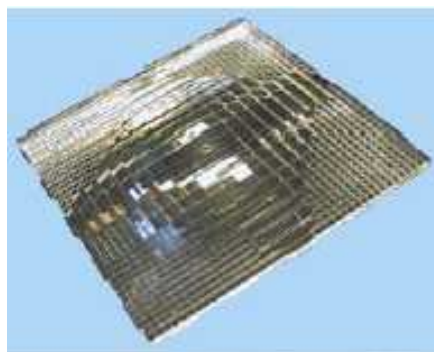


≈1.5kWp Rondine system, Tucson (US)



≈1.5kWp Rondine system, Tucson (US)

# CONCENTRATORE PhoCUS (Fotovoltaico 3-D a media concentrazione)



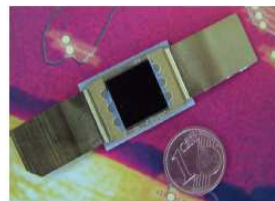
Lente

+



secondario

+



Cella solare

=



concentratore



Modulo a concentrazione  
(ENEA – Portici)



Impianto CPV

## ANCHE NOI POSSIAMO FARE QUALCOSA !



Lorenzo Bocca

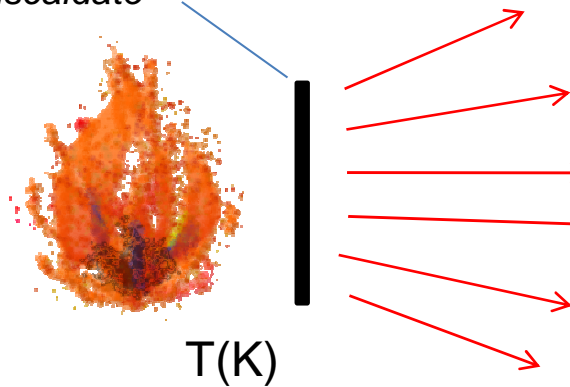


Gli alunni delle classi terza A e B dell'istituto Falcone e Borsellino di Offanengo, guidati dal Prof. Lorenzo Bocca realizzano una cucina solare per il Mozambico.

## UN PO' DI TEORIA

# FORMULE PER LA TEMPERATURA MASSIMA DI UN SISTEMA SOLARE TERMICO

Corpo nero  
(emettitore ideale)  
riscaldato



$$T(K) = T(^{\circ}C) + 273.15$$

Densità di potenza totale emessa dal corpo:  
 $E \text{ (W/m}^2\text{)} = 5.67 \times 10^{-8} \times T(K)^4$   
Legge di Stefan-Boltzmann



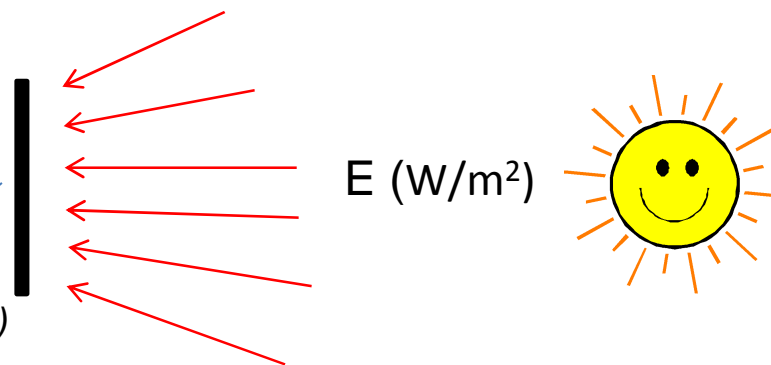
Jožef Stefan  
(1835-1893)



Ludwig Boltzmann  
(1844 -1906)

$$T(K) = (E / 5.67 \times 10^{-8})^{1/4}$$

Corpo nero  
(assorbitore ideale)  
irraggiato





Max Planck  
(1858 – 1947)

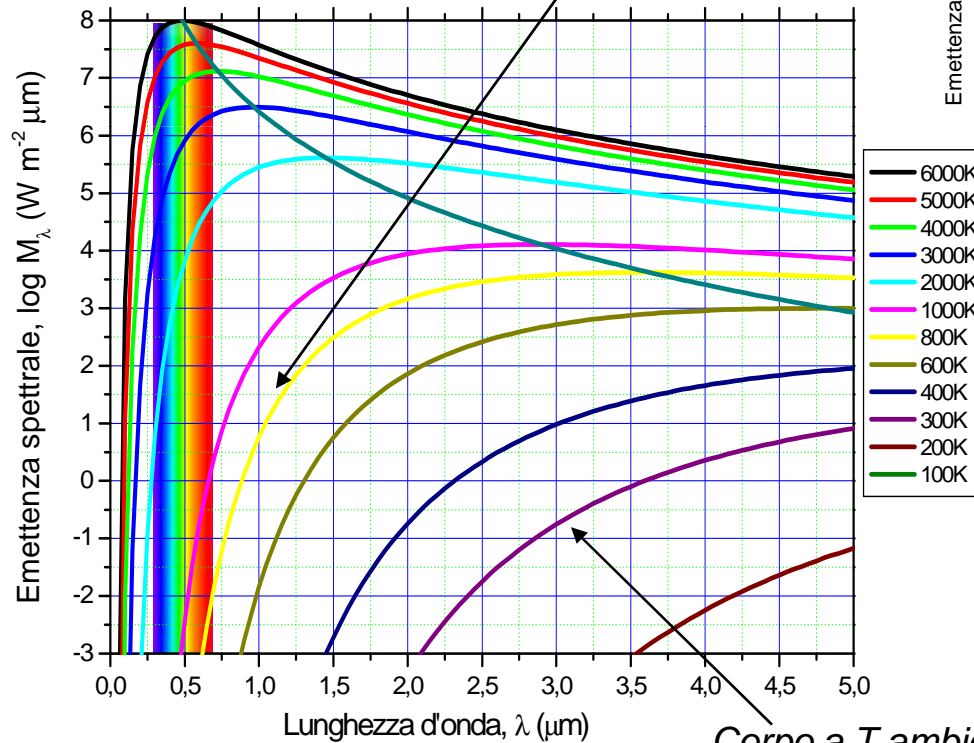
# DISTRIBUZIONE SPETTRALE DELLA RADIAZIONE DI CORPO NERO

## Legge di Planck

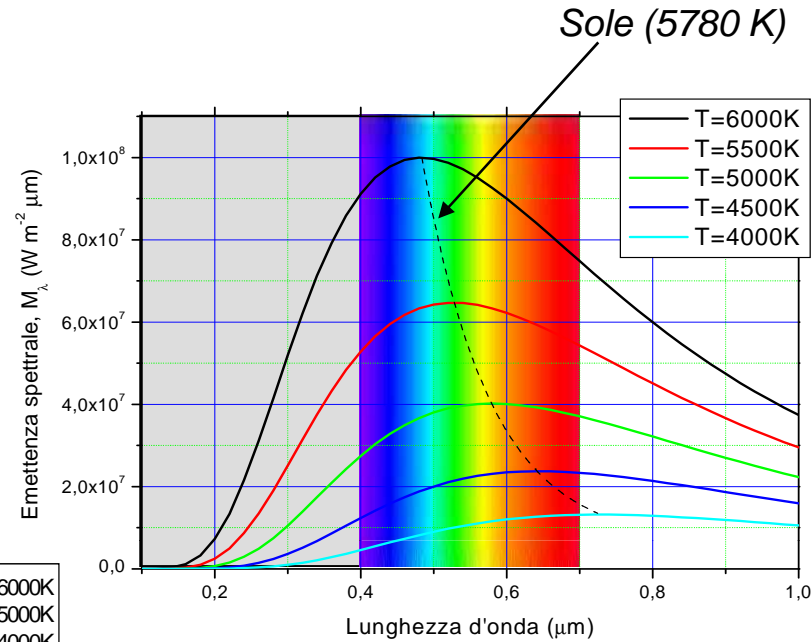
$$M_{\lambda}(T) = \frac{2 \pi h c^2}{n^2 \lambda^5 (e^{(hc/n\lambda kT)} - 1)}$$

Emetenza spettrale del corpo nero

Sopra  $T \sim 800 \text{ K}$  il corpo comincia ad emettere luce rossa



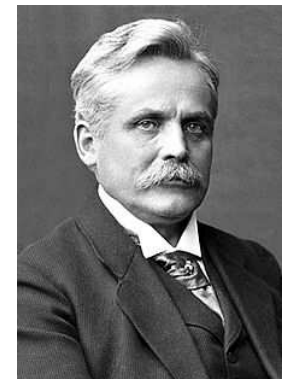
Corpo a  $T$  ambiente emette nell'infrarosso



Corpi ad alta temperatura

## Legge di Wien

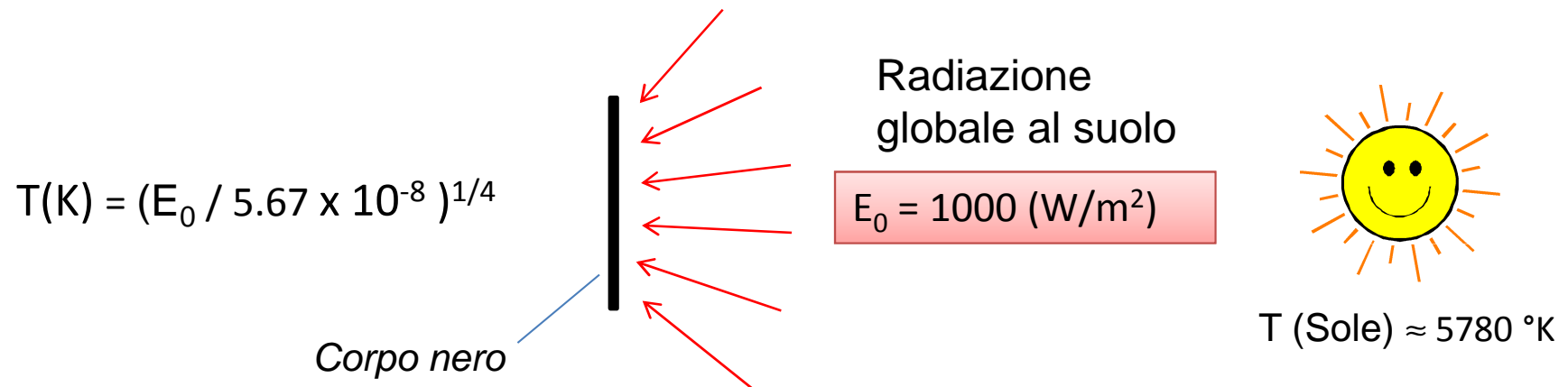
$$T \cdot \lambda_{\max} = 2898 \text{ K} \cdot \mu\text{m}$$



Wilhelm Wien  
(1864 – 1928)

# FORMULE PER LA TEMPERATURA MASSIMA DI UN SISTEMA SOLARE TERMICO

## SISTEMA SOLARE SENZA CONCENTRAZIONE



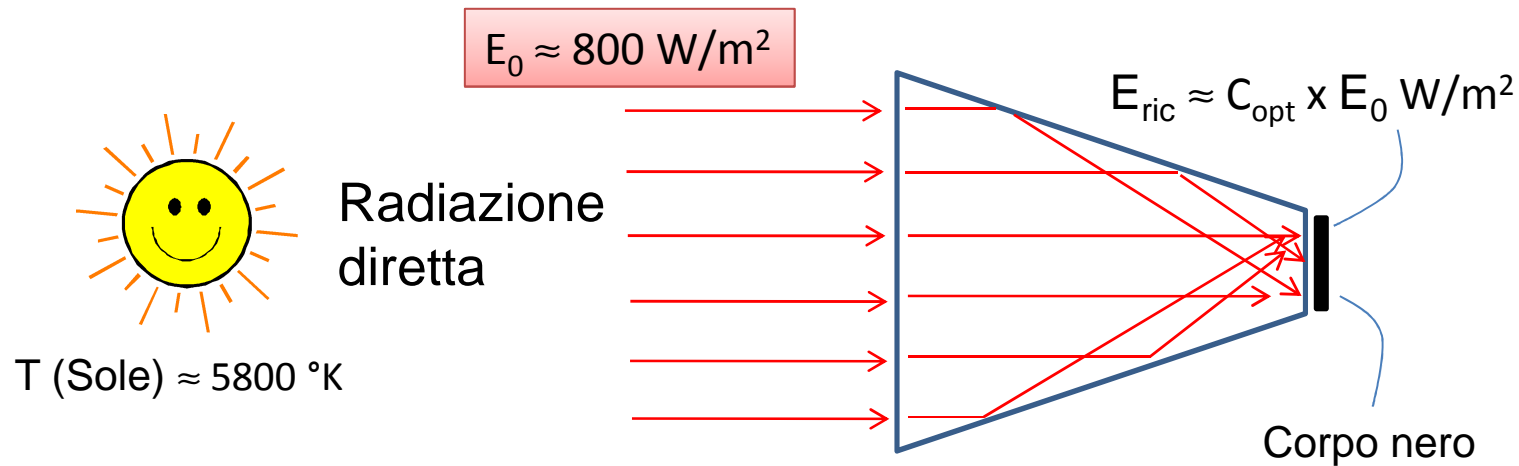
$$T(K) = (E_0 / 5.67 \times 10^{-8})^{1/4} = (1000 / 5.67 \times 10^{-8})^{1/4} = 364 \text{ K} \approx 90 \text{ °C}$$

**TEMPERATURA DI EQUILIBRIO =  $T \approx 364 \text{ K} \approx 90 \text{ °C}$**



# FORMULE PER LA TEMPERATURA MASSIMA DI UN SISTEMA SOLARE TERMICO

## SISTEMA SOLARE A CONCENTRAZIONE



$$C_{\text{opt}} = E_{\text{ric}} / E_0 = \text{RAPPORTO DI CONCENTRAZIONE}$$



$$T(\text{K}) = (E_0 \cdot C_{\text{opt}} / 5.67 \times 10^{-8})^{1/4} = (800 \cdot C_{\text{opt}} / 5.67 \times 10^{-8})^{1/4} = (C_{\text{opt}})^{1/4} \cdot 344 \text{ K}$$

$$\text{TEMPERATURA DI EQUILIBRIO} = (C_{\text{opt}})^{1/4} \cdot 344 \text{ }^\circ\text{K} = \dots \text{ }^\circ\text{C}$$

# LA CELLA SOLARE



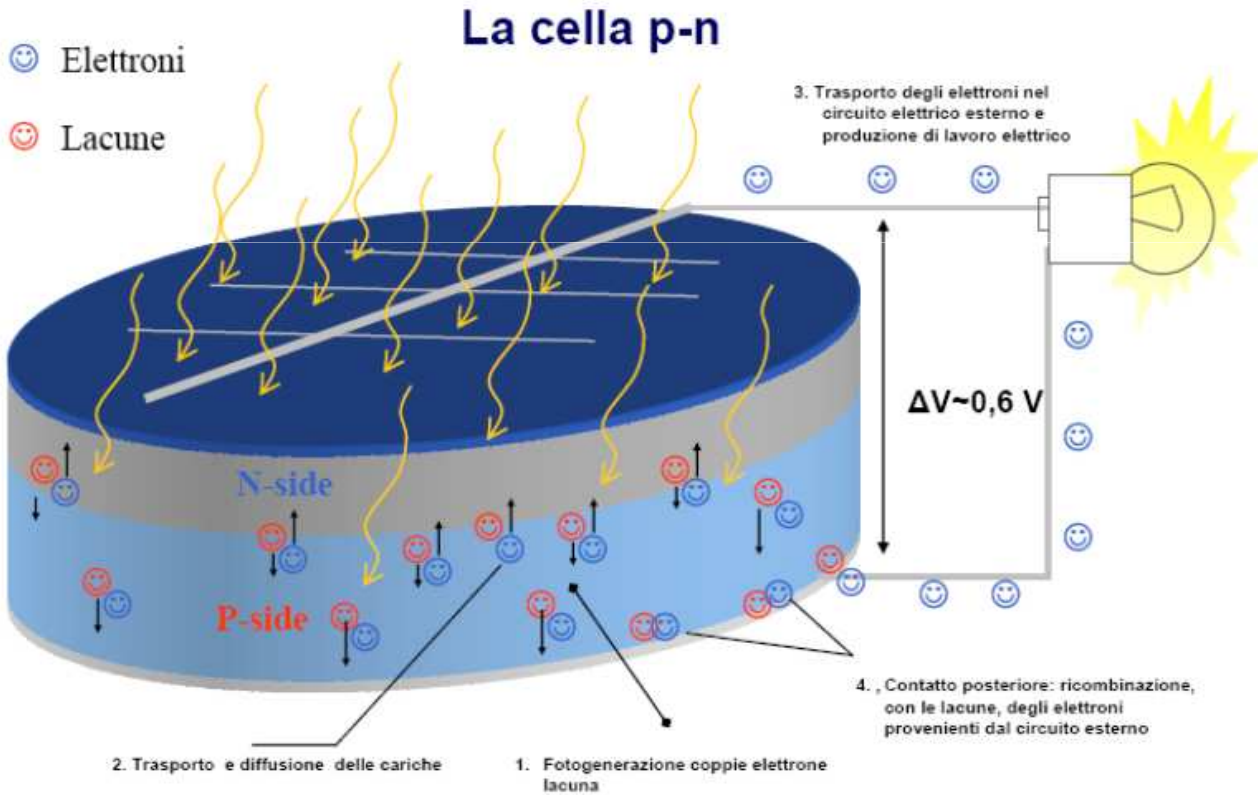
1839: Becquerel osserva per la prima volta l'effetto fotoelettrico.



1904: Einstein pubblica il suo lavoro sull'effetto fotoelettrico

A.E. Becquerel (1820-1891)

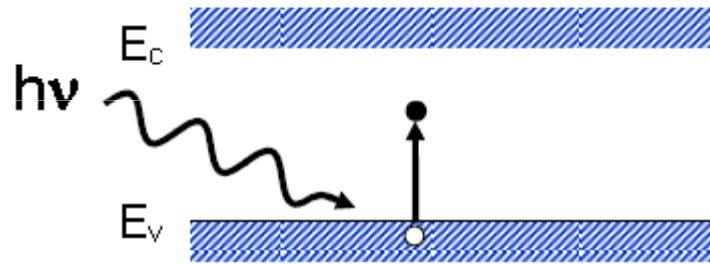
Einstein (1879-1955)



Fotogenerazione e raccolta delle cariche

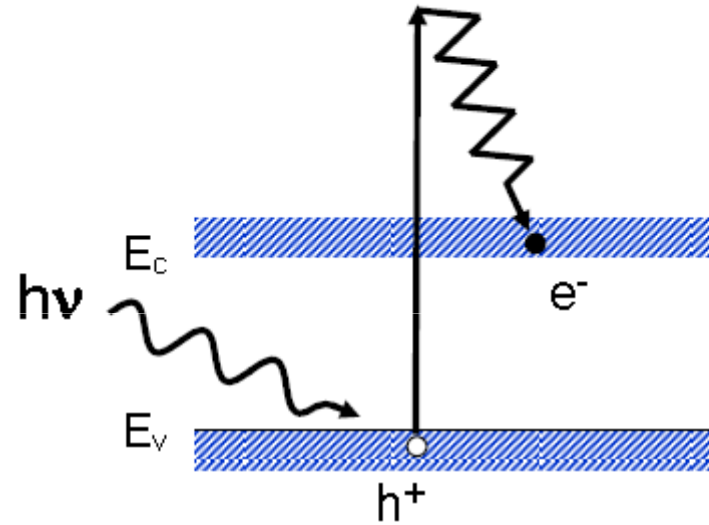
# LA CELLA SOLARE

**Fotoni con energia insufficiente**



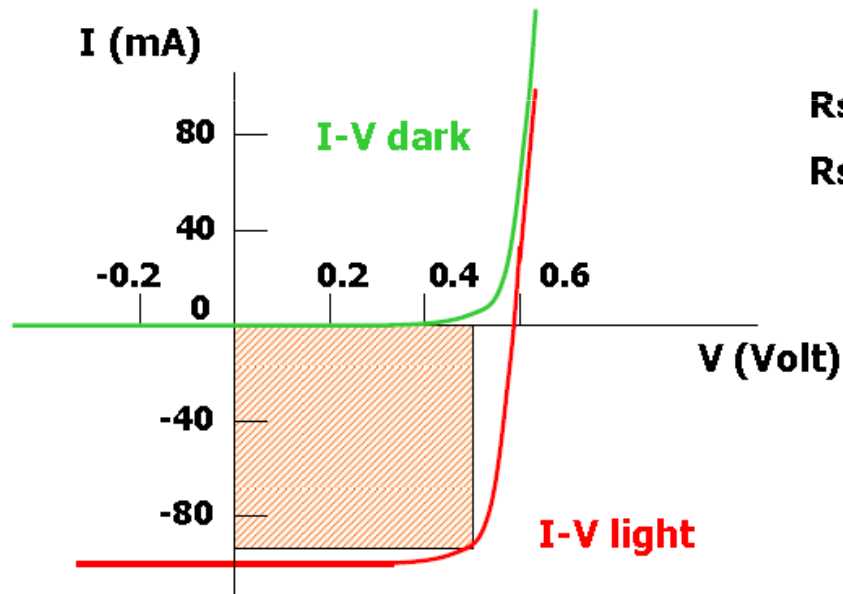
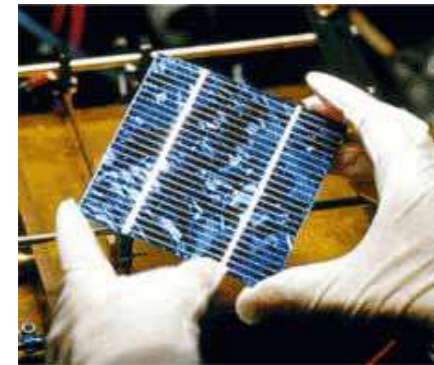
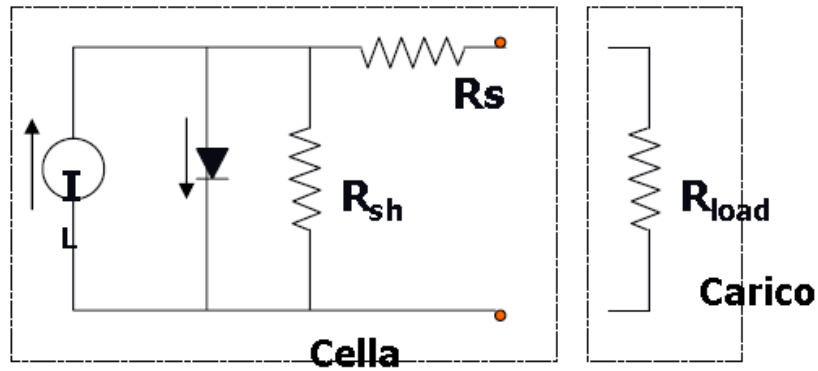
**Nessuna carica fotogenerata**

**Fotoni con eccesso di energia**

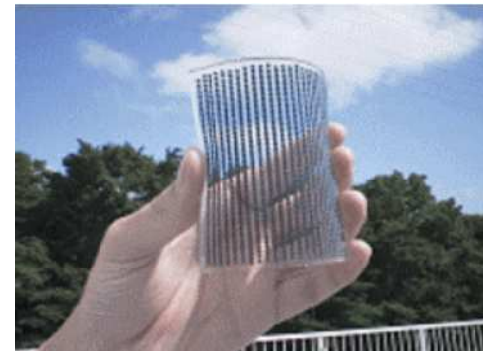


**Termalizzazione delle cariche**

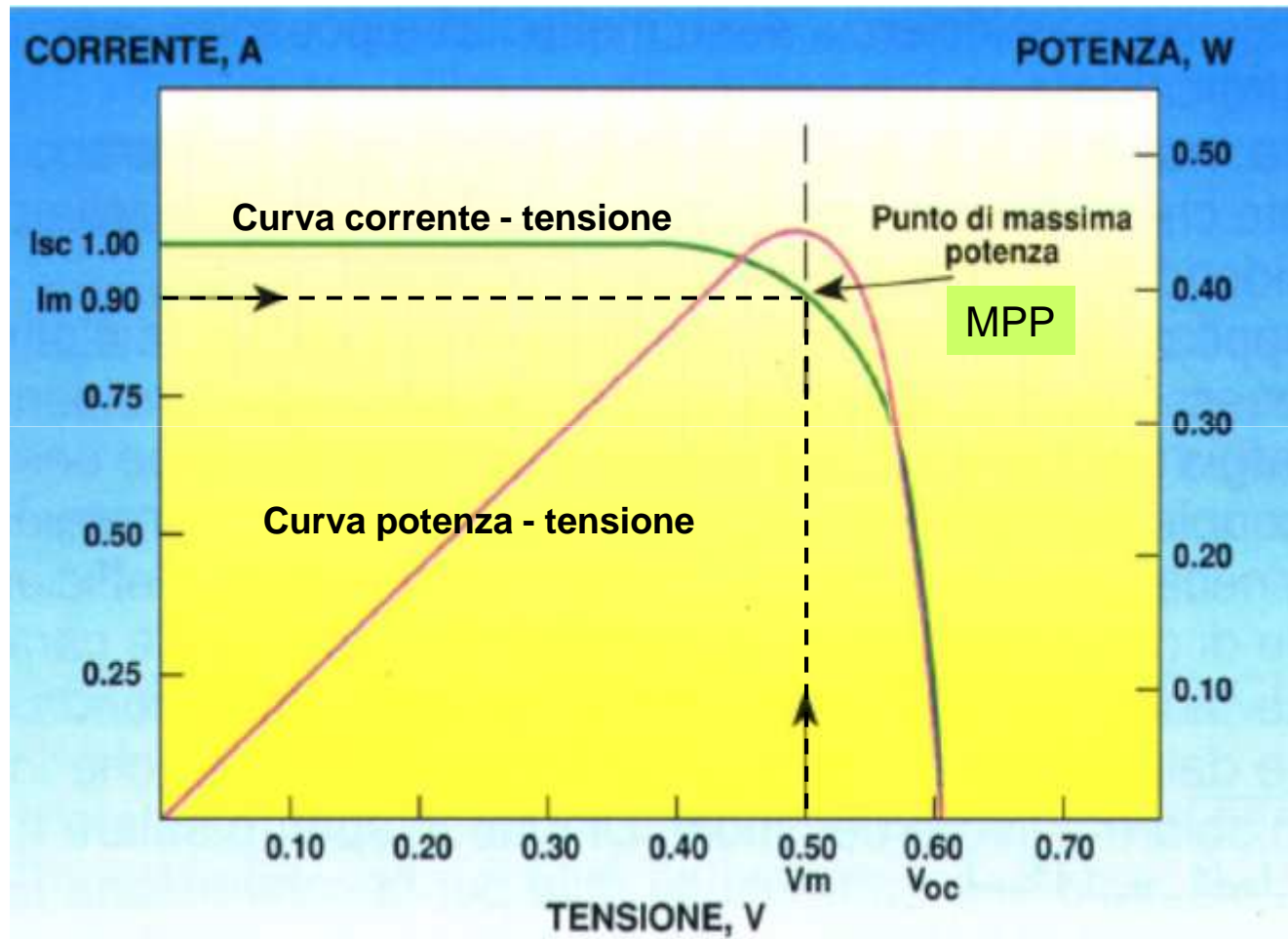
# IL CIRCUITO EQUIVALENTE



$R_s$  = Resistenza serie  
 $R_{sh}$  = Resistenza di shunt

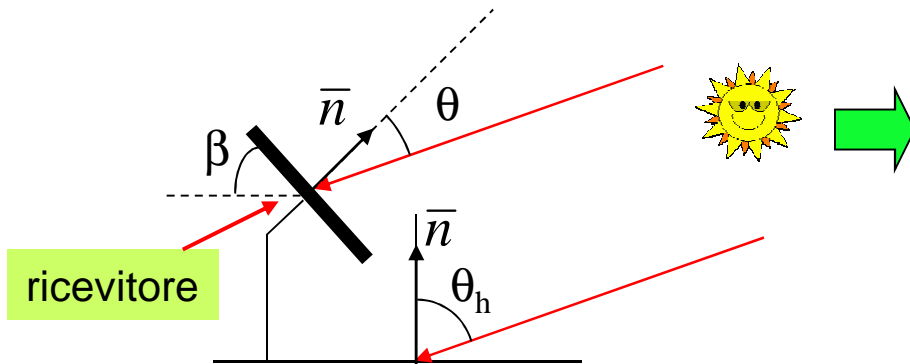


# LA CURVA CORRENTE - TENSIONE



## DUE PROBLEMATICHE

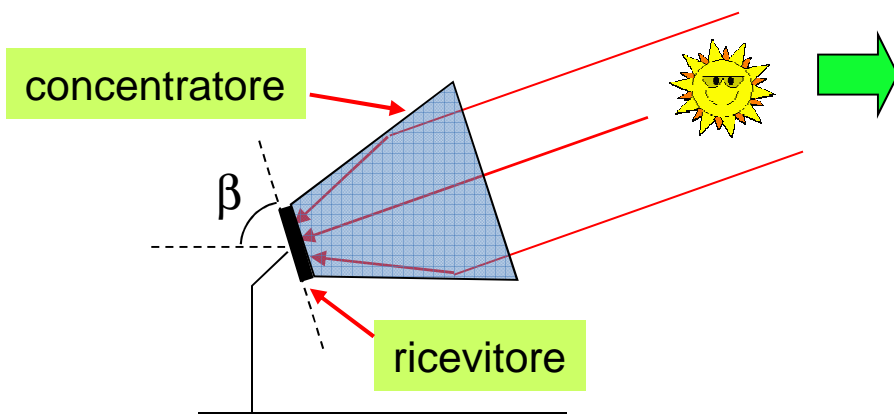
### Sistema solare piano



#### 1) Problema per il ricevitore:

Assorbire al meglio la radiazione solare, ovvero **l'assorbanza** del ricevitore deve essere prossima a 1.

### Sistema solare a concentrazione



#### 1) Problema per il ricevitore:

Assorbire al meglio la radiazione solare, ovvero **l'assorbanza** del ricevitore deve essere prossima a 1.

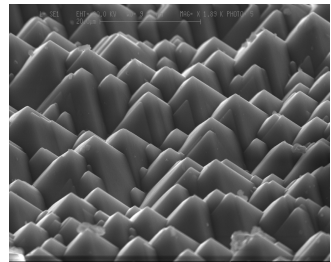
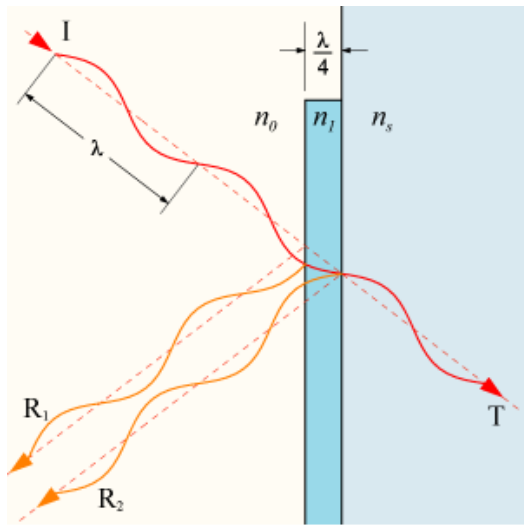
#### 2) Problema per il concentratore:

Trasmettere al meglio la radiazione solare dall'apertura d'ingresso all'apertura di uscita, ovvero **l'efficienza ottica** del concentratore deve essere prossima a 1.

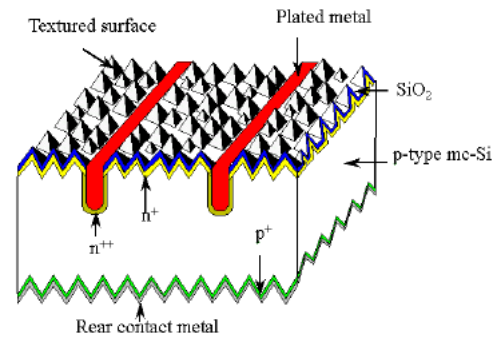
Efficienza del sistema=  
**assorbanza** del ricevitore x  
**efficienza ottica** del concentratore

# PER MIGLIORARE L'ASSORBIMENTO DEL RICEVITORE (Celle Solari al Silicio)

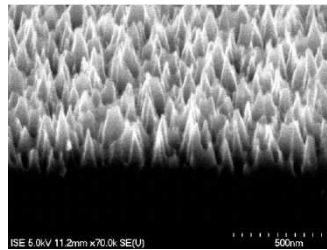
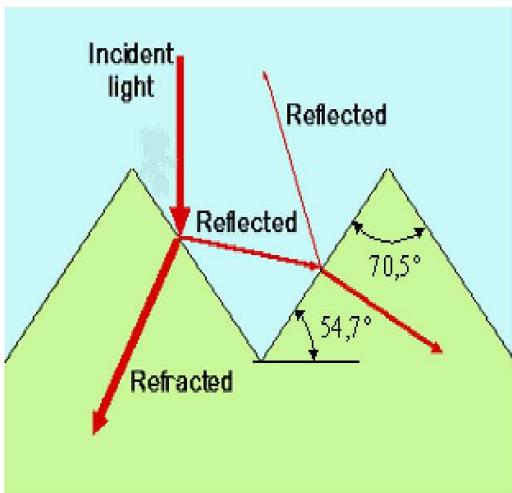
## Film antiriflesso



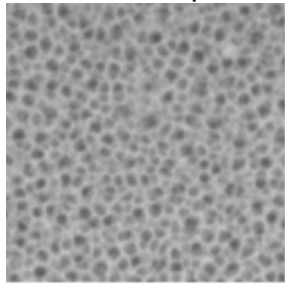
Piramidi diritte



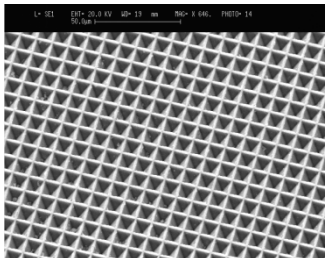
## Testurizzazione



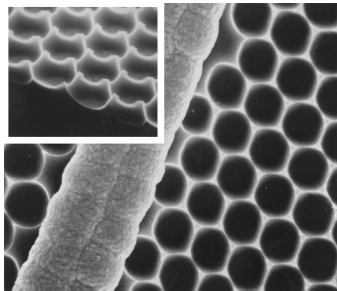
Tattamento in plasma



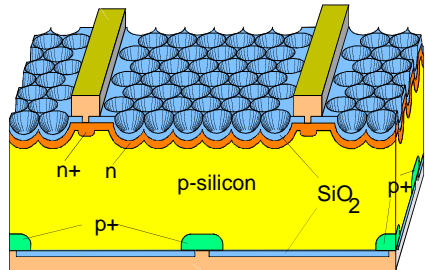
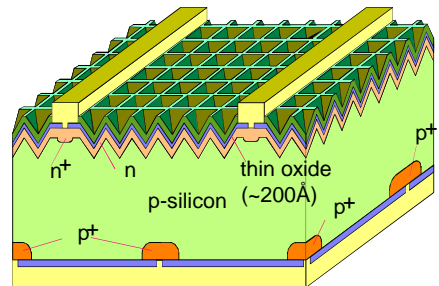
Silicio poroso



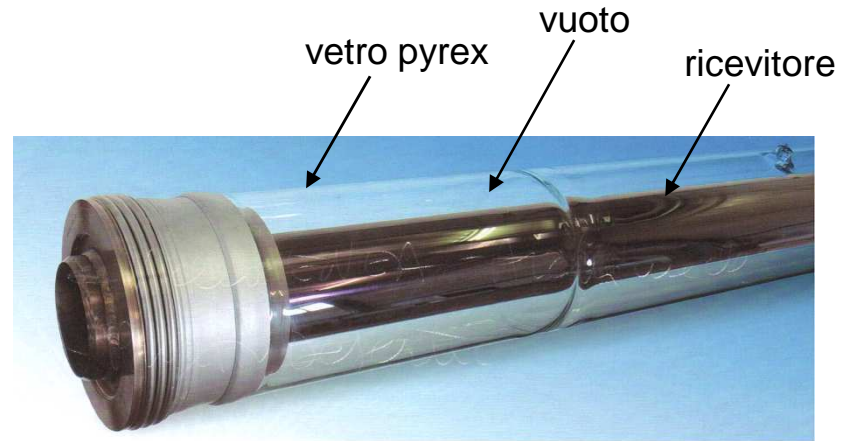
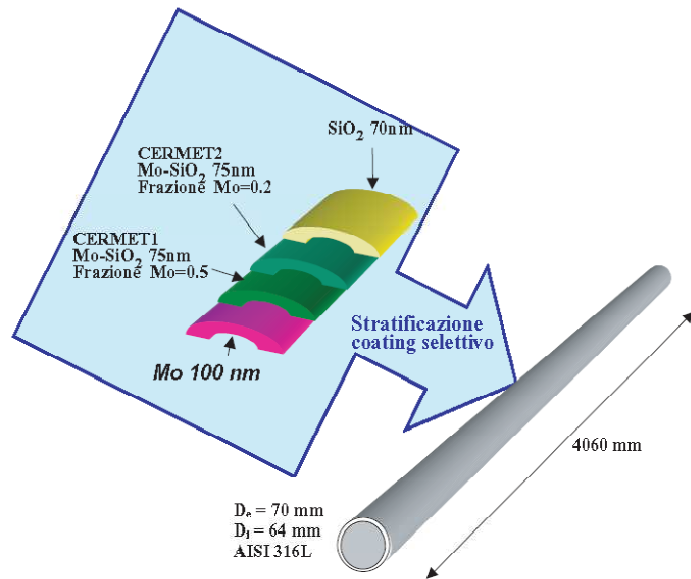
Piramidi inverse



Buche emisferiche

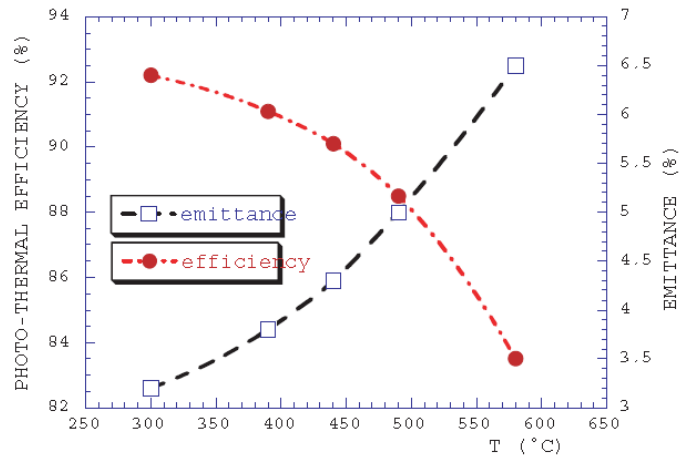


# PER MIGLIORARE L'ASSORBIMENTO DEL RICEVITORE (solare termodinamico)

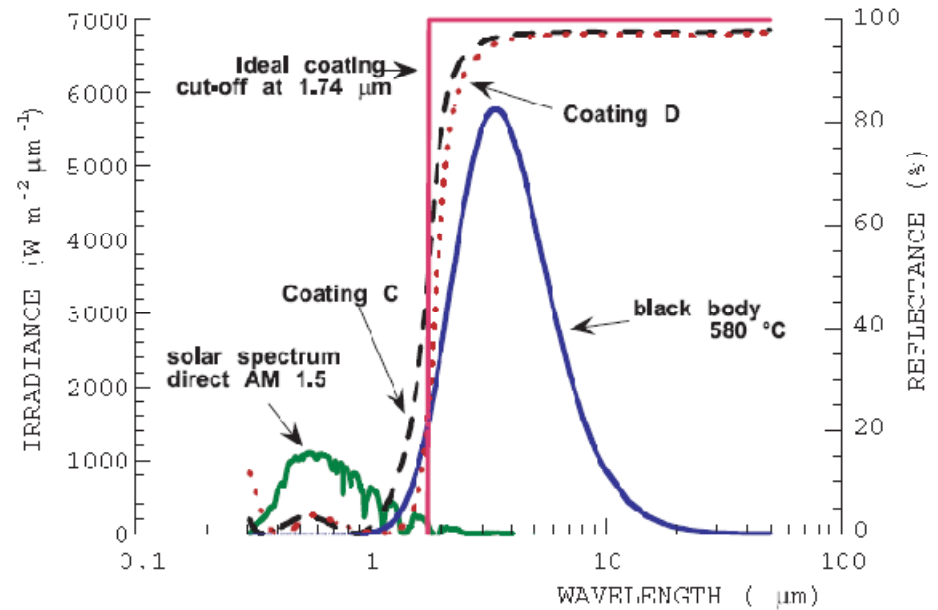


Il tubo ricevitore (T=300-580°C)

## Struttura del rivestimento selettivo



Efficienza di conversione foto-termica > 80%



Spettri di riflettanza di rivestimenti selettivi



## COME CONCENTRIAMO LA LUCE (di solito ...)?

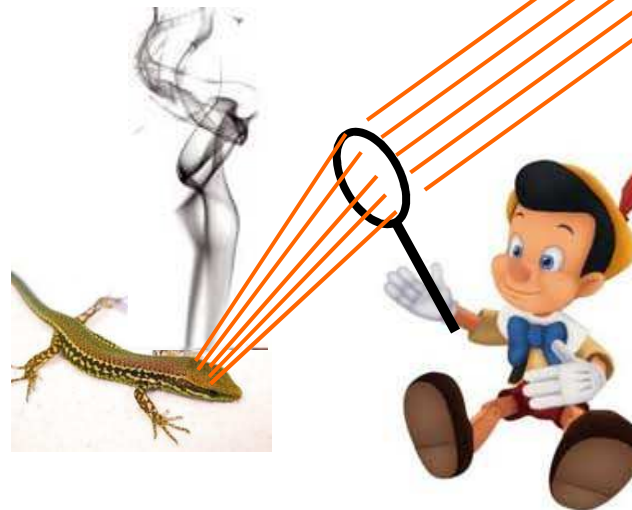
Attraverso specchi ...



Specchio delle mie brame ...

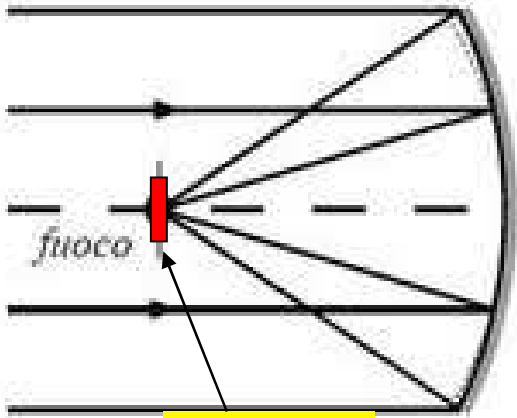
oppure

Attraverso lenti ...



# CONCENTRATORI A SPECCHIO (RIFLETTIVI)

## Concentratore parabolico



“imaging”  
(con immagine)



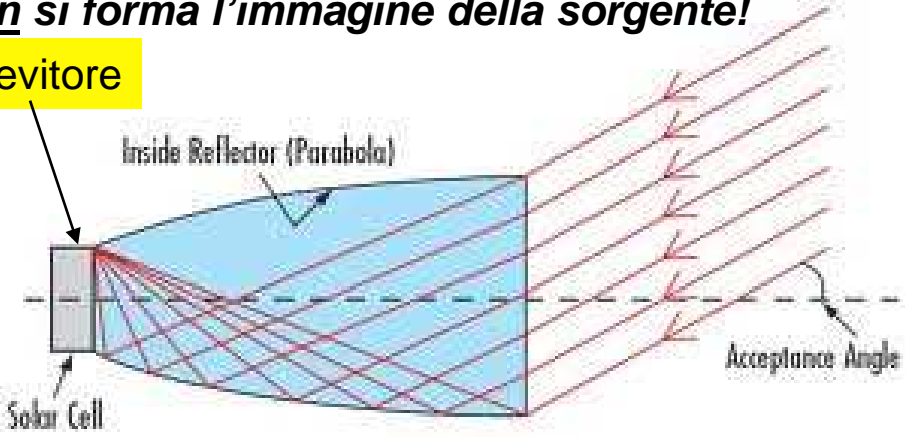
ricevitore

*Qui si forma l'immagine della sorgente!*

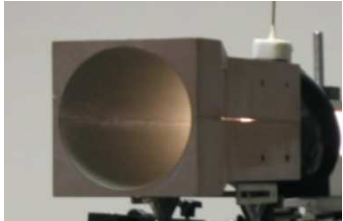
## Concentratore parabolico composto (CPC)

*Qui non si forma l'immagine della sorgente!*

ricevitore

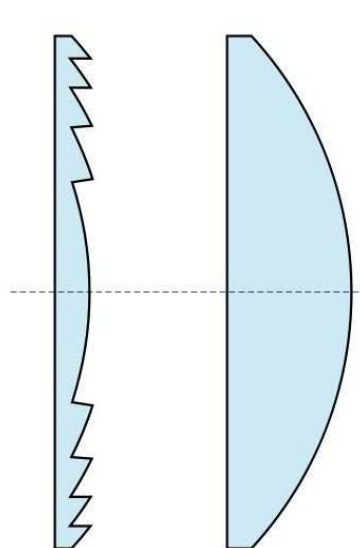
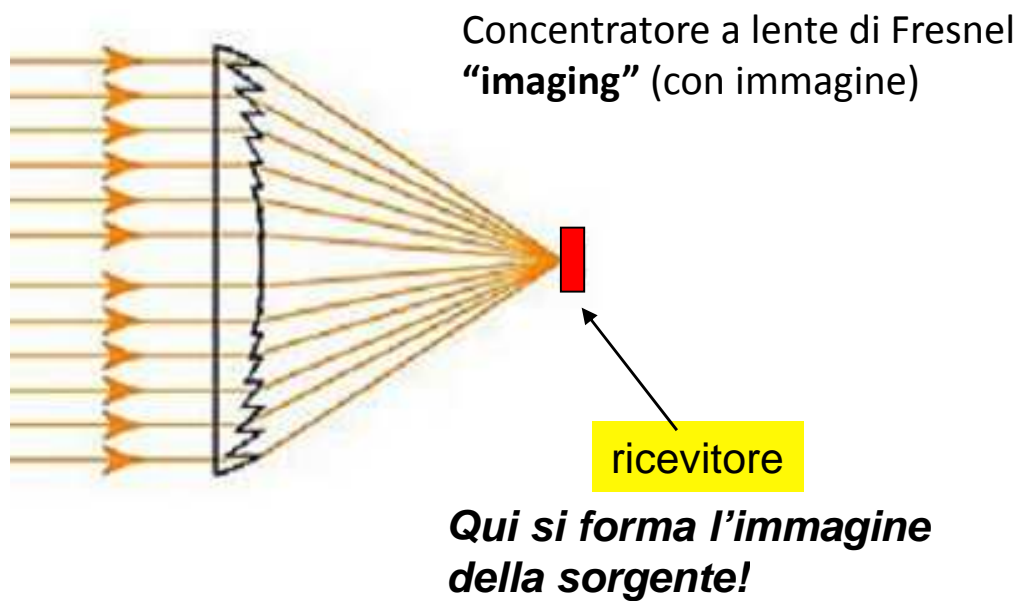


“nonimaging” (senza immagine)

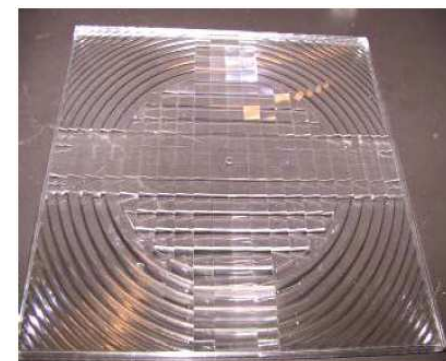
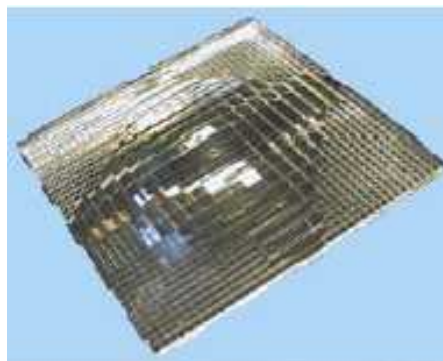


Roland Winston

## CONCENTRATORI ALENTE (RIFRATTIVI)

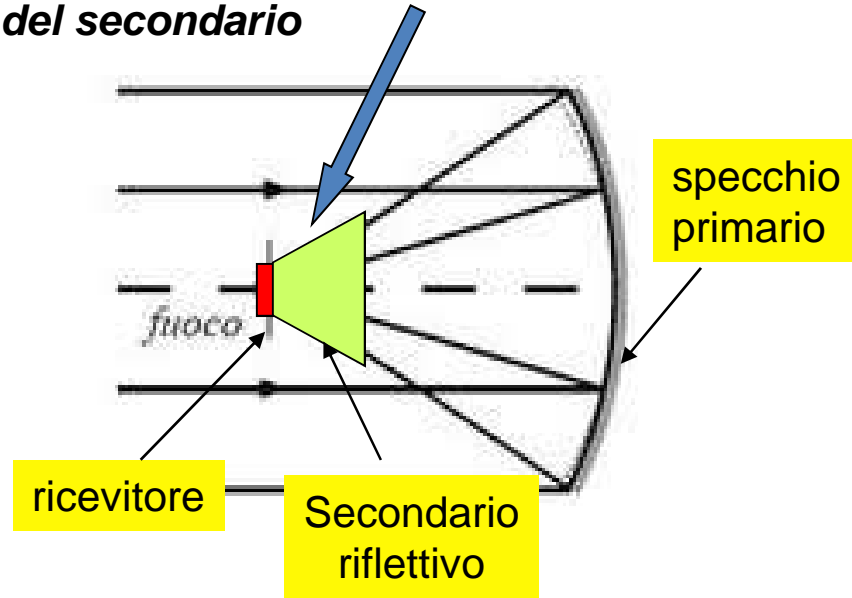


Augustin Jean Fresnel  
(1788 – 1827)



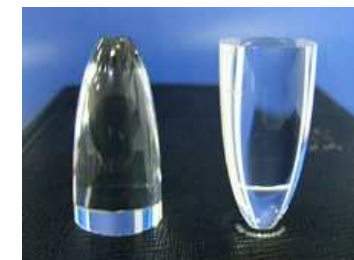
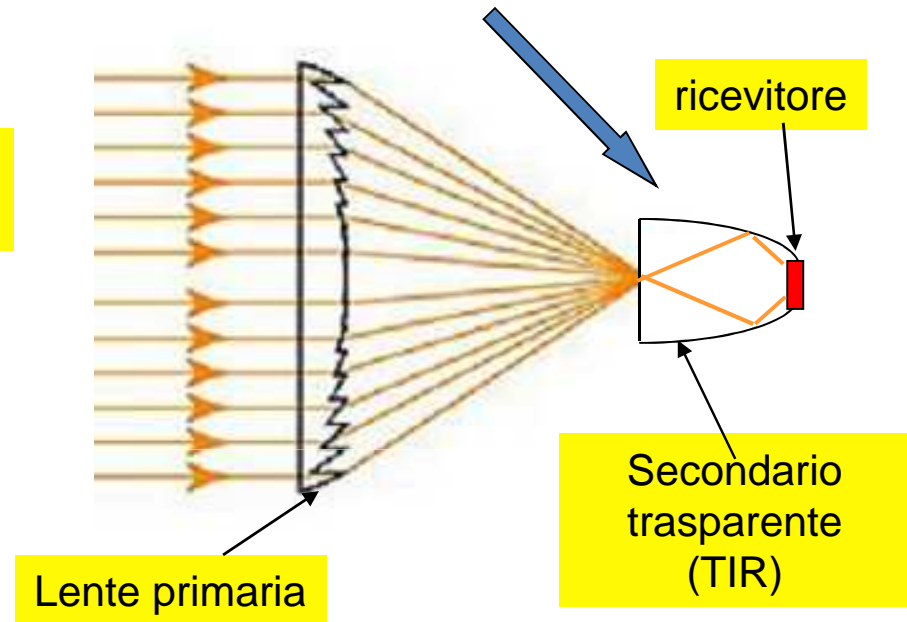
# CONCENTRATORI CON SECONDARIO

*La luce è riflessa sulla parete interna del secondario*



SOE

*La luce è riflessa all'interno del vetro*

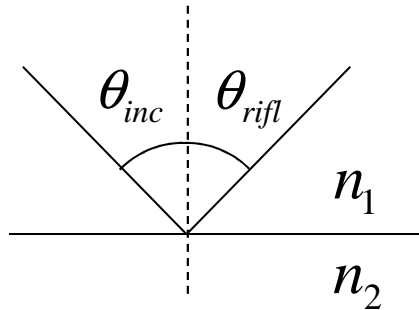


CPC dielettrici

# COSA C'E' DA SAPERE ?

Nella **riflessione** l'angolo d'incidenza è uguale all'angolo di riflessione:

$$\theta_{inc} = \theta_{rifl}$$



$$n = \frac{c}{v}$$



Snell (Willebrord Snel van Royen)  
(1580 – 1626)

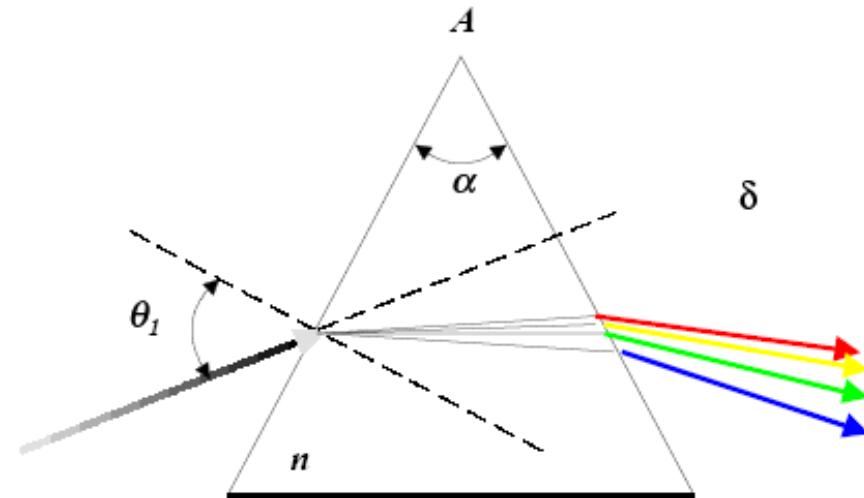
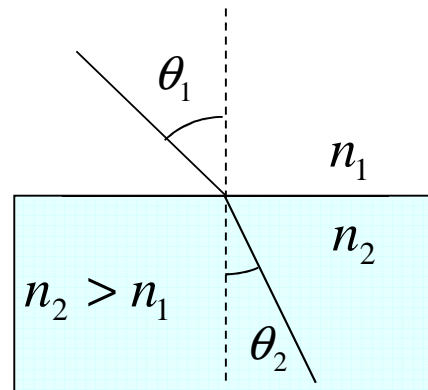
Nella **rifrazione** l'angolo d'incidenza è legato all'angolo di rifrazione dalla **legge di Snell**:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

In aria



$$n_1 = 1$$



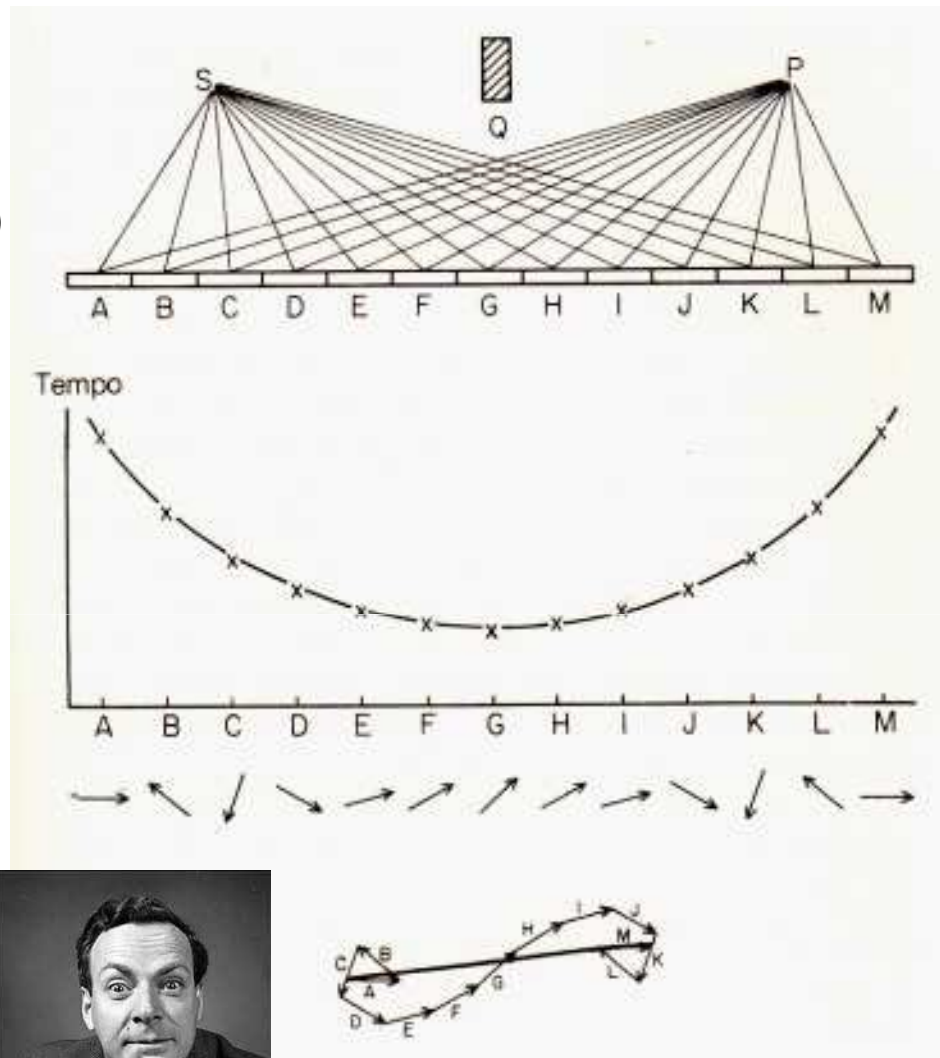
$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = n_2$$

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin[\theta_2(\lambda)]} = n_2(\lambda)$$

La rifrangibilità di un raggio di luce è funzione della lunghezza d'onda. Ciò è messo bene in evidenza in un prisma.

## A PROPOSITO DELLA RIFLESSIONE ...

a)



Richard P. Feynman  
(1918 – 1988)

La legge più semplice dell'ottica, ovvero che l'angolo di riflessione sia uguale all'angolo d'incidenza, non è poi un risultato tanto banale.

Feynman, nella sua QED (Quantum Electrodynamics) dimostra che è diversa da zero l'ampiezza di probabilità che un fotone percorra la traiettoria strana SAP o SBP (vedi fig. a), cioè che non sia rispettata la legge della riflessione. Il fatto è che le ampiezze di probabilità interferiscono tra loro come le onde, e si dà il caso che la maggior parte dei percorsi più spostati a sinistra oppure a destra del punto intermedio G interferiscano per dare come risultante un'ampiezza quasi nulla. Di fatto, i percorsi del fotone in cui le ampiezze di probabilità si combinano per dare un risultato diverso da zero sono solo quelli che passano in prossimità del punto centrale G, ovvero: SEP, SFP, SGP, SHP, SIP.

Per chi vuole approfondire si consiglia la lettura del libro:

***R.P. Feynman, "QED, La strana teoria della luce e della materia", Adelphi.***

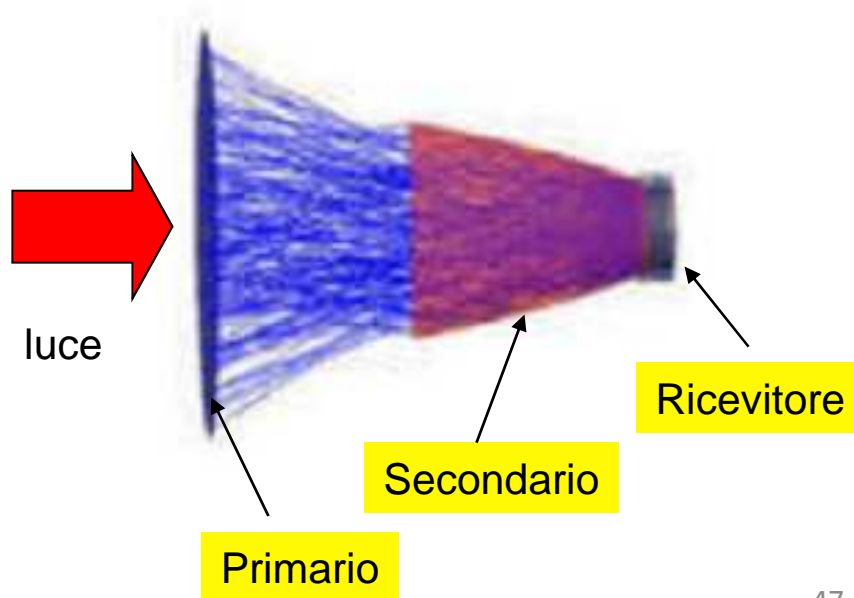
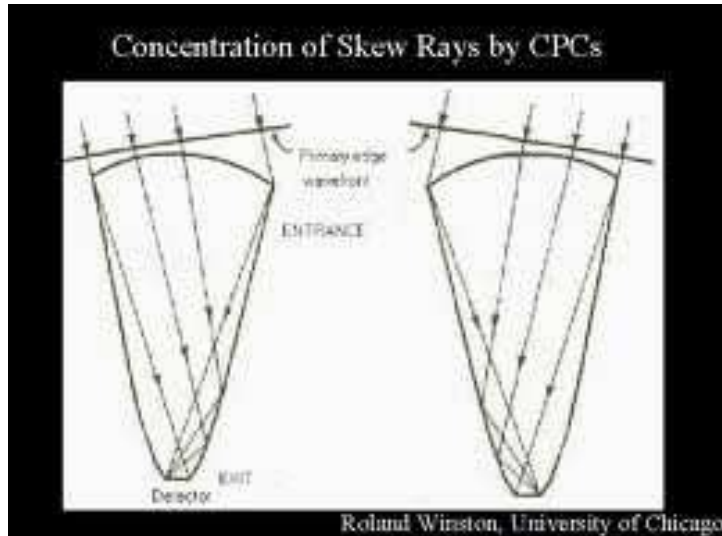
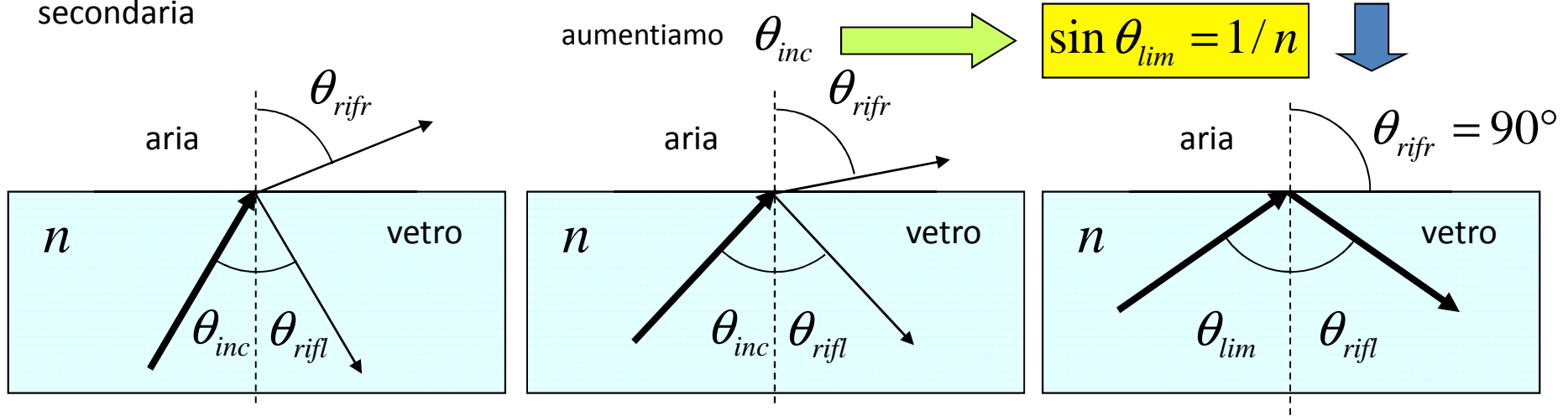
# COSA C'E' DA SAPERE ?

## Riflessione interna totale (TIR):

E' sfruttata generalmente nell'ottica secondaria

## TIR

Il raggio rifratto scompare e appare solo quello riflesso



## SPECCHI NATURALI E NON ...



Specchio delle mie brame ...



Superficie d'acqua



Superficie di vetro



Specchio realizzato con amalgama di stagno



## FORMULE PER LA RIFLESSIONE

**Le equazioni di Fresnel** ci danno le intensità delle varie componenti riflesse e rifratte della luce.  
In particolare, per la riflessione abbiamo:



Augustin Jean Fresnel  
(1788 – 1827)

Nei dielettrici:

$$n = c / v$$

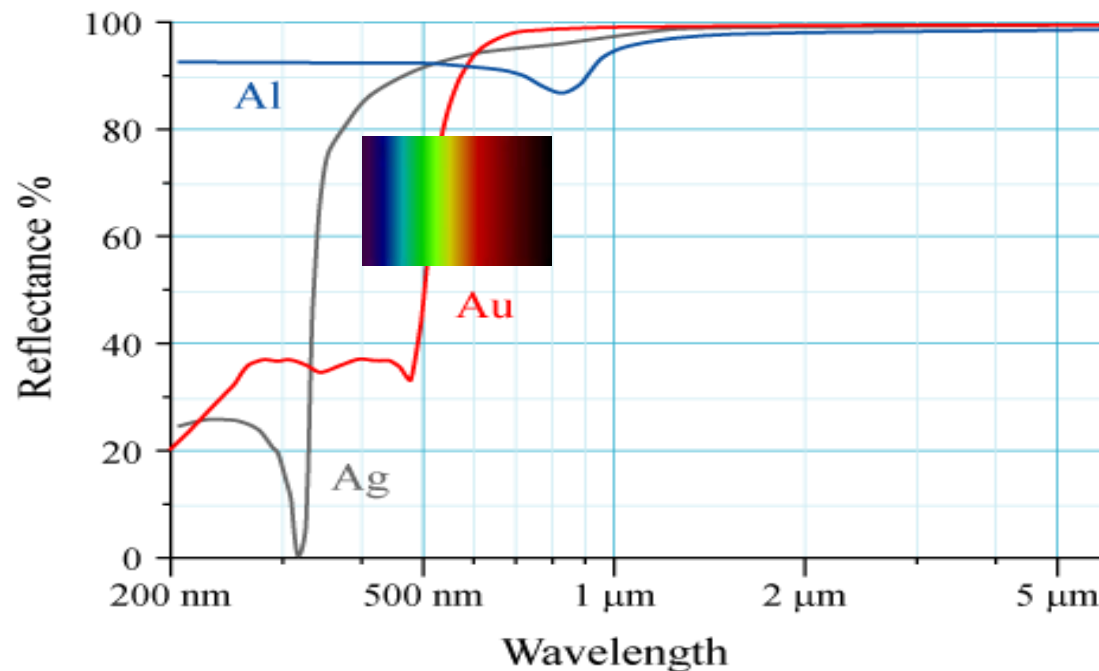
$$R = \left[ \frac{n - 1}{n + 1} \right]^2$$

Acqua ( $n=1.33$ )  $\rightarrow R \approx 1.5\%$

Vetro ( $n \approx 1.5$ )  $\rightarrow R \approx 4\%$  (1 faccia)

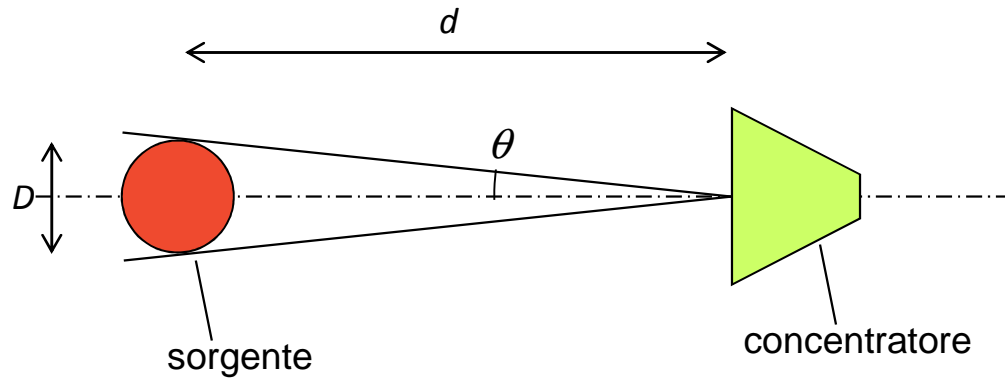
$\rightarrow R \approx 8\%$  (2 facce)

Nei metalli: le cose sono un po' più complicate. Riportiamo solo alcune curve di R:



PRINCIPI DELLA  
CONCENTRAZIONE  
SOLARE

# FORMULE PER IL RAPPORTO DI CONCENTRAZIONE



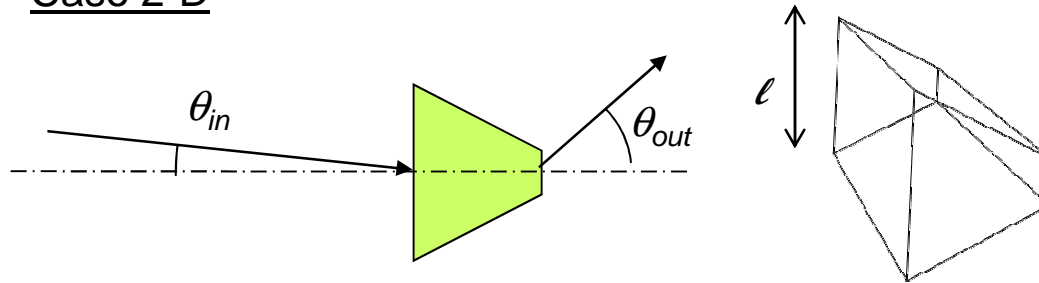
Divergenza angolare della luce:

$$\tan \theta = \frac{D}{2d}$$

Sole:

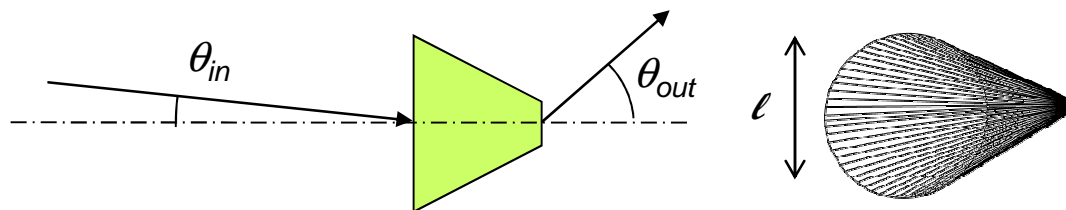
$$\theta = 0.27^\circ = 0.005 \text{ rd}$$

## Caso 2-D



$$l \cdot \sin \theta = \text{const}$$

## Caso 3-D



$$A \cdot \sin^2 \theta = \text{const}$$

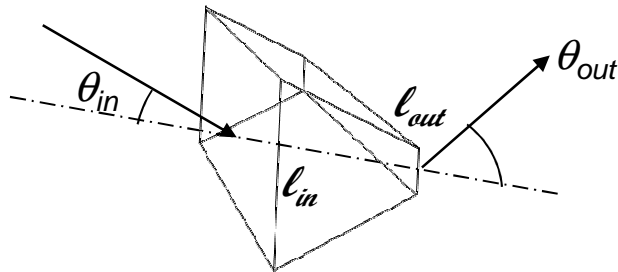
$$l^2 \approx A$$

**Concentratori in aria !**

## FORMULE PER IL RAPPORTO DI CONCENTRAZIONE

Caso 2-D

$$l \cdot \sin \theta = \text{const}$$



$$l_{in} \cdot \sin \theta_{in} = l_{out} \cdot \sin \theta_{out}$$

$$\frac{l_{in}}{l_{out}} = C^{2D} = \frac{\sin \theta_{out}}{\sin \theta_{in}}$$

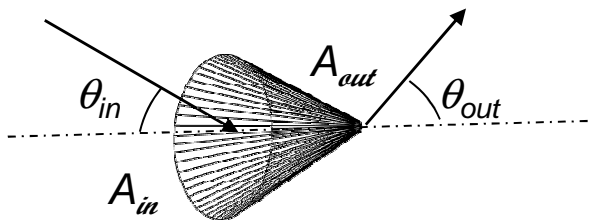
Sole:

$$C_{\max}^{2D} = \frac{l_{in}}{l_{out}} = \frac{1}{\sin \theta_{in}}$$

$$C_{\max}^{2D} \approx 200$$

Caso 3-D

$$A \cdot \sin^2 \theta = \text{const}$$



$$A_{in} \cdot \sin^2 \theta_{in} = A_{out} \cdot \sin^2 \theta_{out}$$

$$\frac{A_{in}}{A_{out}} = C^{3D} = \frac{\sin^2 \theta_{out}}{\sin^2 \theta_{in}}$$

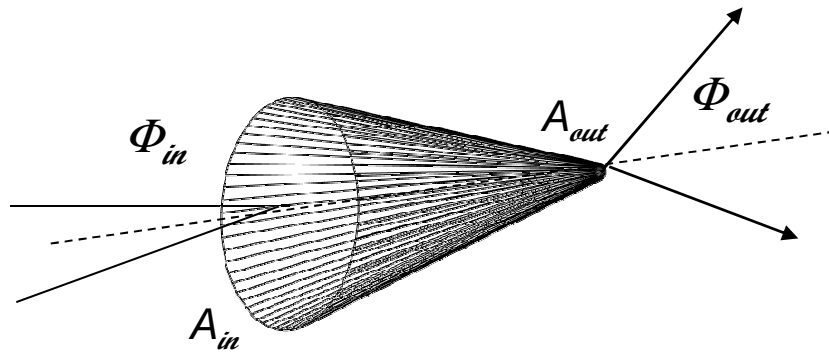
Sole:

$$C_{\max}^{3D} = \frac{A_{in}}{A_{out}} = \frac{1}{\sin^2 \theta_{in}}$$

$$C_{\max}^{3D} \approx 40\,000$$

**Concentratori in aria !**

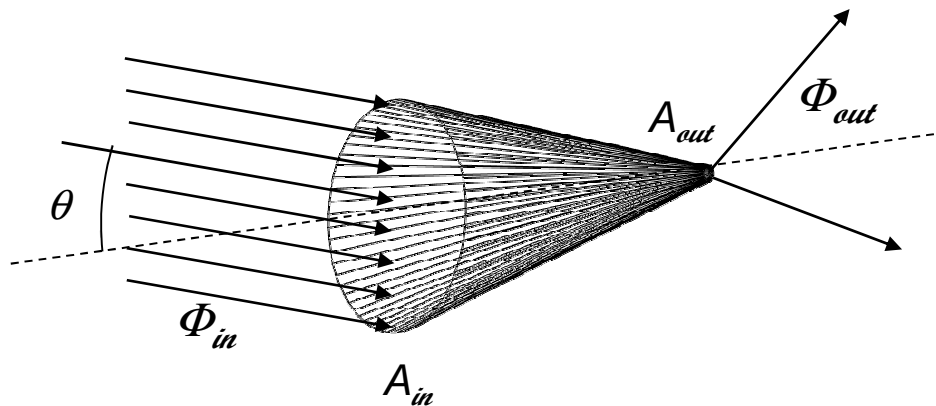
# EFFICIENZA OTTICA



$$\eta_{opt} = \frac{\Phi_{out}}{\Phi_{in}} \leq 1$$

L'efficienza ottica dipende dall'angolo d'incidenza del fascio !

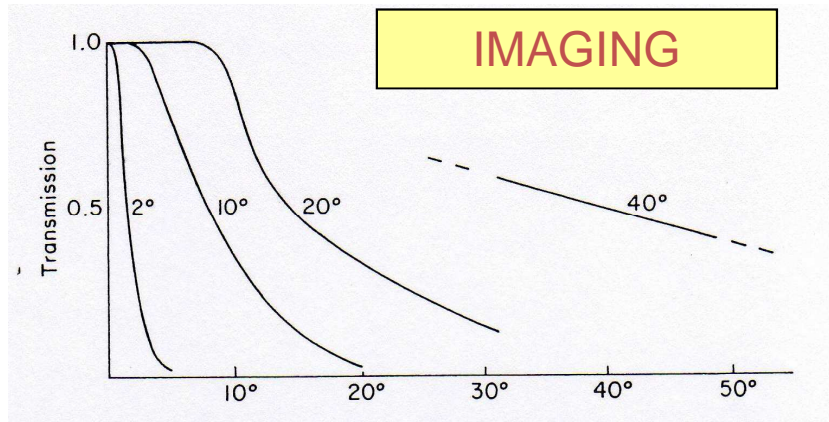
$$\eta_{opt} = \eta_{opt}(\theta)$$



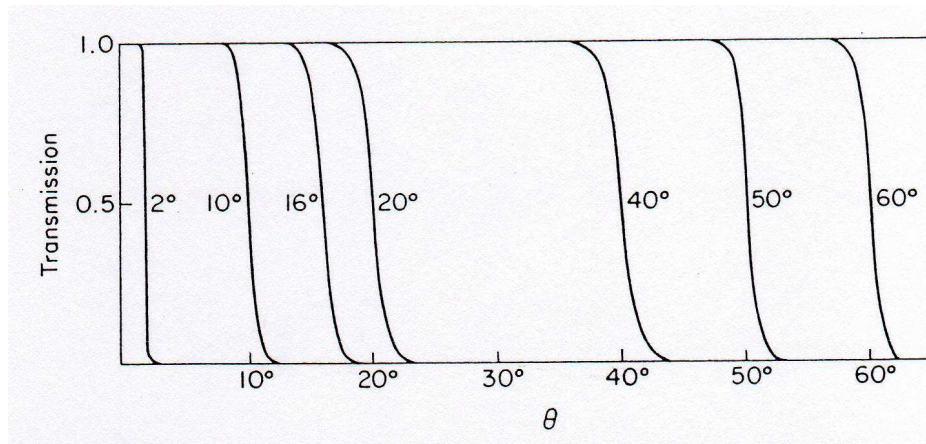
$$\eta_{opt} = \frac{\Phi_{out}(\theta)}{\Phi_{in}} = \eta_{opt}(\theta)$$

# EFFICIENZA OTTICA

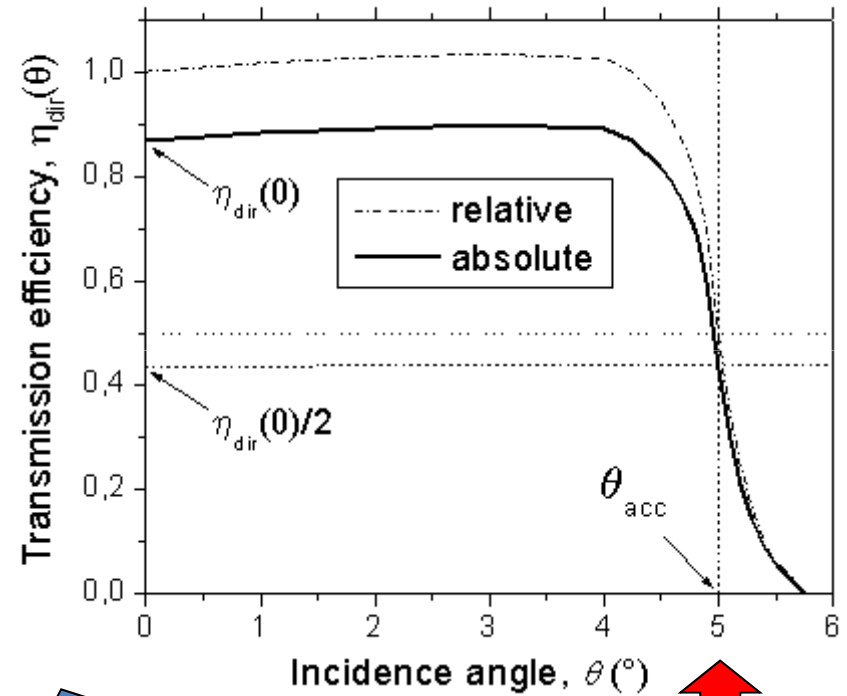
## Come si presenta la curva di efficienza ottica ?



**NONIMAGING**



## Curva tipica di un CPC 3-D



**Angolo di accettazione !**

L'OTTICA "SENZA IMMAGINE" (NIO)

E

I CONCENTRATORI CPC

"Inventore" dell'ottica  
"senza immagine" !

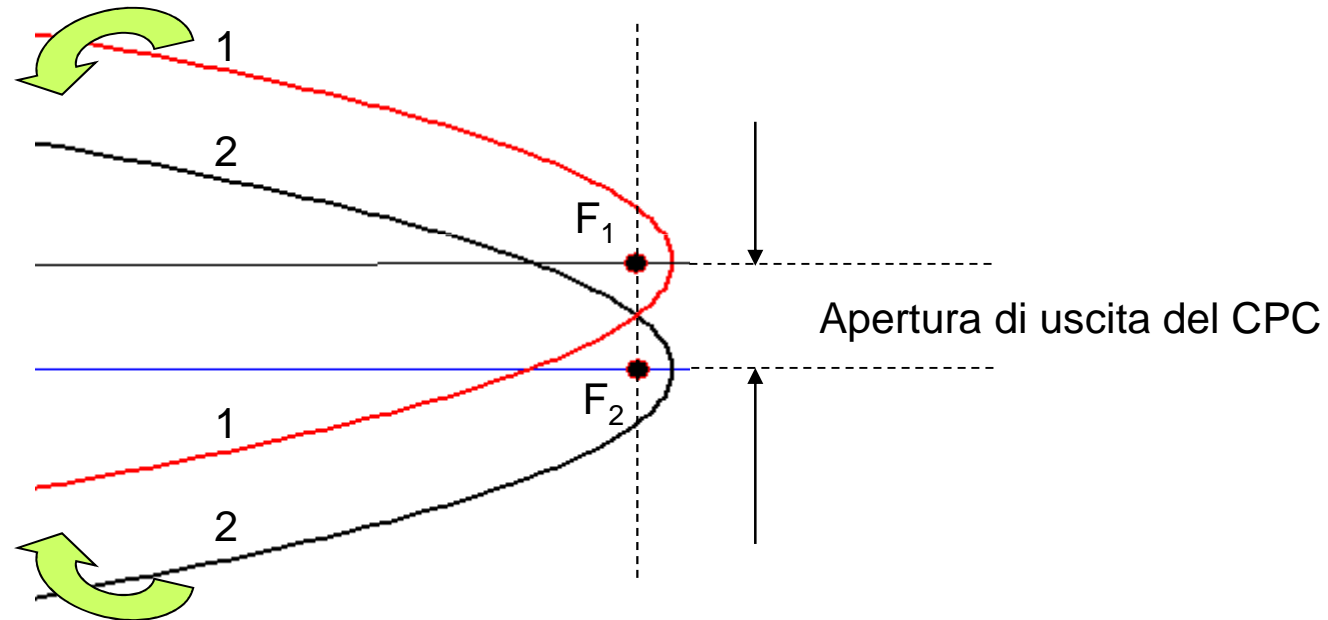


Roland Winston  
UC-Merced, California

# L'OTTICA SENZA IMMAGINE (NIO)

## Come si costruisce un CPC ?

Rotazione CCW dell'angolo di accettazione, con fulcro in  $F_1$



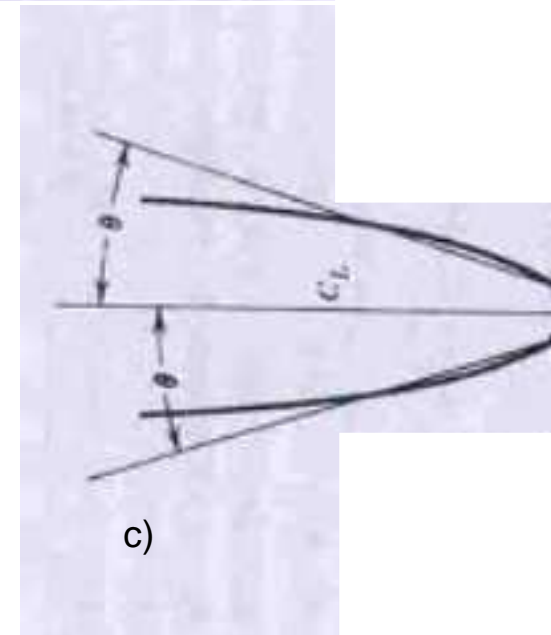
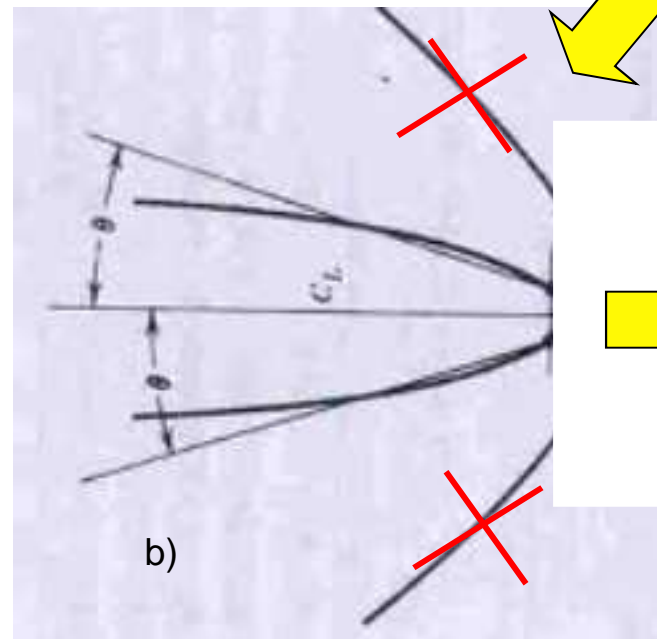
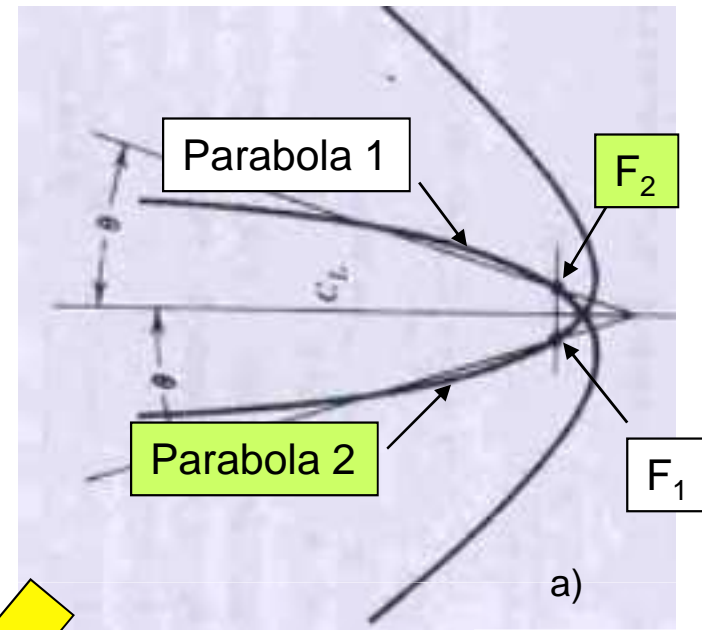
Rotazione CW dell'angolo di accettazione, con fulcro in  $F_2$



# L'OTTICA SENZA IMMAGINE (NIO)

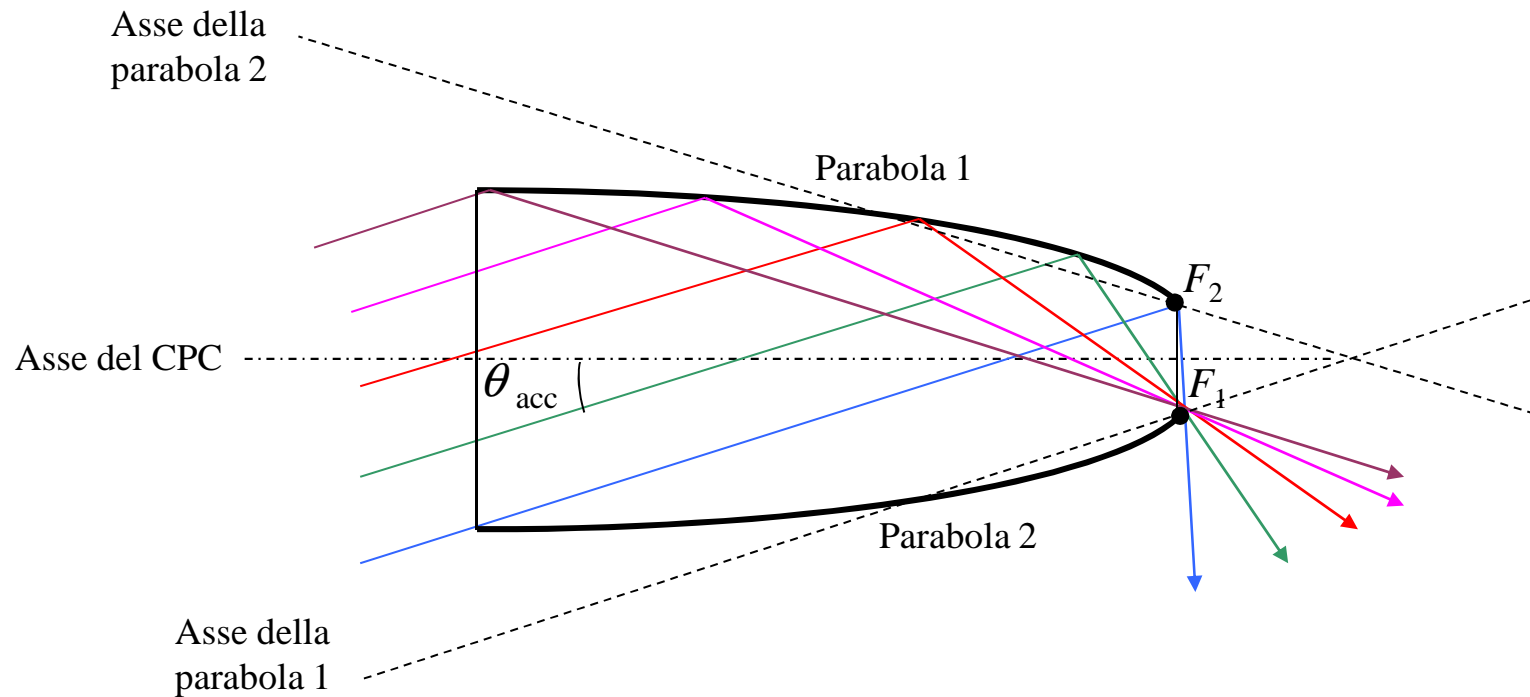
## Come si costruisce un CPC ?

- i) Si prendano due parabole affiancate con gli assi paralleli.
- ii) La distanza tra i fuochi si ponga uguale al diametro di uscita.
- iii) Si faccia fulcro sui due fuochi e si ruotino le parabole, una CW e una CCW, dell'angolo di accettazione desiderato. Situazione:
- iv) Si cancellino le curve al di là dei fuochi  
Il 2D-CPC è fatto !
- v) Se si ruotano i due rami di parabola attorno all'asse ottico, il 3D-CPC è fatto!



Per sapere qual è la lunghezza del CPC ideale ( $\theta_{out}=90^\circ$ ), andate a trovare il punto sulla parabola in c) in cui la tangente è parallela all'asse ottico del CPC. Quello è il punto sul bordo dell'apertura d'ingresso che delimita il concentratore.

## COME LAVORA UN CPC ?

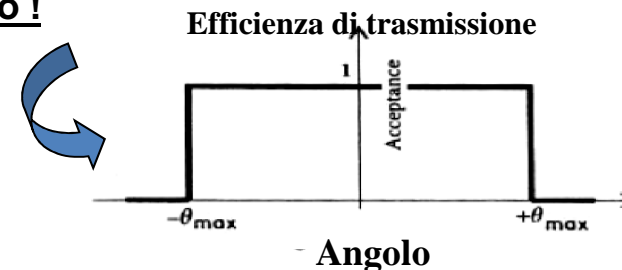


Un fascio incidente parallelo all'asse della parabola 1 convergerà nel fuoco  $F_1$ , sul bordo dell'apertura di uscita.

L'angolo di questo fascio è l'angolo di accettazione del CPC ( $\theta_{acc}$ ). Infatti, se aumentiamo quest'angolo, i raggi incontreranno la parete del CPC e verranno rimandati indietro.

Se invece diminuiamo quest'angolo, tutti i raggi passeranno !

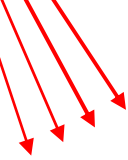
Quindi, il CPC è in grado di trasmettere tutti i raggi al di sotto di  $\theta_{acc}$ , mentre respinge indietro tutti i raggi al di sopra di  $\theta_{acc}$ . **La sua risposta è a gradino !**



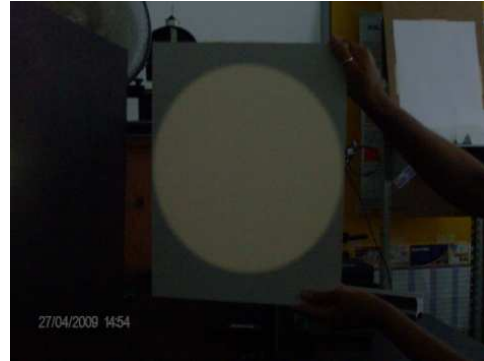
COME SI CARATTERIZZA

UN CONCENTRATORE

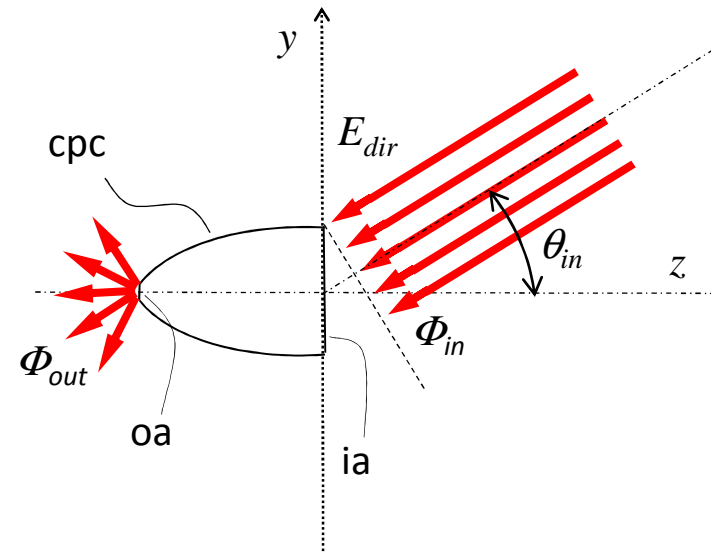
**Sorgente lambertiana**



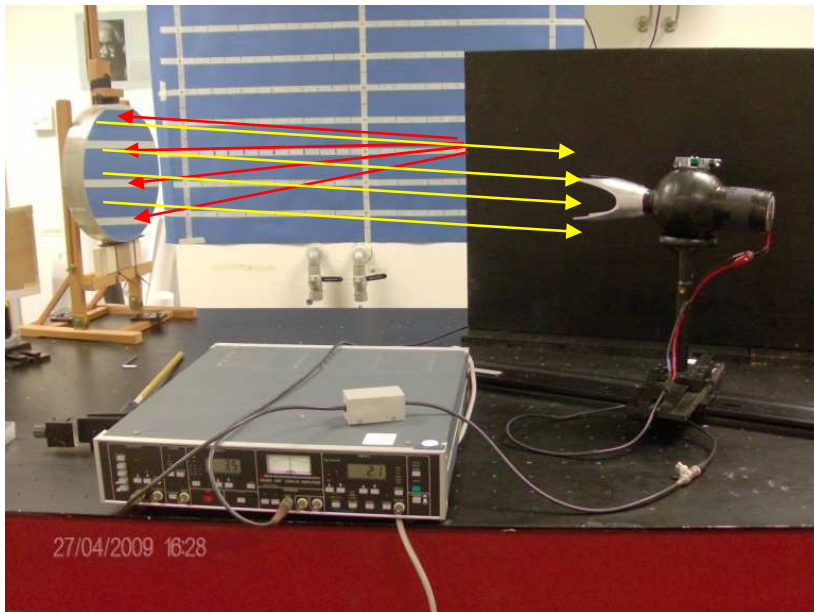
**METODO DIRETTO**



**Immagine del fascio collimato**



**Schema di principio del metodo diretto**



**Il fascio collimato è inviato al concentratore**

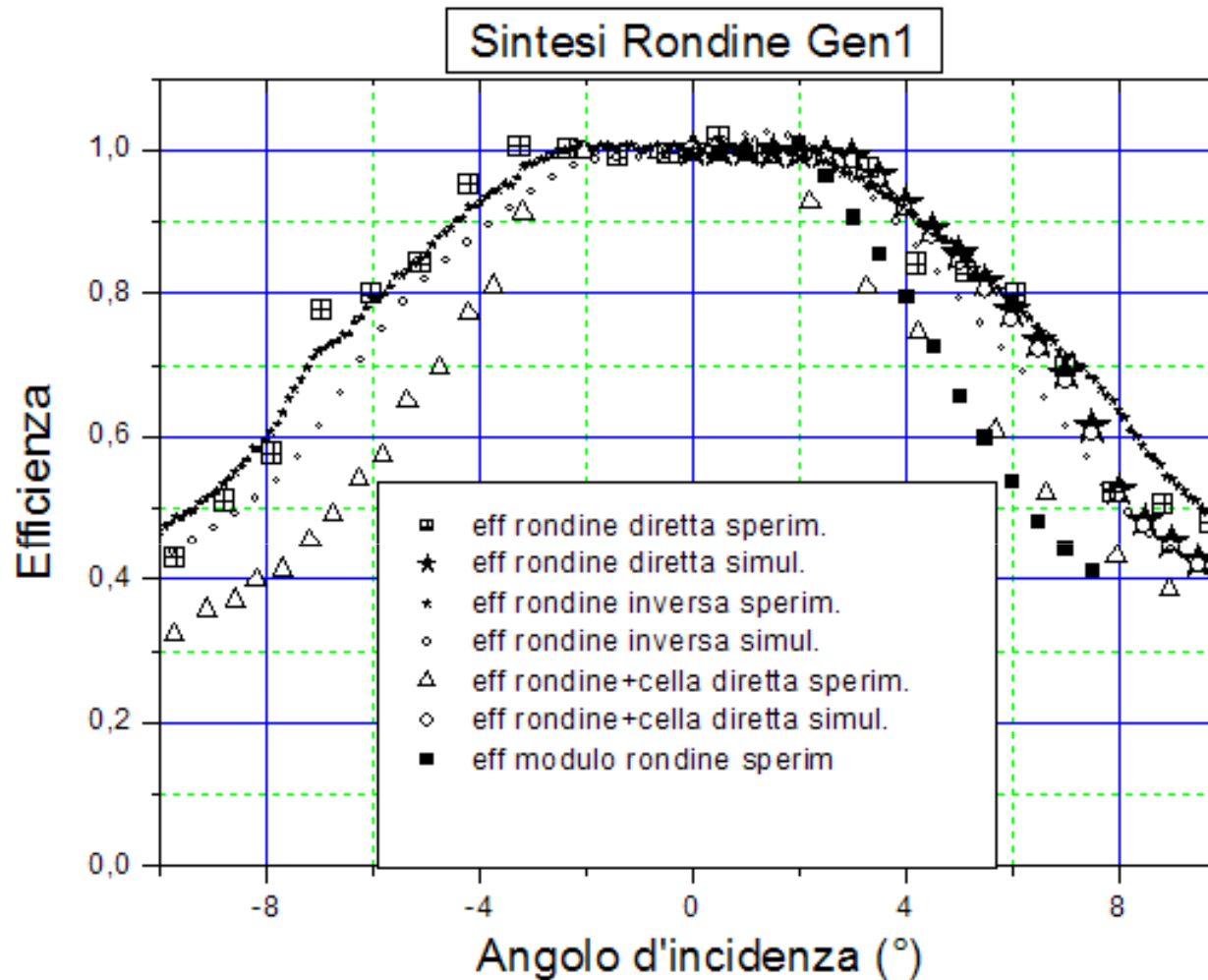


**Rondine Gen1 accoppiato con una sfera integratrice per la misura del flusso trasmesso**



**Rondine Gen1 accoppiato con una cella solare per la misura del flusso trasmesso**

## METODO DIRETTO - RISULTATI

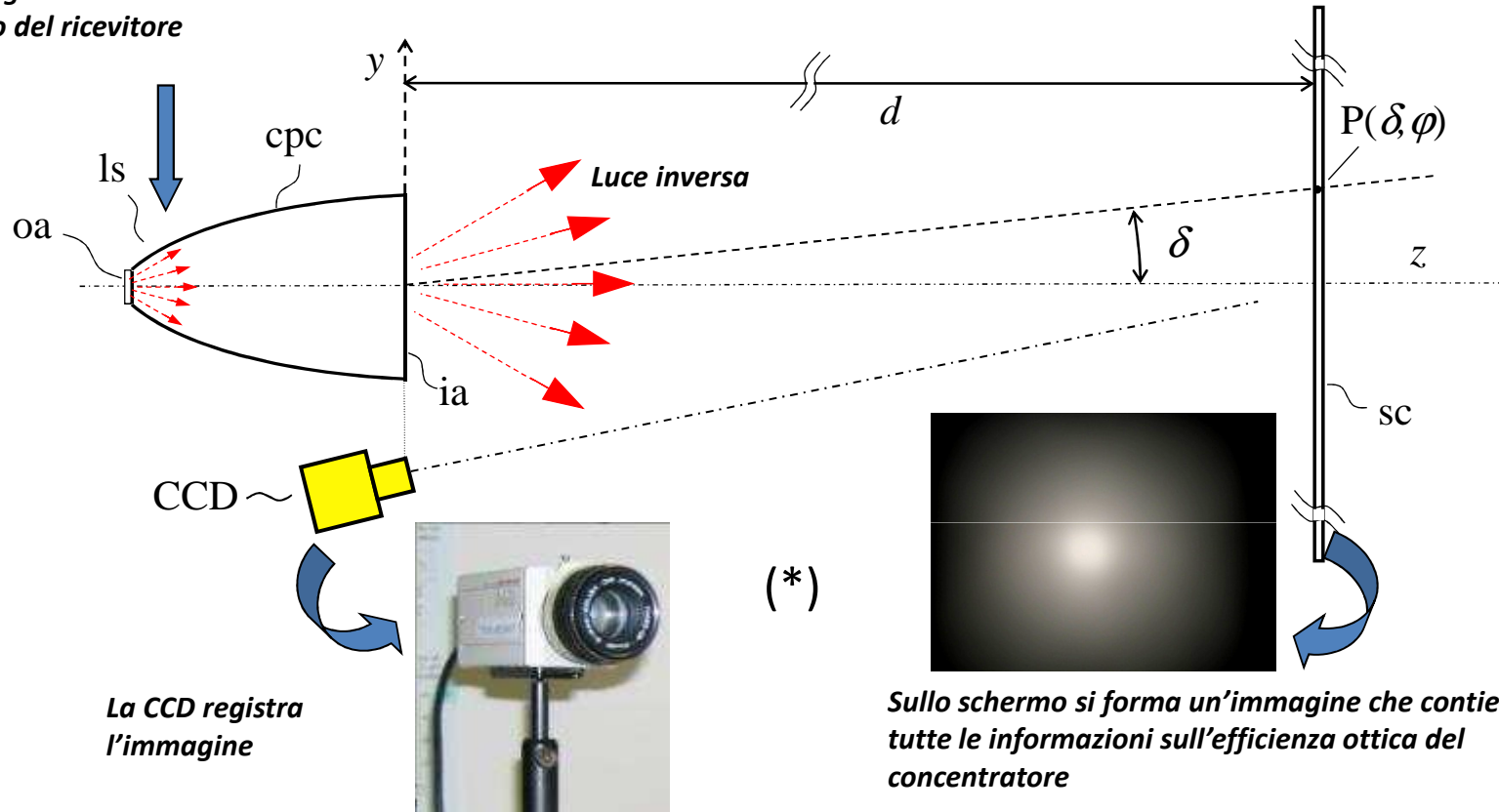


**Il metodo “diretto” richiede troppe misure, troppo tempo, un apparato costoso, e inoltre non fornisce tutti i possibili dati.**

# METODO INVERSO (\*)

Se il raggio rifratto è rinviato direttamente al punto di incidenza, esso sarà rifratto verso la linea descritta prima dal raggio incidente (I. Newton)

Una sorgente lambertiana è messa al posto del ricevitore



$$L_{rel}(\delta, \varphi) = E_{rel}(\delta, \varphi) \cdot \frac{1}{\cos^4 \delta} = \eta_{rel}(\delta, \varphi)$$

$\delta$  angolo polare  
 $\varphi$  angolo azimutale

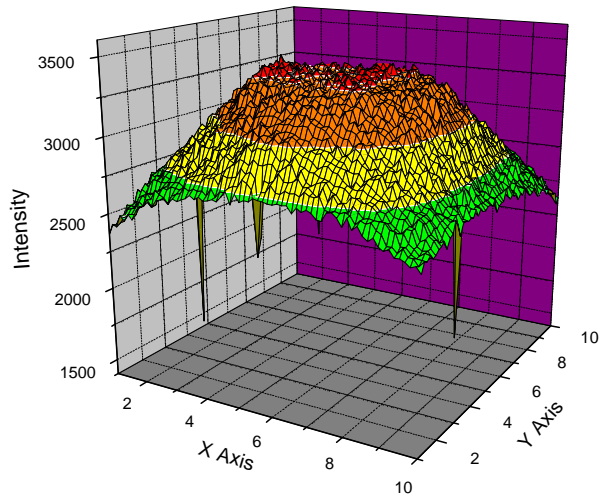
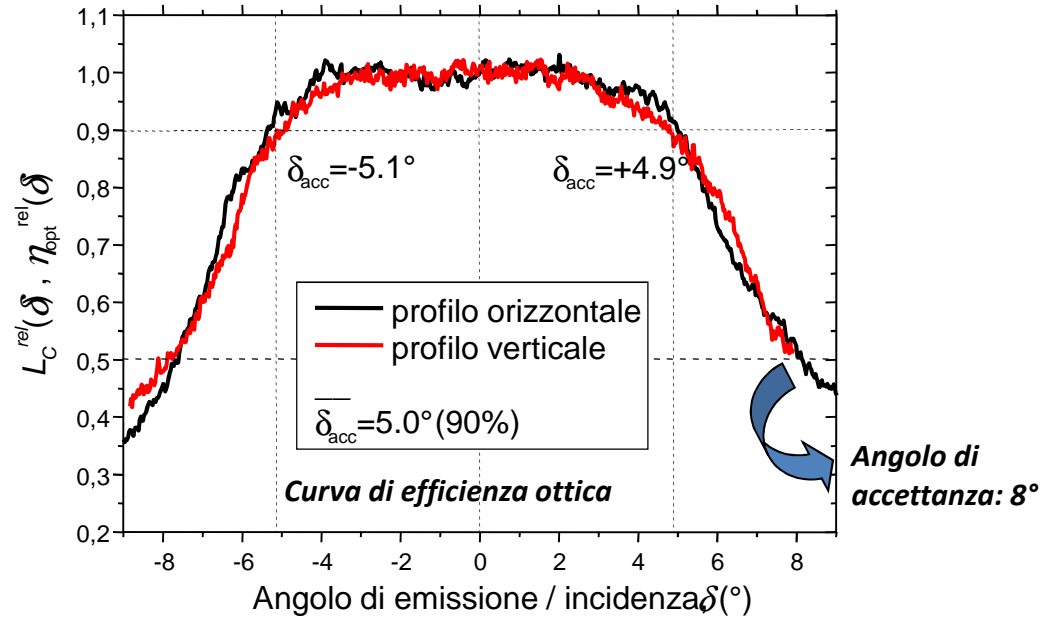
La radianza  $L$  del concentratore si ottiene dall'irradianza  $E$  misurata dall'immagine sullo schermo. La radianza  $L$  del concentratore ha lo stesso profilo dell'efficienza ottica  $\eta$ .

(\*) A. Parretta et al., "Optical efficiency of solar concentrators by a reverse ...", *Optics Letters*, **33** (2008) 2044-2046.  
 A. Parretta, "Optics of Solar Concentrators", *Applied Optics*, in press.

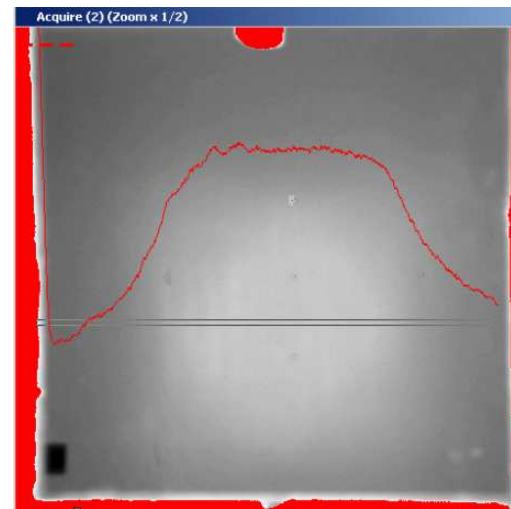
## METODO INVERSO - RISULTATI



“Rondine” Gen2 3D-CPC



Mapa dell'intensità



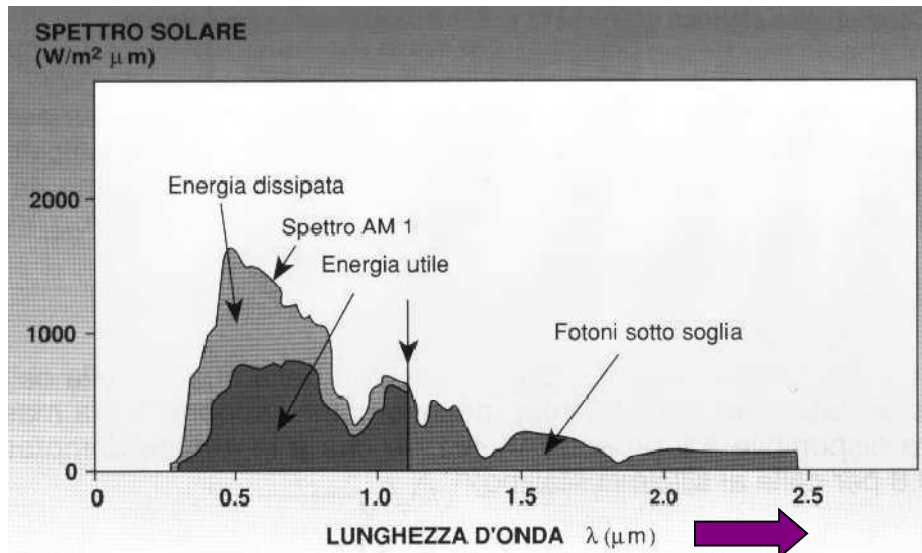
Dall'immagine sullo schermo si ricava un qualsiasi profilo ...

... che poi si elabora per ottenere la curva di efficienza ottica ...

CONCENTRATORI SOLARI  
FOTOVOLTAICI  
CON “SPLITTAMENTO SPETTRALE”

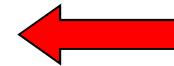


# PERCHE' LO SPLITTAMENTO SPETTRALE DELLA LUCE

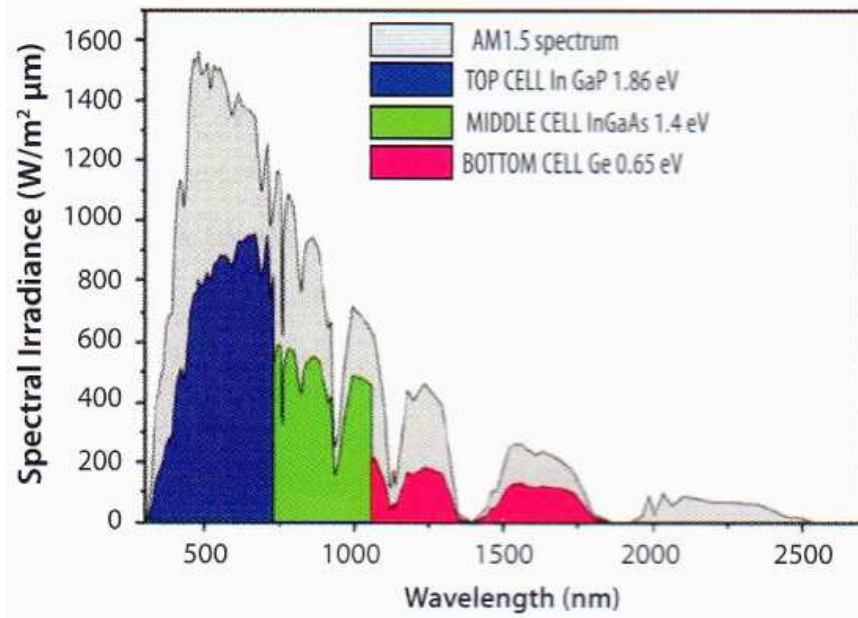


← Energia dei fotoni →

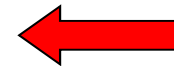
**Nessuno  
splittamento  
spettrale**



*Cella solare ad omogiunzione  
di Silicio cristallino:  
Efficienza max teorica ~ 30%  
Efficienza max sperimentale ~ 25%*



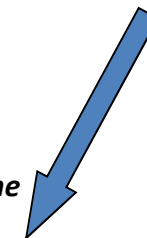
**Splittamento  
spettrale**



*Cella solare multigiunzione*

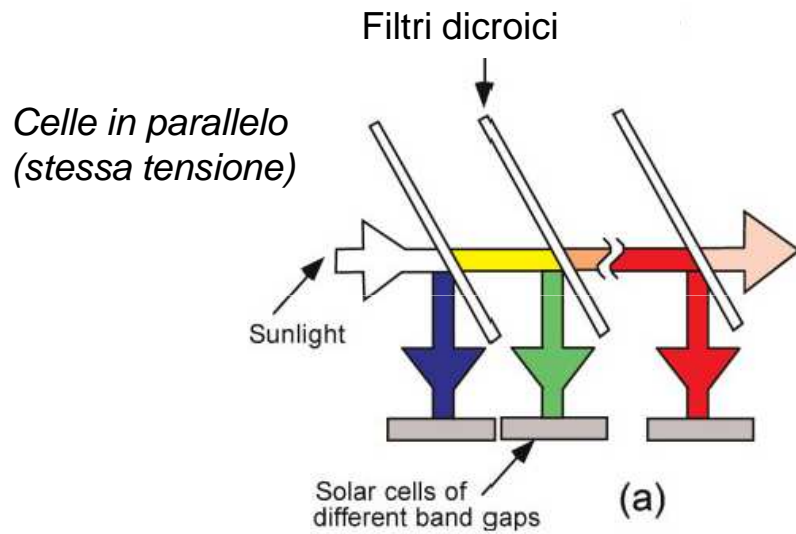
*Efficienza max teorica ~ 87%  
Efficienza max sperimentale  
(tre giunzioni) ~ 42%*

**Efficienza  
limite per un  
numero  
illimitato di  
celle !!**

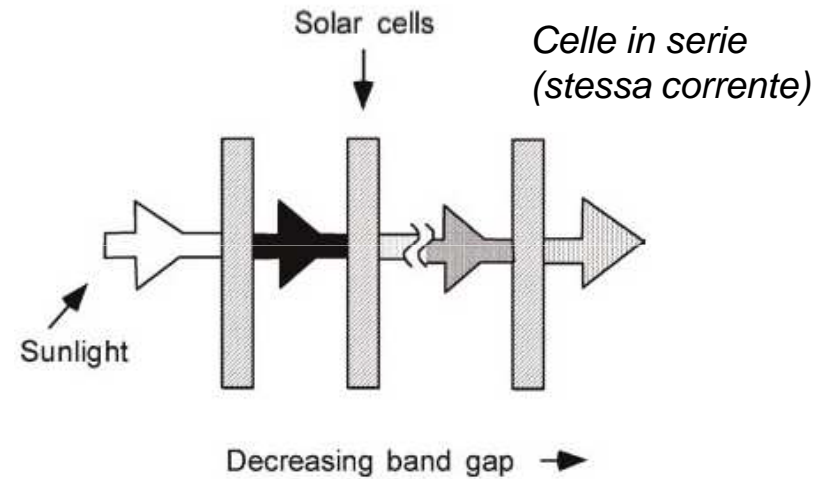


# LO SPLITTAMENTO SPETTRALE DELLA LUCE

## Splittamento spettrale



Splittamento dello spettro con filtri dicroici  
**Efficienza ~ 43%** (a concentrazione)



Pila di celle in serie (monolitiche o singole)  
**Efficienza ~ 40%** (a concentrazione)

# CONCENTRATORI SOLARI FV DICROICI

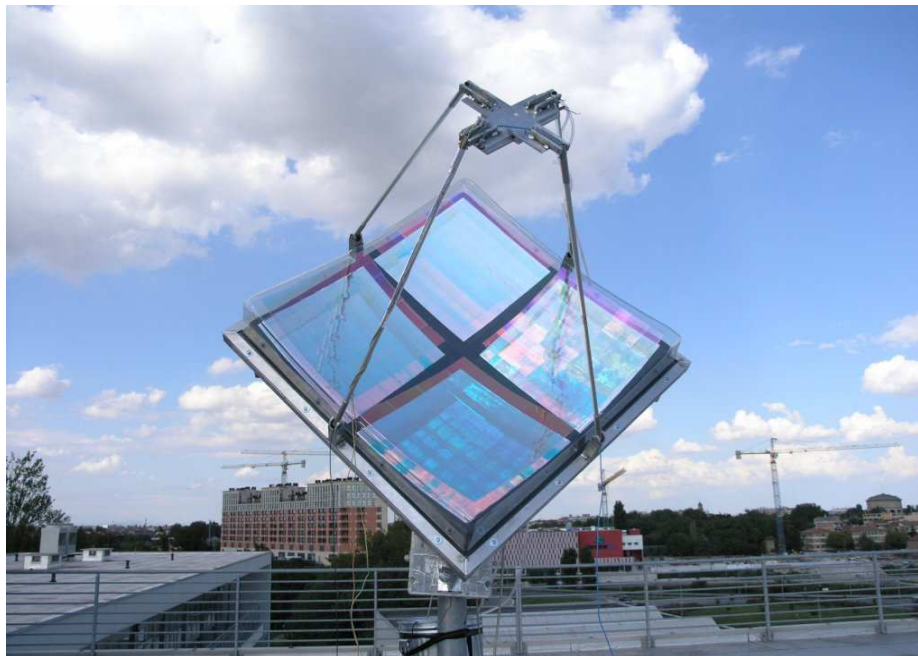


Due parabole fuori asse

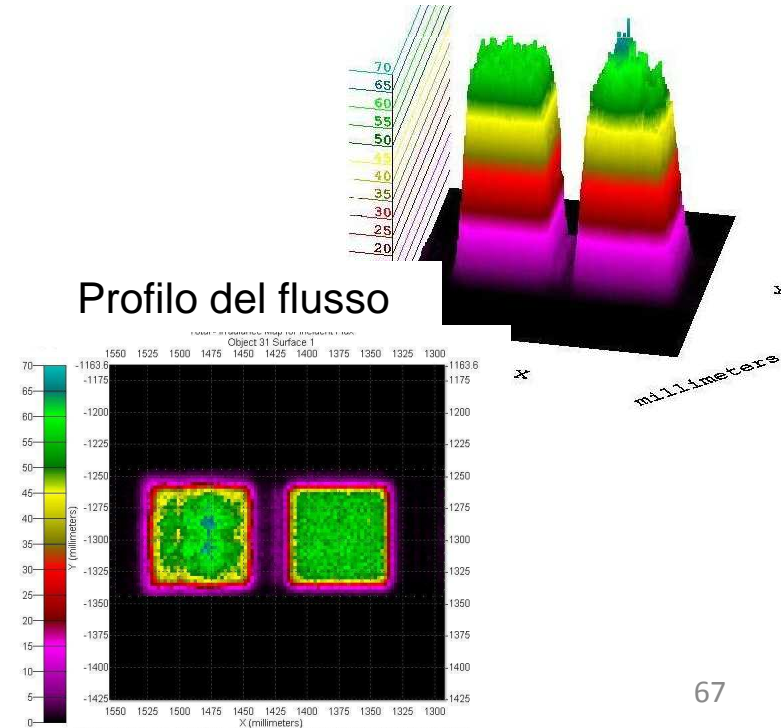
+



Due ricevitori FV

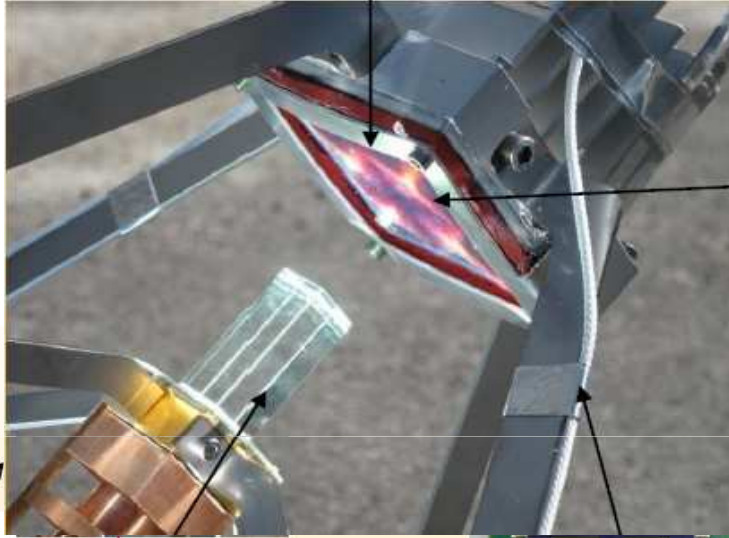


Impianto FV dicroico (Università di Ferrara)

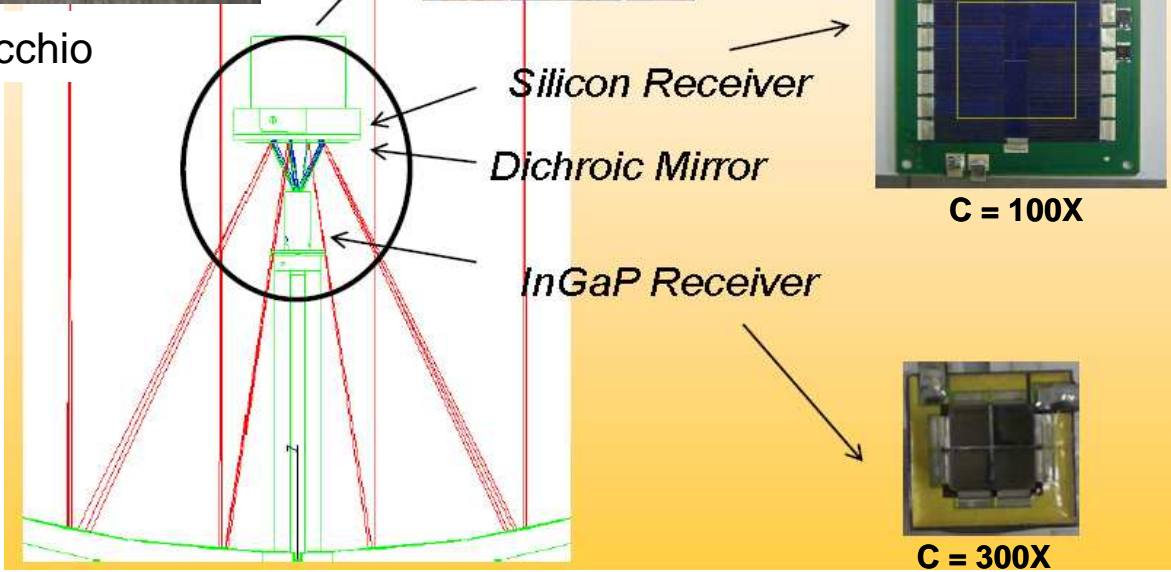


# CONCENTRATORE SOLARE

(Fotovoltaico 3-D a media concentrazione con SS)



Concentratore dicroico a specchio

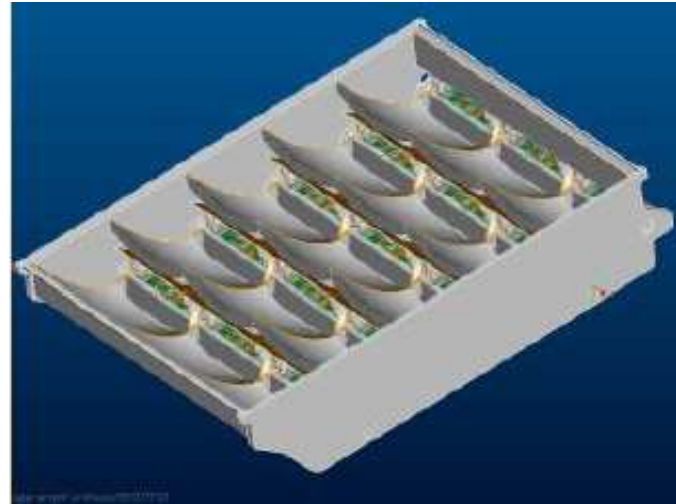


# CONCENTRATORE SOLARE

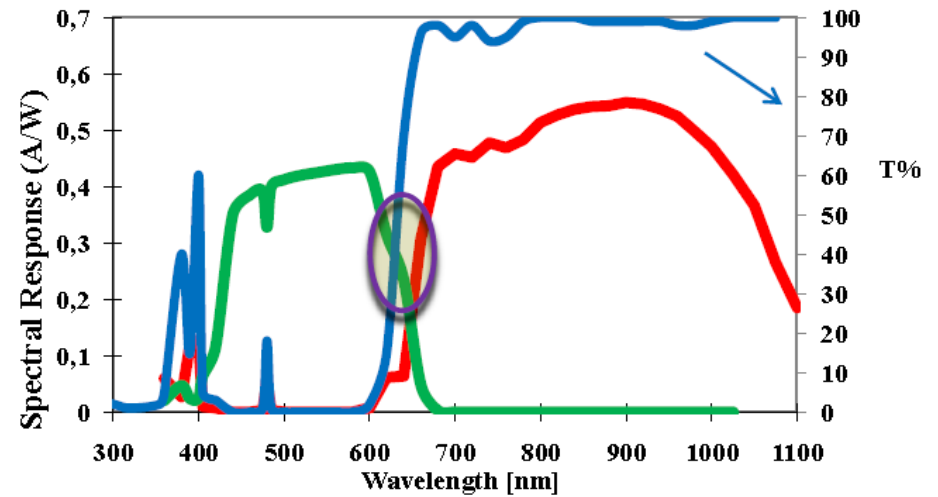
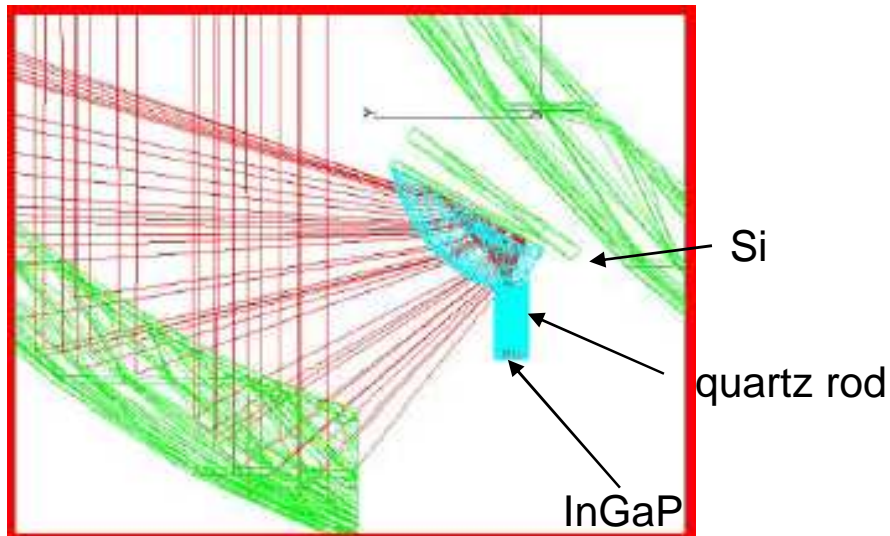
(Fotovoltaico 3-D a media concentrazione con SS)



Concentratore

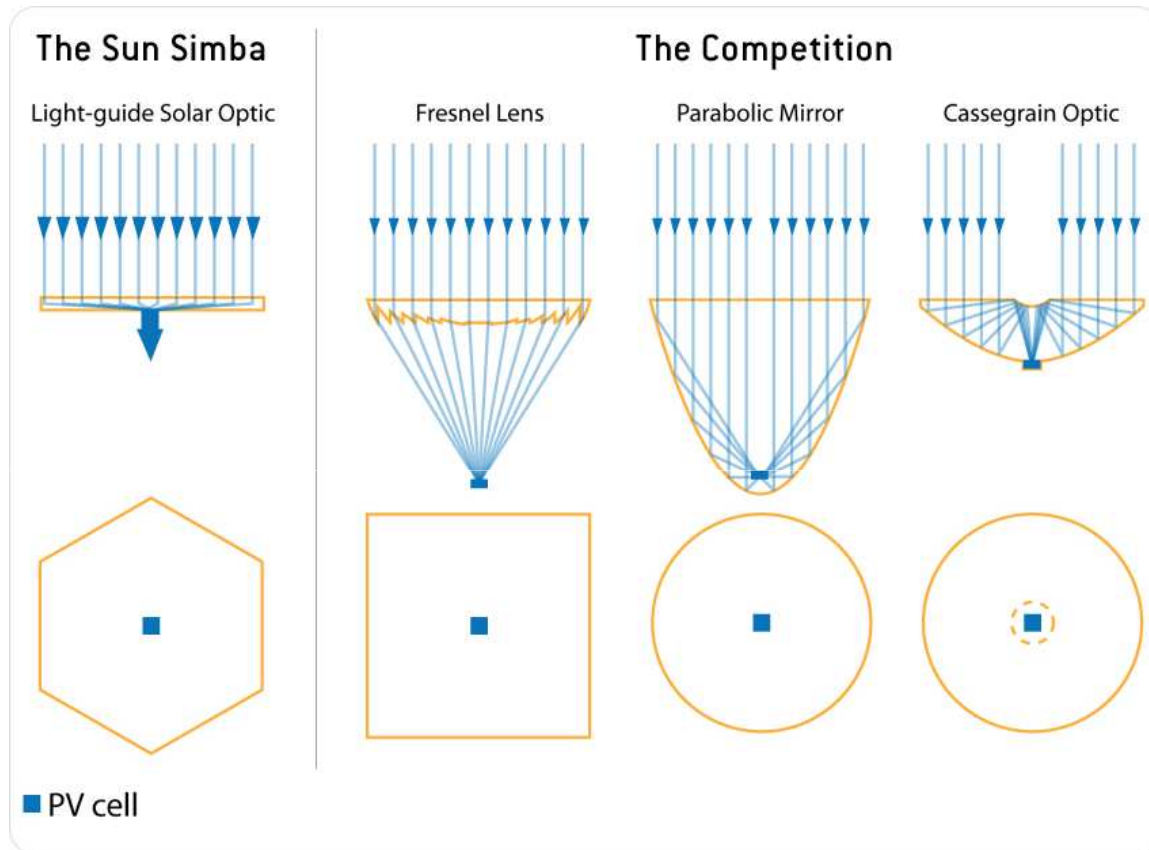


Piccoli moduli da 30 W  
Efficienza  $\approx$  20%



ALTRI MODI PER  
CONCENTRARE LA LUCE

# CONCENTRATORE SOLARE (Fotovoltaico 3-D a rifrattivo sottile)

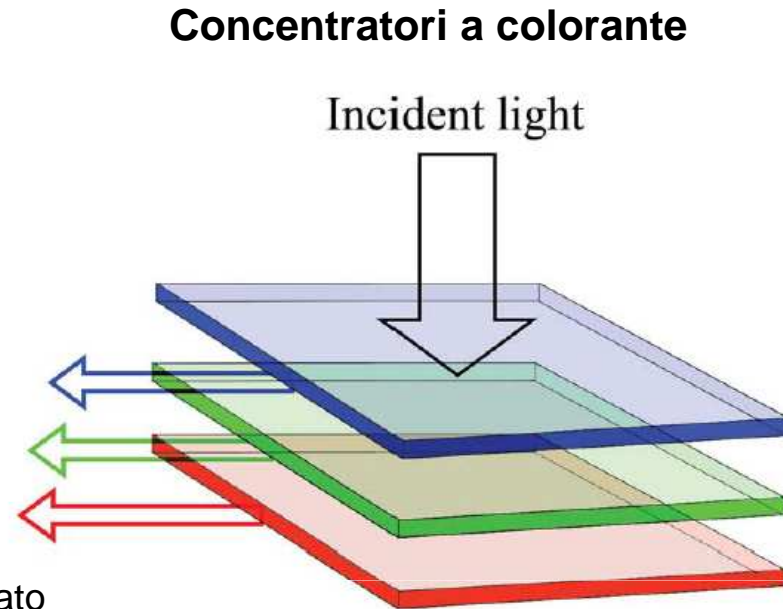
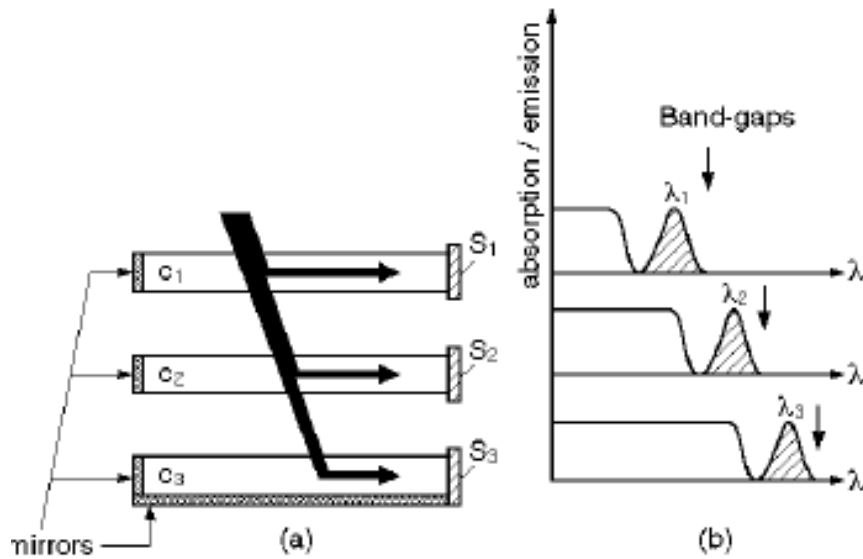


Sun Simba - Morgan Solar

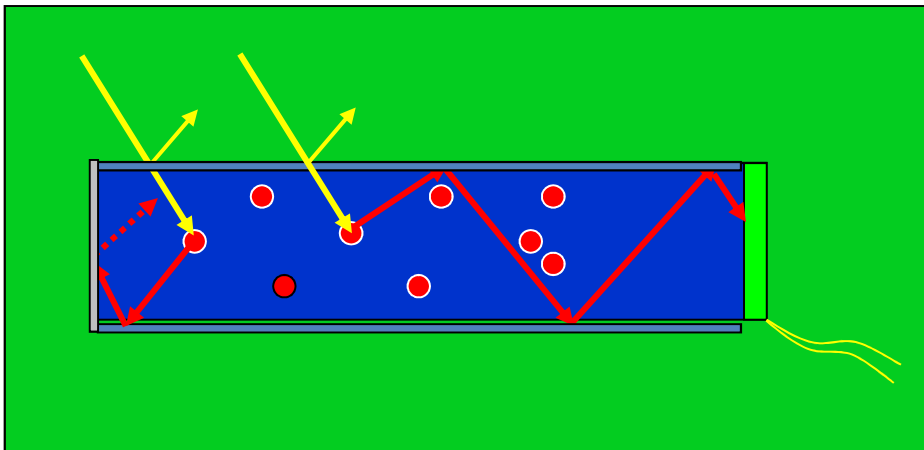
**C ≤ 1000X**

Concentratore CPV ultra sottile, leggero e di basso costo.  
Realizzato con materiali di lunga durata e con processi semplici.  
Non richiede manutenzione e si adatta a molte applicazioni.

# CONCENTRATORI SOLARI LUMINESCENTI



- a) Concentratore luminescente a tre strati. Ciascuno strato assorbe e riemette luce con lunghezza d'onda via via più grande.
- b) Spettro di assorbimento e luminescenza.



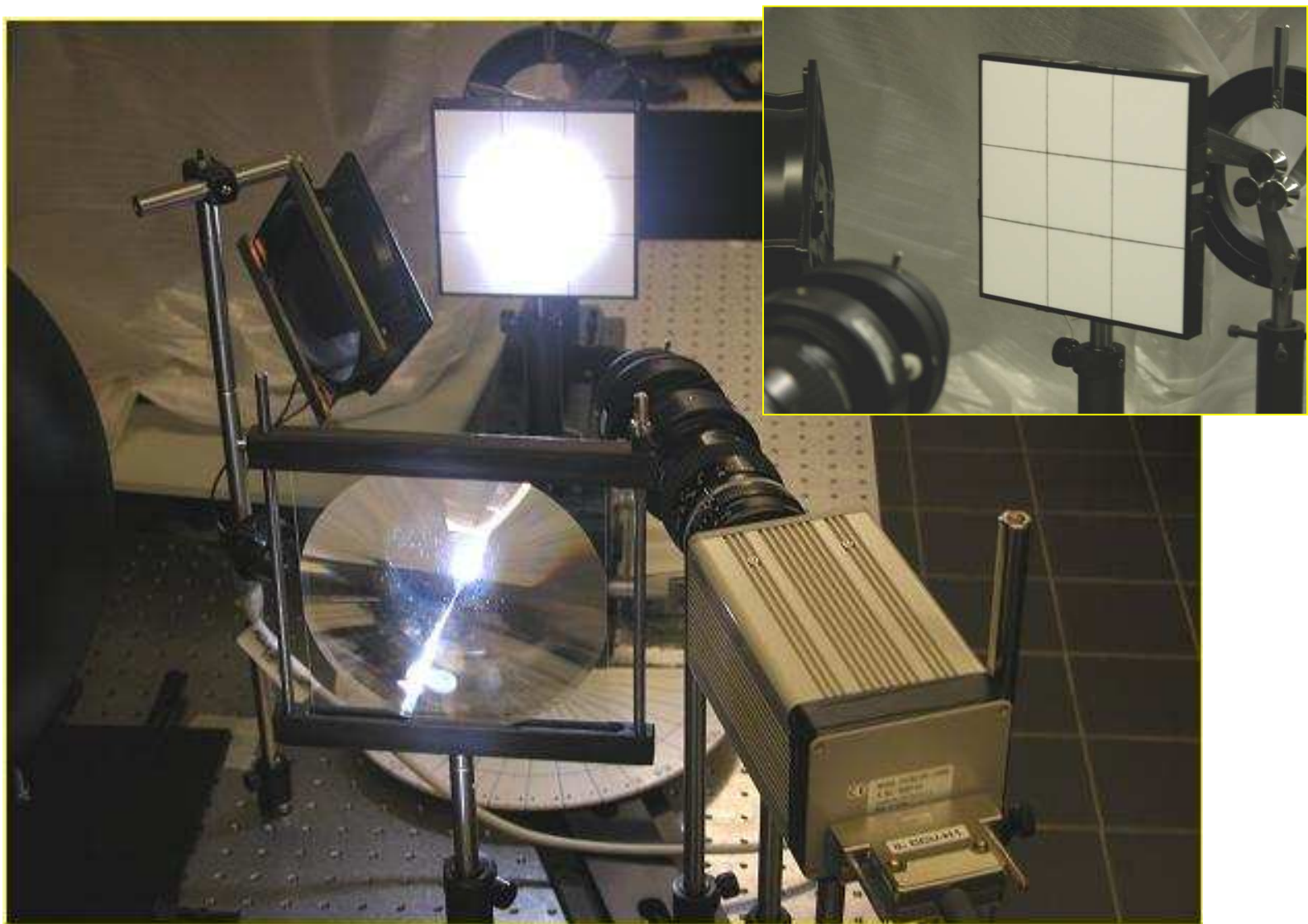
Luce di fotoluminescenza raccolta per riflessione interna totale.



COME SI CARATTERIZZA

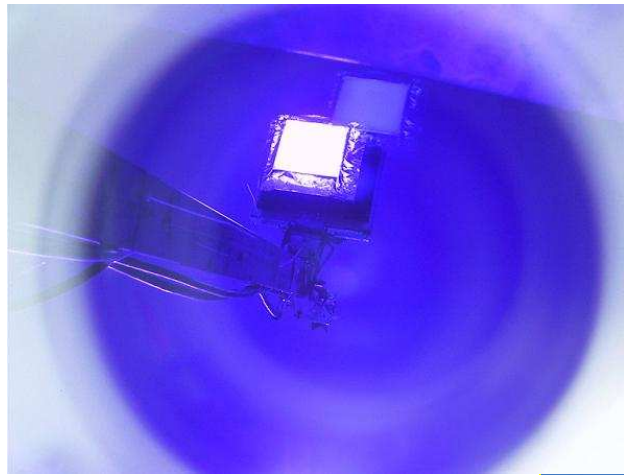
IL FASCIO CONCENTRATO

# METODO CAMERA-TARGET (In riflessione)

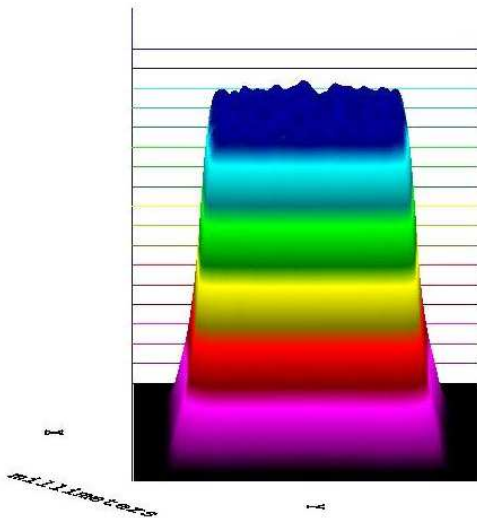


Laboratori ENEA - Portici

# METODO CAMERA-TARGET (In riflessione)

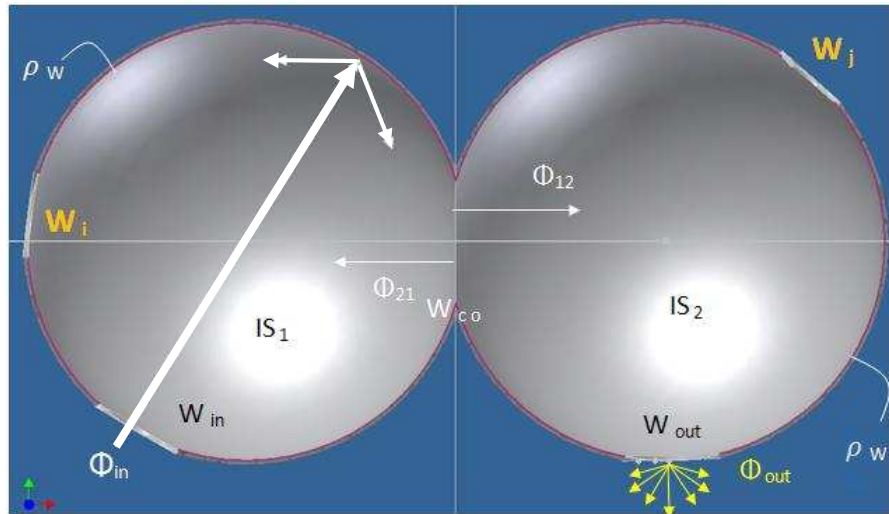


Total - Irradiance Map for Absorbed Flux  
Object 3 Surface 1

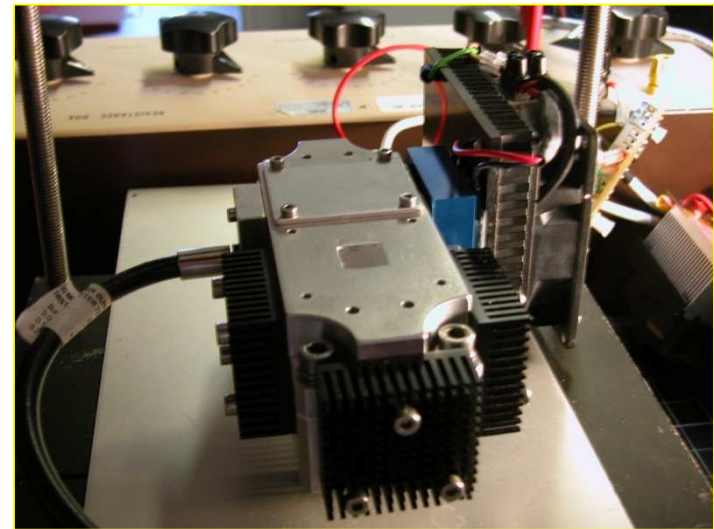


Profilo del flusso

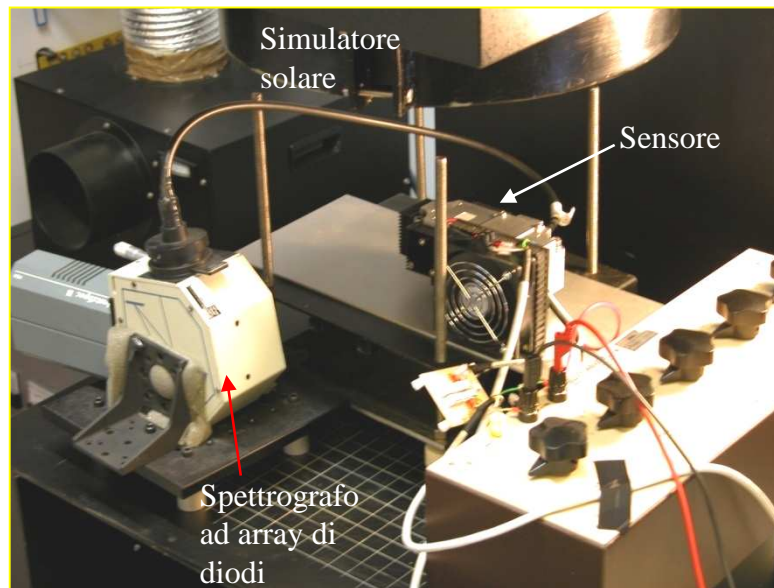
## METODO RADIOMETRICO (Per concentratori 3-D)



Doppia sfera integratrice



Prototipo DCR



L'apparato DCR

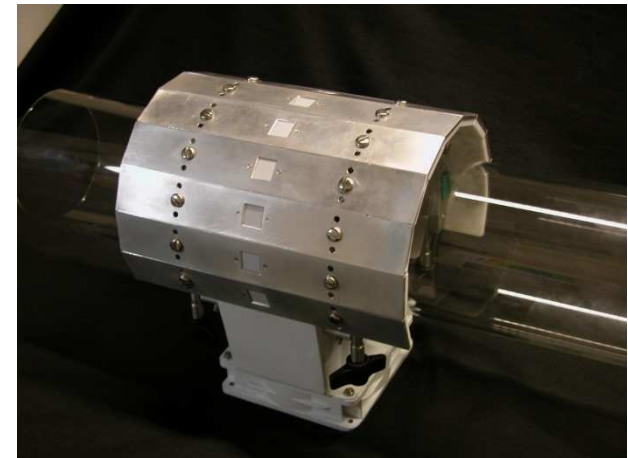
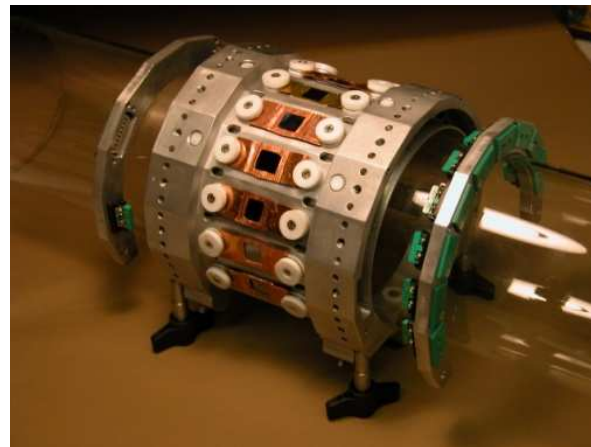


Prova al simulatore solare

## METODO RADIOMETRICO (Per concentratori 2-D)



### Radiometro statico



# METODO RADIOMETRICO (Per concentratori 2-D)

## **Radiometro mobile** **(A. Parretta e A. Moretti)**

## IL FUTURO



**L'energia solare prenderà il volo?**

# The End

# The End

