

CORSO DI OTTICA APPLICATA

1a LEZIONE

OGGI PARLIAMO DI...

GRANDEZZE RADIOMETRICHE E FOTOMETRICHE

LUCE COLLIMATA E DIFFUSA

SORGENTI ISOTROPE

SORGENTI LAMBERTIANE

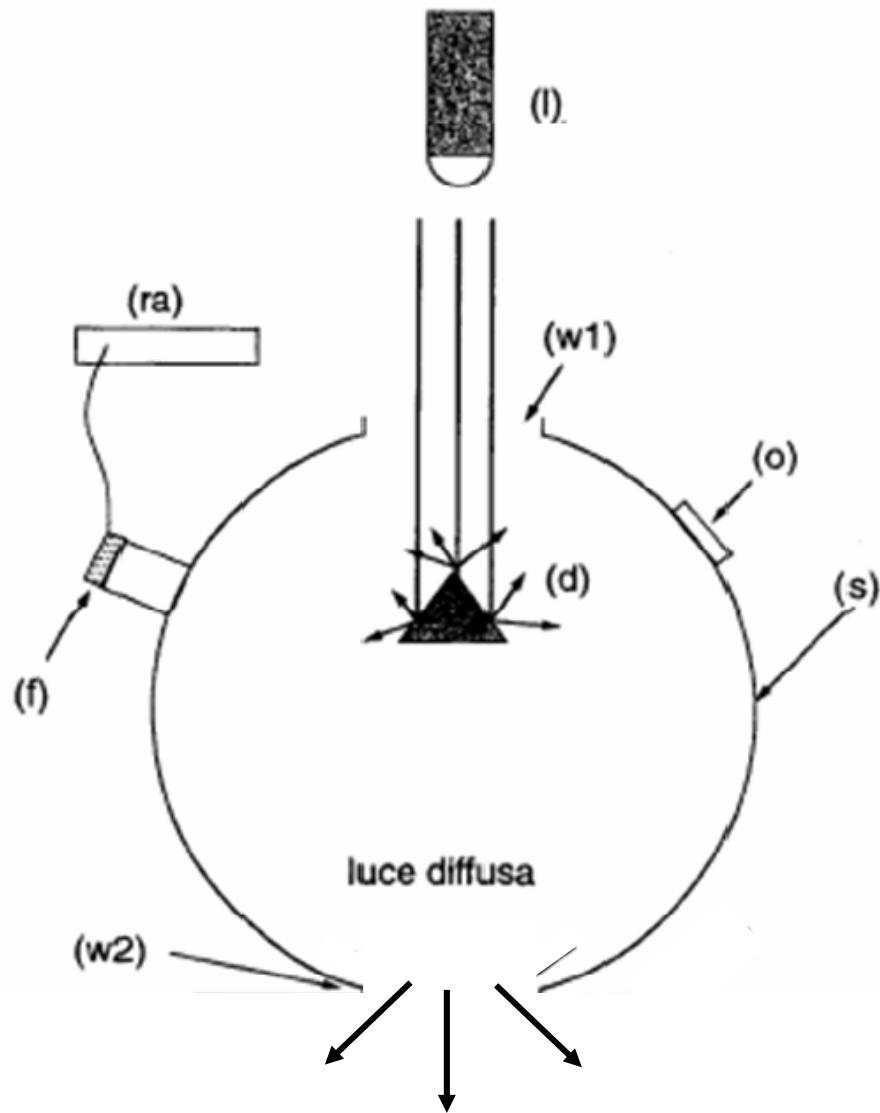
DIFFUSORI LAMBERTIANI E NON

SFERE INTEGRATRICI

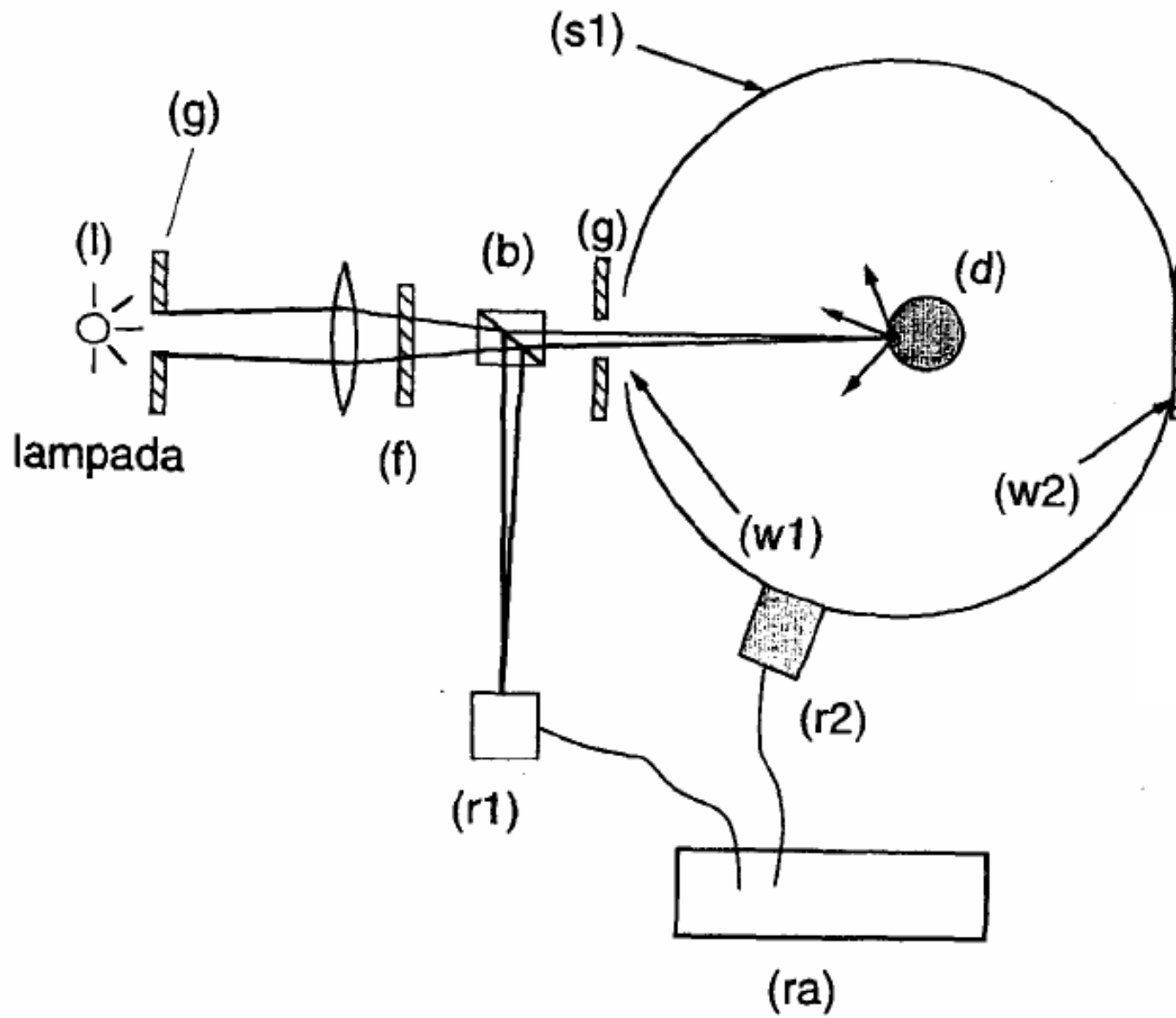
IRRADIANZA DAL CIELO

UN MODULO FV ESPOSTO ALLA LUCE SOLARE

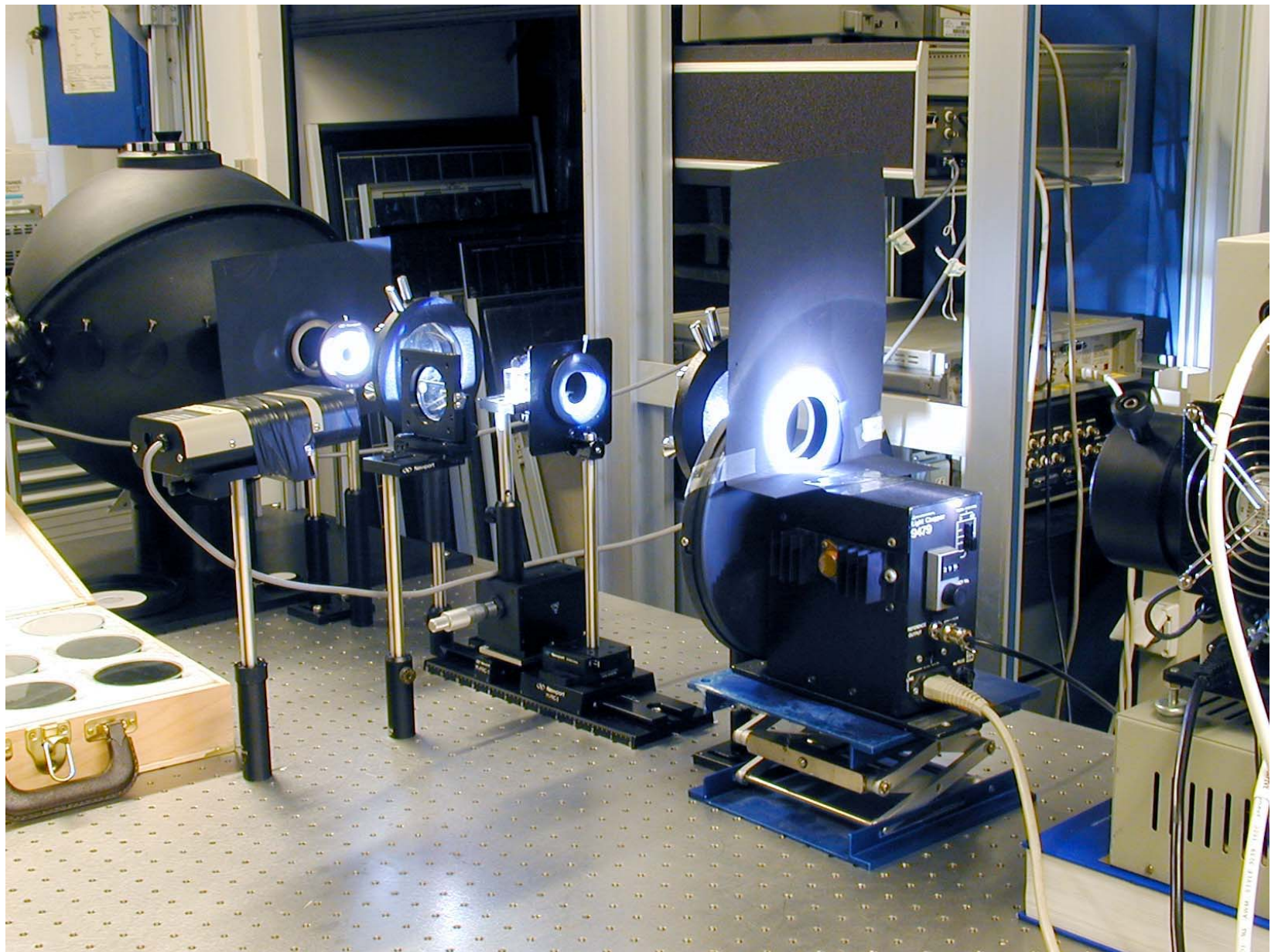
LAVORIAMO CON LA LUCE DIFFUSA:
LA SFERA INTEGRATRICE



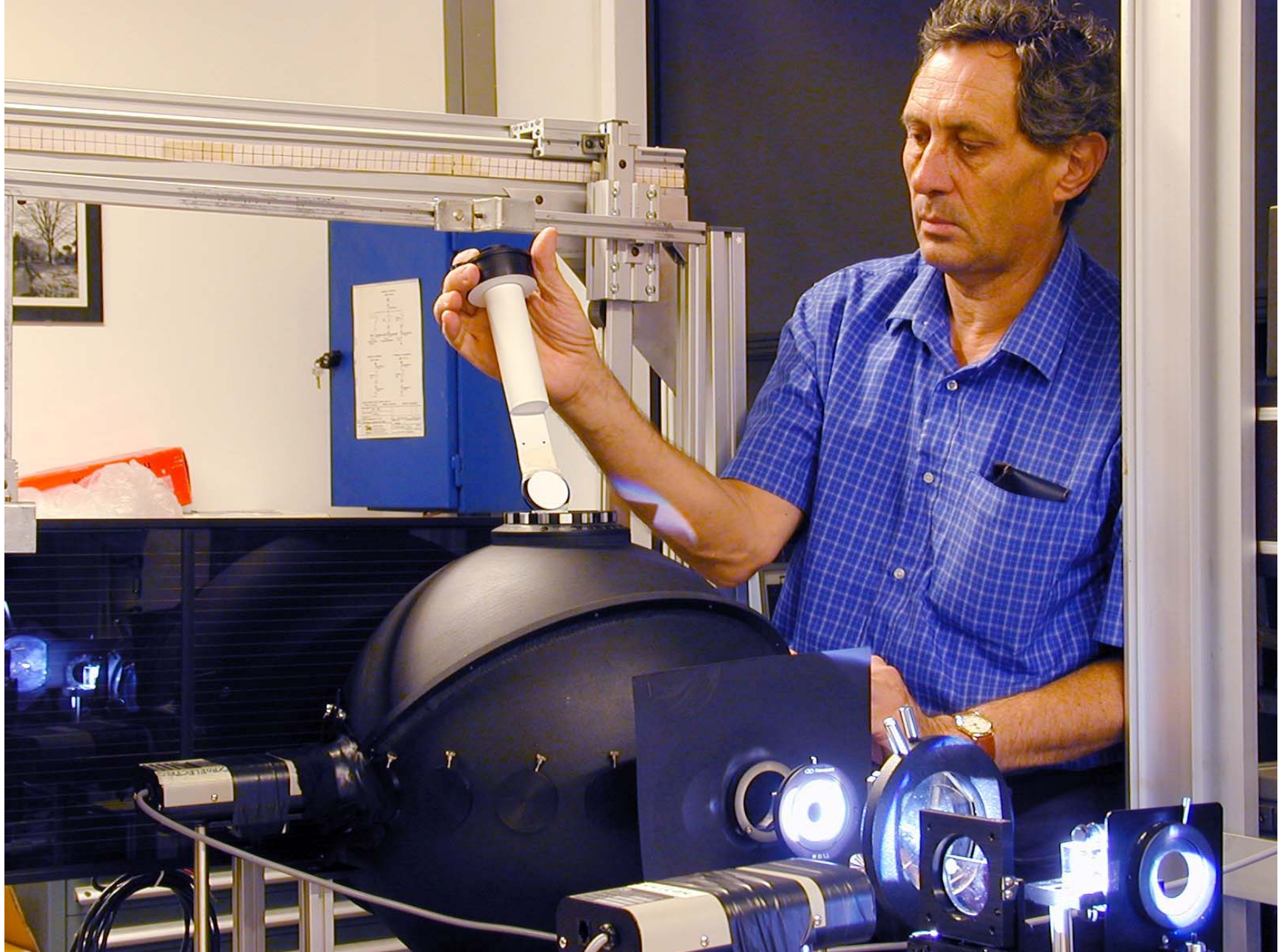
Sfera integratrice come sorgente di luce diffusa



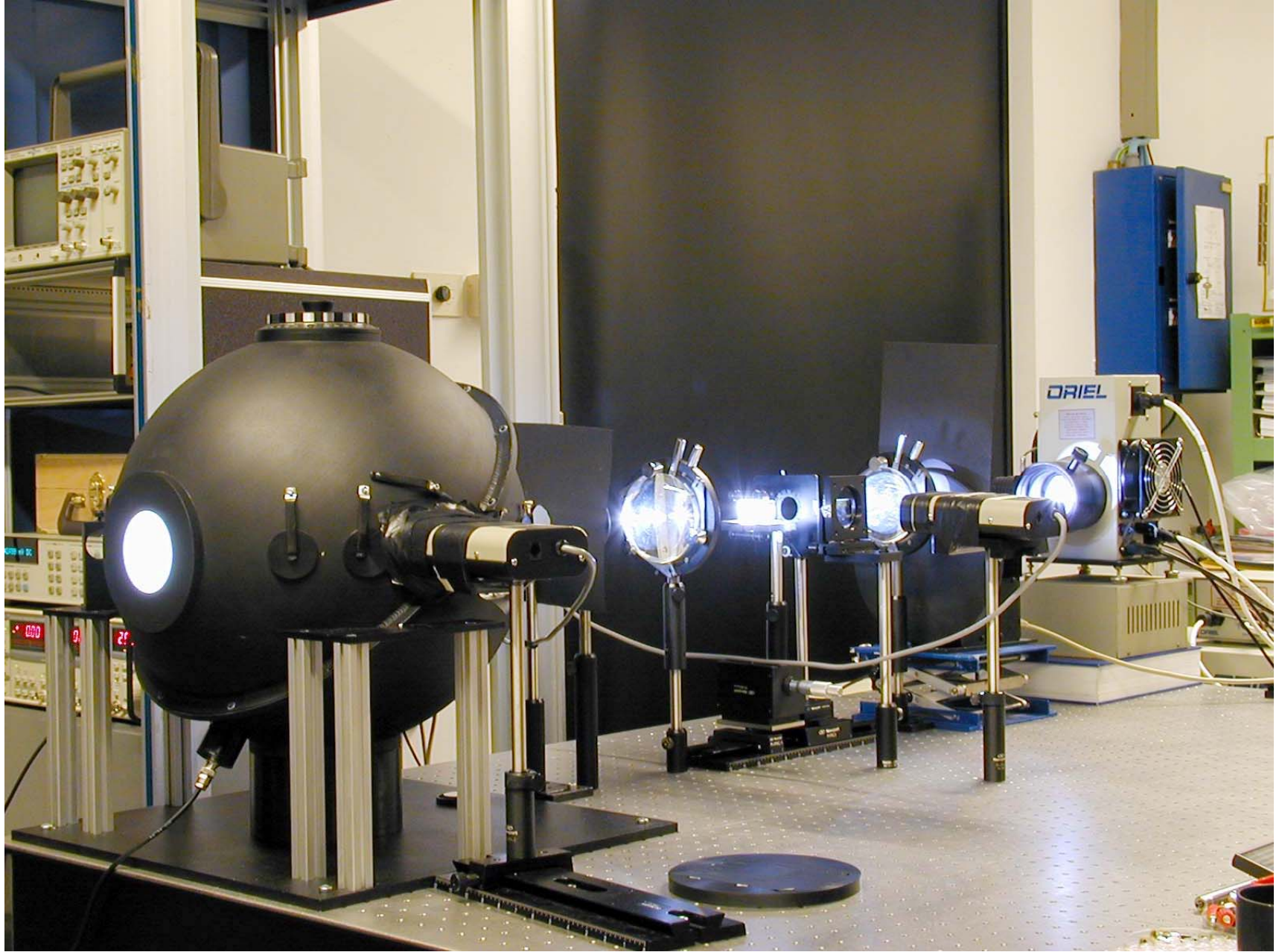
Schema ottico dettagliato per l'illuminazione della sfera



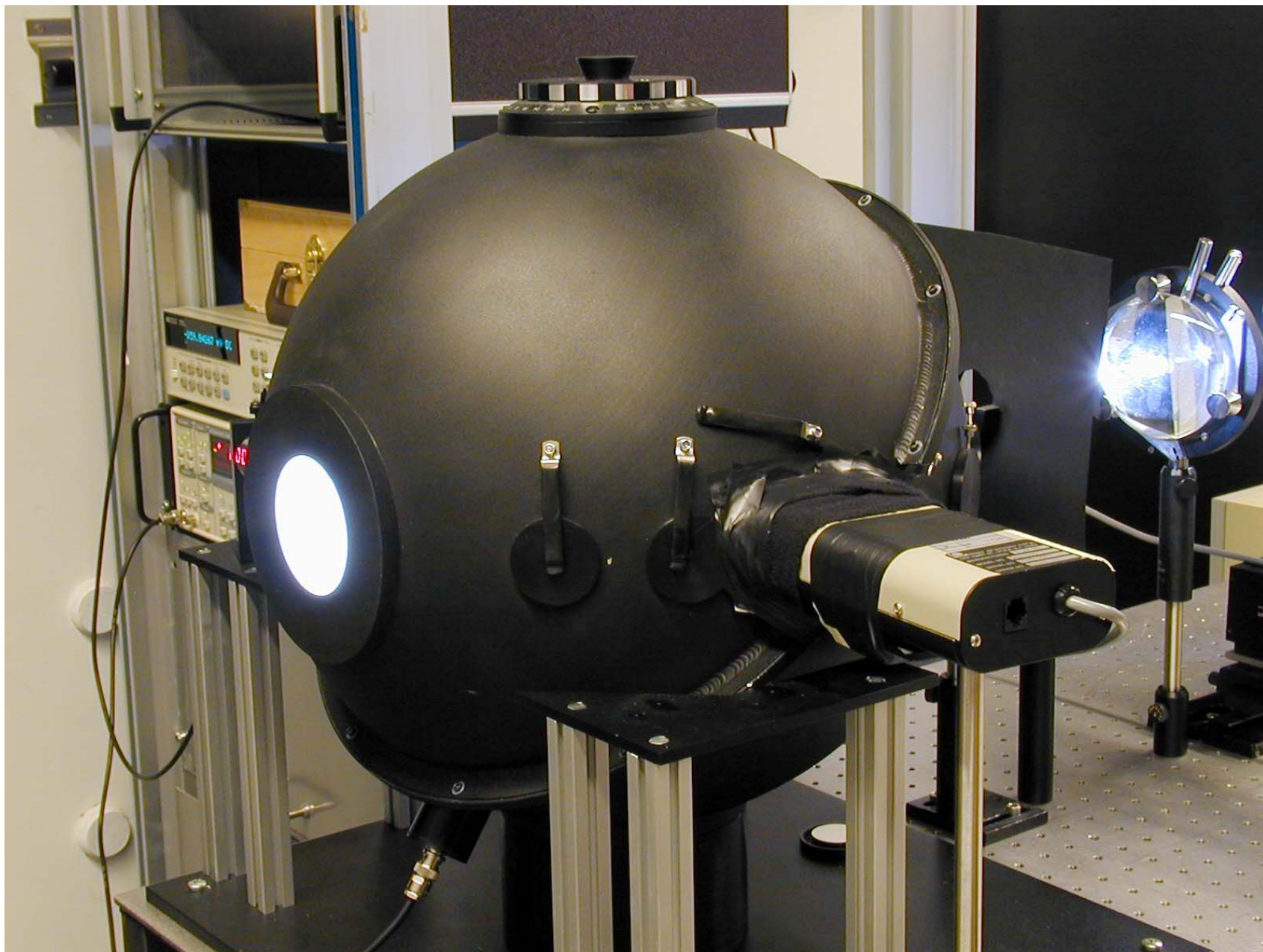
Si prepara il fascio di luce da mandare dentro la sfera integratrice.



Si posiziona un diffusore al centro della sfera integratrice.



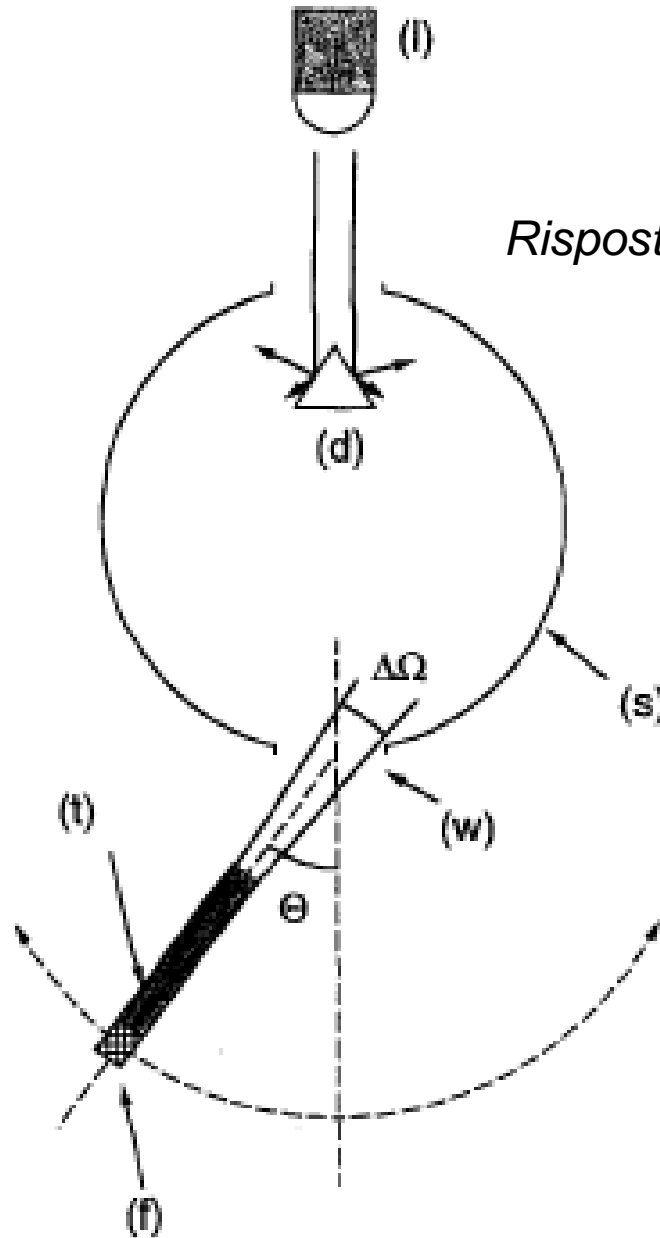
L'apparato è pronto per le misure



Dalla sfera viene irraggiata luce diffusa

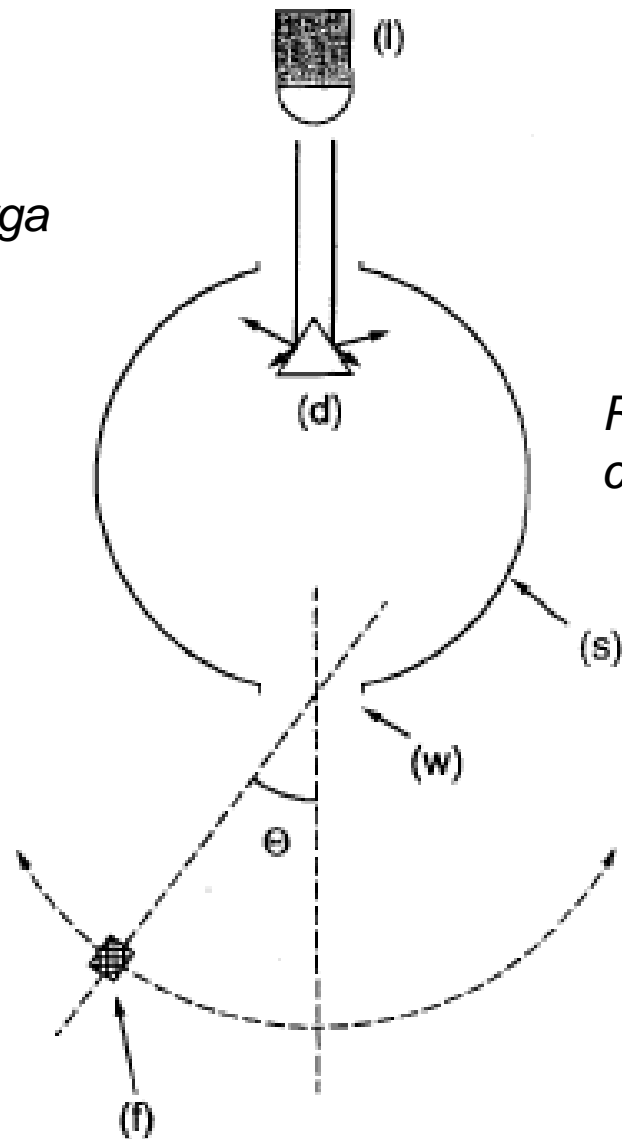
*Angolo di ripresa o
copertura angolare stretta*

Risposta del fotorivelatore piatta



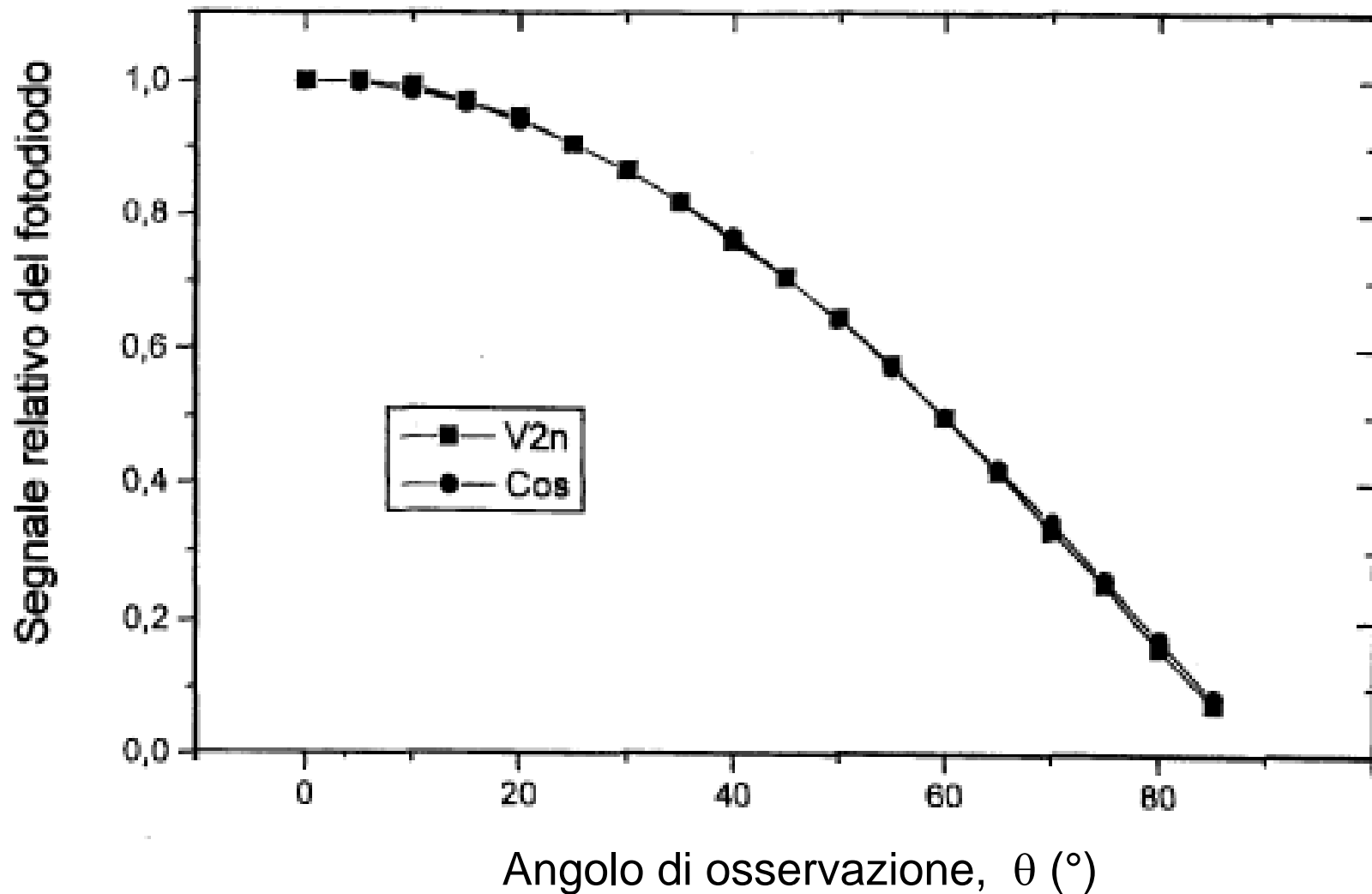
Misura angolare della luce diffusa con fotorivelatore a visuale stretta

*Angolo di ripresa o
copertura angolare larga*



*Risposta del fotorivelatore
come $\cos\theta$*

Misura angolare della luce diffusa con fotorivelatore a visuale larga ($\pm 90^\circ$)



Risposta del fotorivelatore come $\cos\theta$

GRANDEZZE RADIOMETRICHE E FOTOMETRICHE

Radiometria: scienza della misura della radiazione e.m.

Caratteristiche:

Frequenza

Intensità

Modulazione

Direzione

Coerenza

Sorgenti di radiazione e.m.: radiatori

Caratteristiche:

Dimensioni

Forma

Materiali

Temperatura

Irraggiamento

Le proprietà che ci interessa considerare sono:

Potenza irradiata

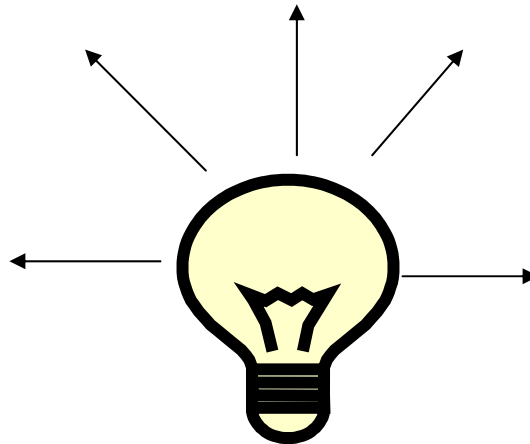
Distribuzione spaziale

Distribuzione angolare

GRANDEZZE RADIOMETRICHE E FOTOMETRICHE

Grandezza: Energia radiante (luminosa)
Unità: Joule (Talbot)

$$\text{Energia} = Q$$



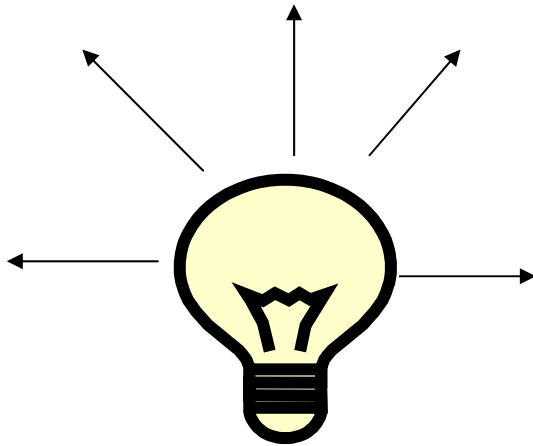
*ENERGIA EMESSA DA UNA SORGENTE
IN UN DETERMINATO TEMPO*

GRANDEZZE RADIOMETRICHE E FOTOMETRICHE

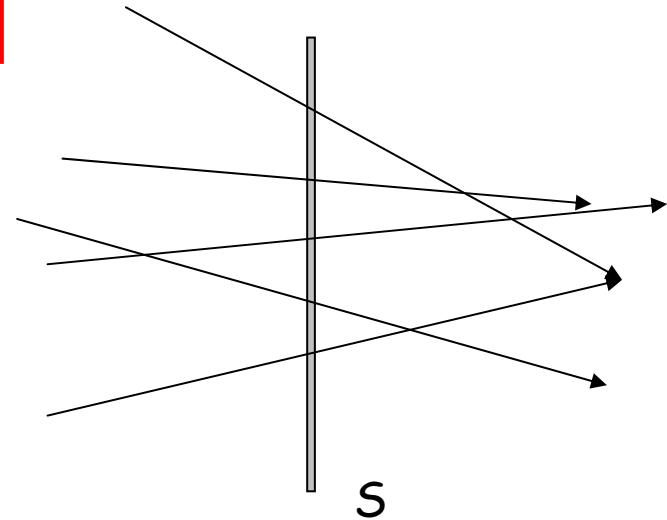
Grandezza: Flusso radiante (luminoso)

Unità: Watt (Lumen)

$$\text{Flusso} = \Phi = dQ/dt$$



*POTENZA (FLUSSO) TOTALE
EMESSA DA UNA SORGENTE*

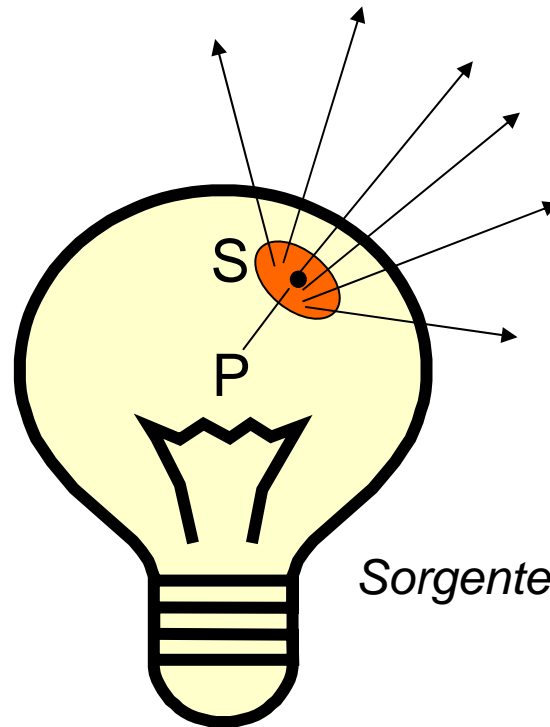


*POTENZA TOTALE (FLUSSO)
CHE INCIDE O CHE ATTRAVERSA
UNA SUPERFICIE*

GRANDEZZE RADIOMETRICHE E FOTOMETRICHE

Grandezza: Emettenza radiante (luminosa)

Unità: Watt/m² (Lumen/m²=Lux)



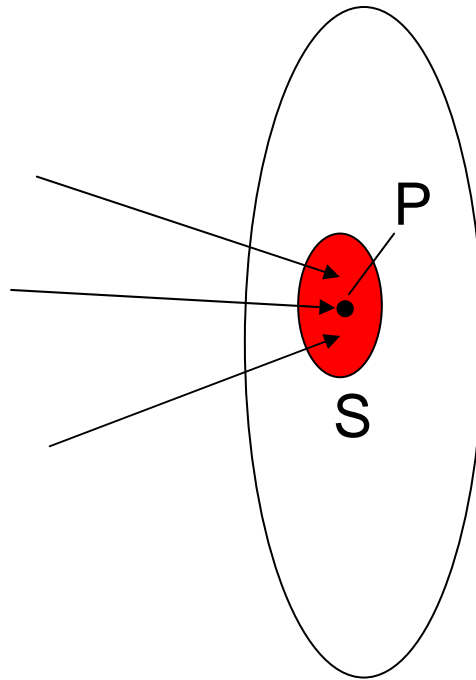
$$M = [d\Phi/dS]$$

DENSITA' DI POTENZA (FLUSSO)

GRANDEZZE RADIOMETRICHE E FOTOMETRICHE

Grandezza: Irradianza (Illuminamento)

Unità: Watt/m² (Lumen/m²=Lux)



$$E = [d\Phi/dA]$$

Superficie

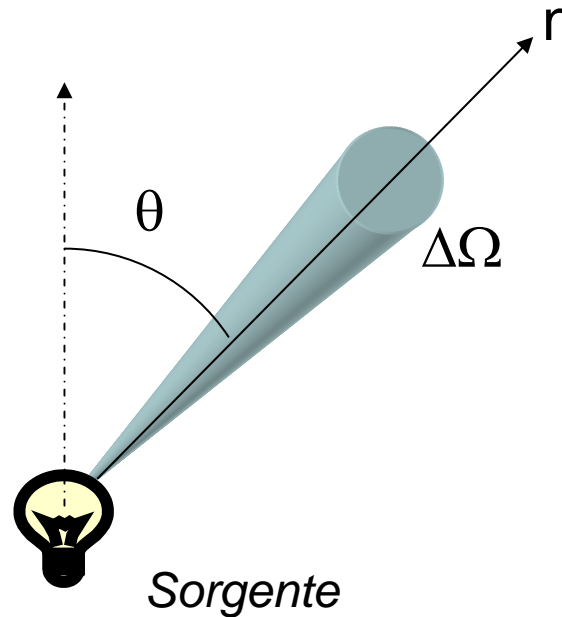
DENSITA' DI POTENZA (FLUSSO)

GRANDEZZE RADIOMETRICHE E FOTOMETRICHE

Grandezza: Intensità radiante (luminosa)

Unità: Watt/sr (Lumen/sr o candela(cd))

$$I = [d\Phi/d\Omega]$$



POTENZA / ANGOLO SOLIDO
"CANDLEPOWER"

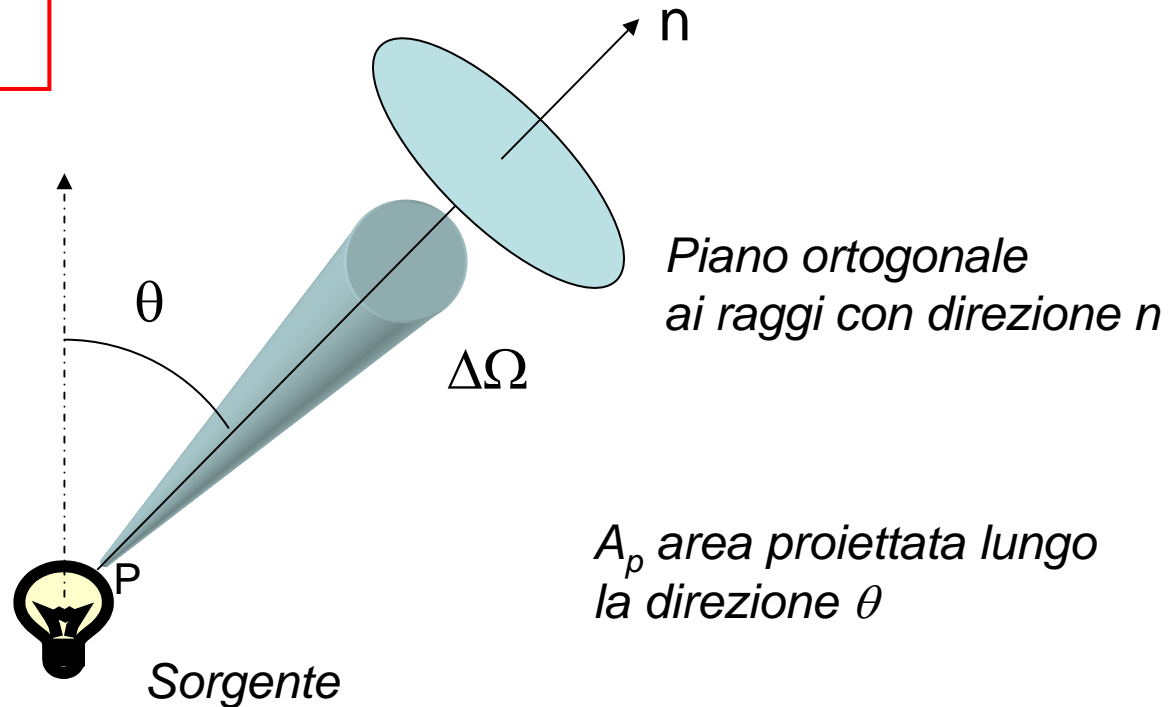
GRANDEZZE RADIOMETRICHE E FOTOMETRICHE

Grandezza: Radianza (Luminanza)

Unità: Watt/m²·sr (cd/m² (Nit))

$$L = [d\Phi / d\Omega dA_p]$$

$$L = [dI / dA_p]$$



INTENSITA' RADIANTE / UNITA' DI AREA PROIETTATA
"BRIGHTNESS"

GRANDEZZE RADIOMETRICHE

Nome	Simbolo	Relazione	Unità di misura
Energia radiante (Radiant energy)	Q_e	-	<i>Joule (J)</i>
Densità di energia radiante (Radiant energy density)	U_e	dQ_e/dV	J/m^3
Flusso radiante (Radiant flux)	Φ_e	dQ_e/dt	<i>Watt (W)</i>
Irradianza (Irradiance)	E_e	$d\Phi_e/dA$	W/m^2
Emetenza radiante (Radiant exitance)	M_e	$d\Phi_e/dA$	W/m^2
Intensità radiante (Radiant intensity)	I_e	$d\Phi_e/d\Omega$	W/sr
Radianza (Radiance)	L_e	$d^2\Phi_e/dA_p d\Omega$	$W/(m^2 sr)$

GRANDEZZE FOTOMETRICHE

Nome	Simbolo	Relazione	Unità di misura
Energia luminosa (Luminous energy)	Q_v		$lm \cdot s$ (Talbot)
Densità di energia luminosa (Luminous energy density)	U_v	dQ_v / dV	$lm \cdot s / m^3$
Flusso luminoso (luminous flux)	Φ_v	dQ_v / dt	Lumen (lm)
Illuminamento (Illuminance)	E_v	$d\Phi_v / dA$	lm/m^2 (Lux)
Emetenza luminosa (Luminous emittance)	M_v	$d\Phi_v / dA$	lm/m^2 (Lux)
Intensità luminosa (Luminous intensity)	I_v	$d\Phi_v / d\Omega$	lm/sr (candela)
Luminanza (Luminance)	L_v	$d^2\Phi_v / dA_p d\Omega$	$lm/(m^2 sr)$ (Nit)
Rendimento luminoso (luminous efficacy)	K	Φ_v / Φ_e	lm/W

QUINDI LA SFERA INTEGRATRICE, E' UNA SORGENTE
DI LUCE DIFFUSA A RADIENZA COSTANTE, OVVERO E'
UNA SORGENTE DI LUCE LAMBERTIANA

.....

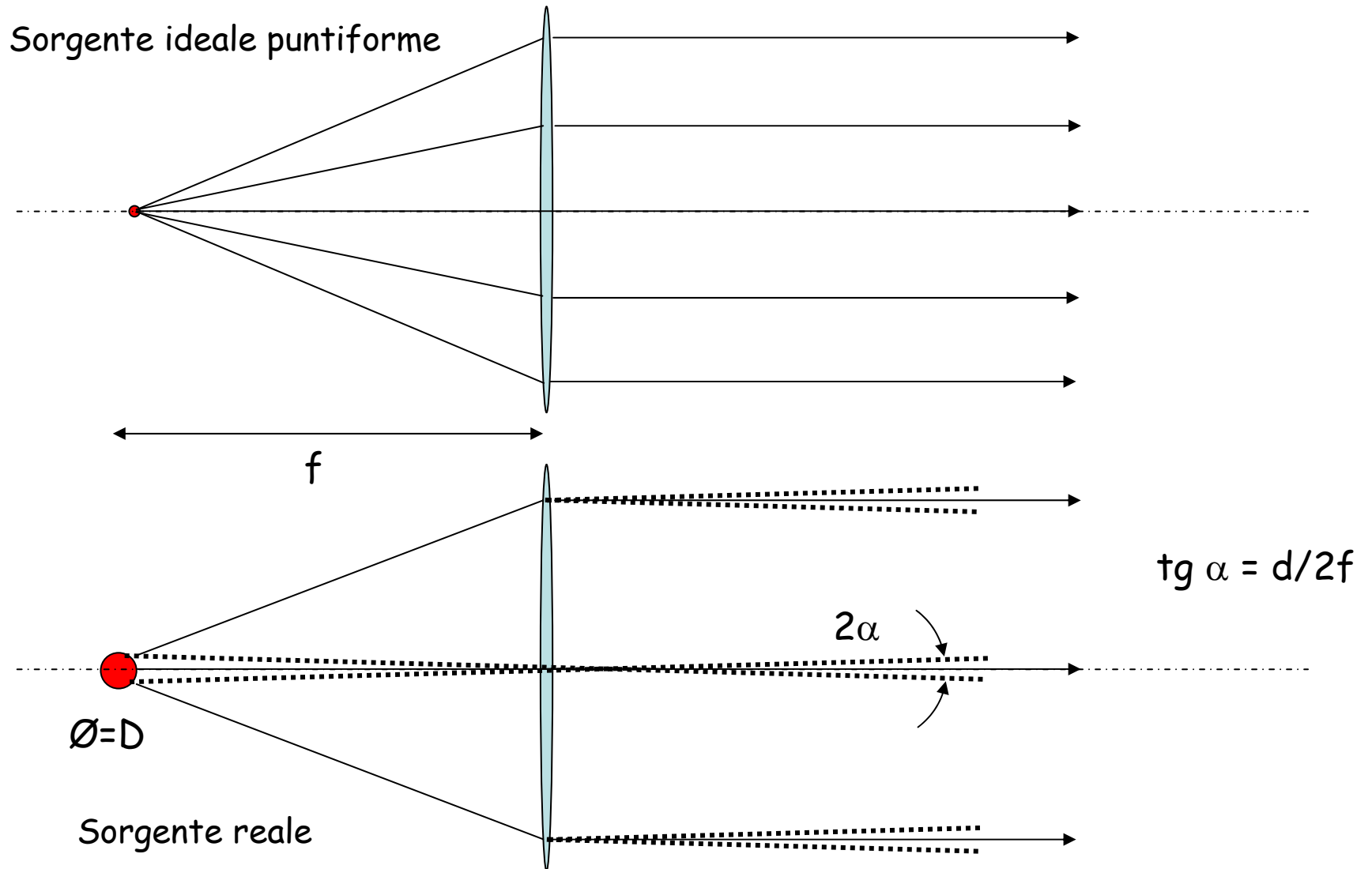
DISCUSSIONE

LA SFERA INTEGRATRICE, ESSENDO UNA SORGENTE
DI LUCE DIFFUSA A RADIENZA COSTANTE, E' ADATTA
PER PRODURRE UN FASCIO DI LUCE COLLIMATA,
A DIVERGENZA FISSATA.

...

VEDIAMO COME ...

LAVORIAMO CON LA LUCE COLLIMATA



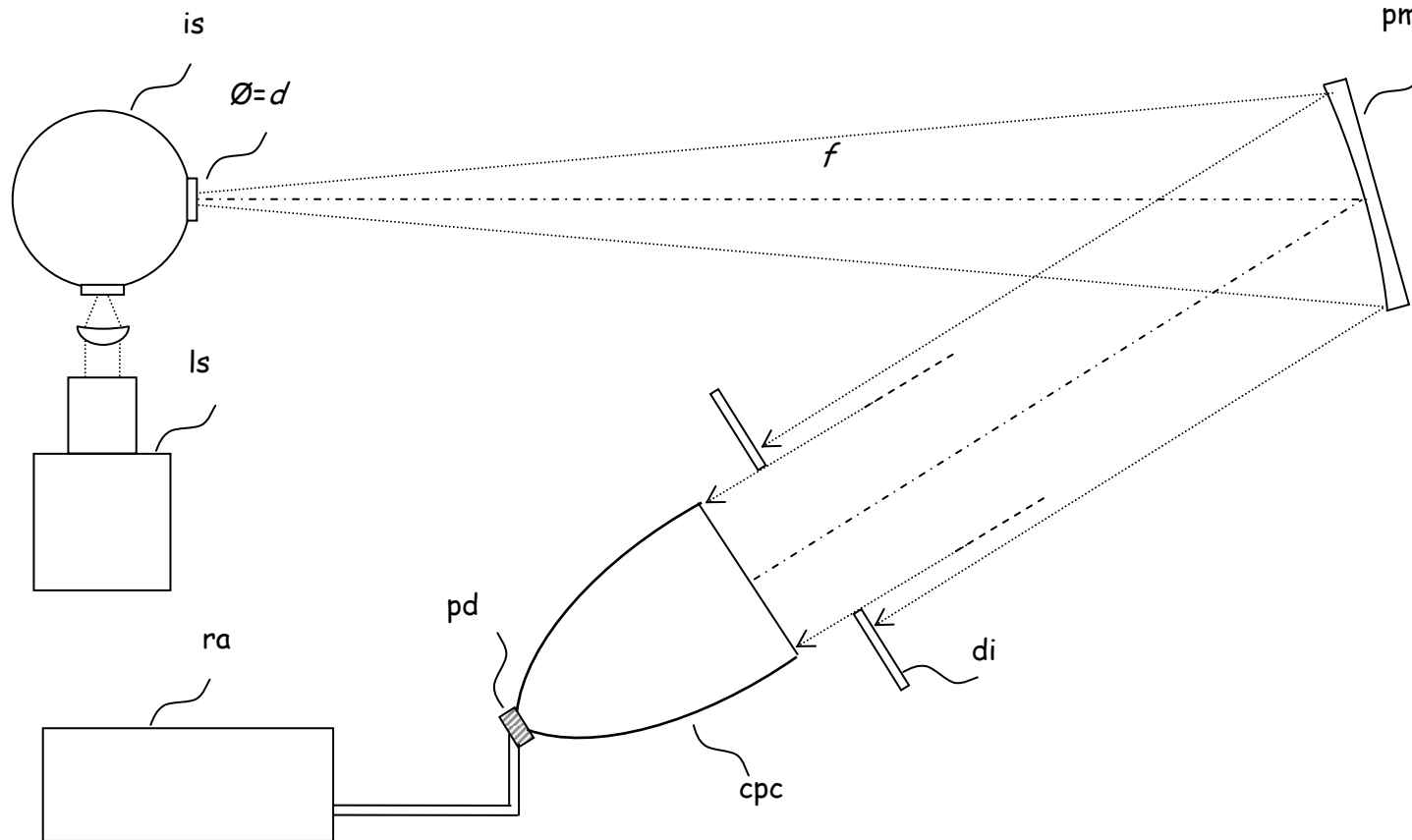
FASCIO COLLIMATO CON DIVERGENZA ANGOLARE PARI A QUELLA DEL SOLE ($\pm 027^\circ$)

$\varnothing=D=1$

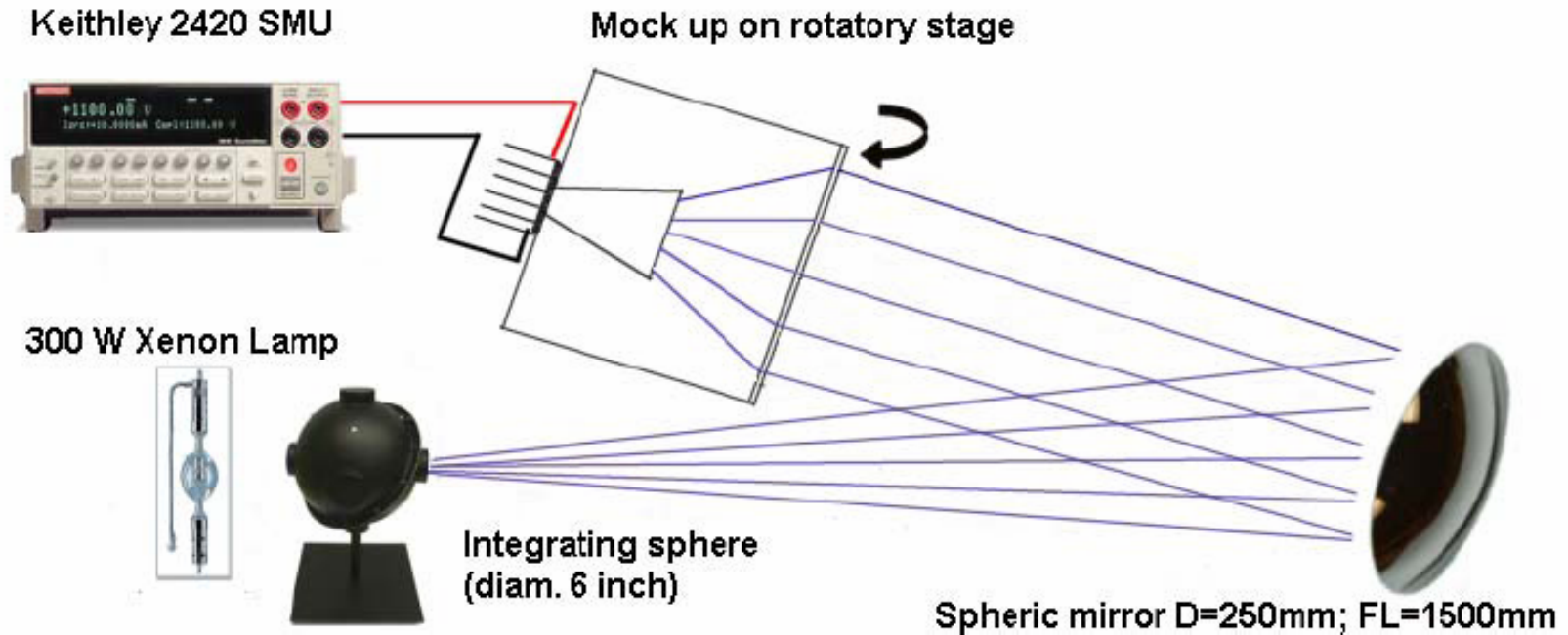


$d=100$

Terra

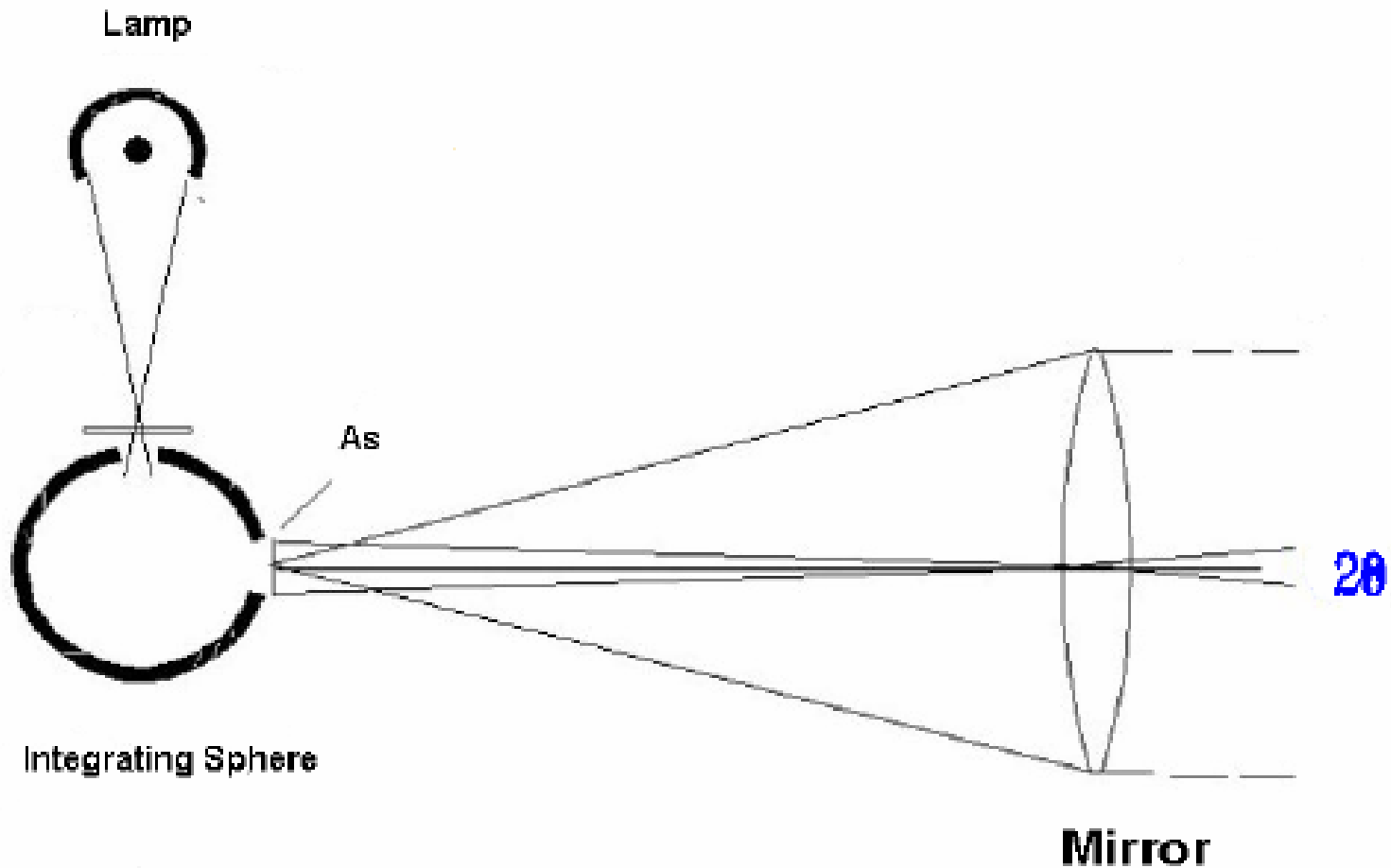


FASCIO COLLIMATO CON DIVERGENZA ANGOLARE PARI A QUELLA DEL SOLE ($\pm 027^\circ$)



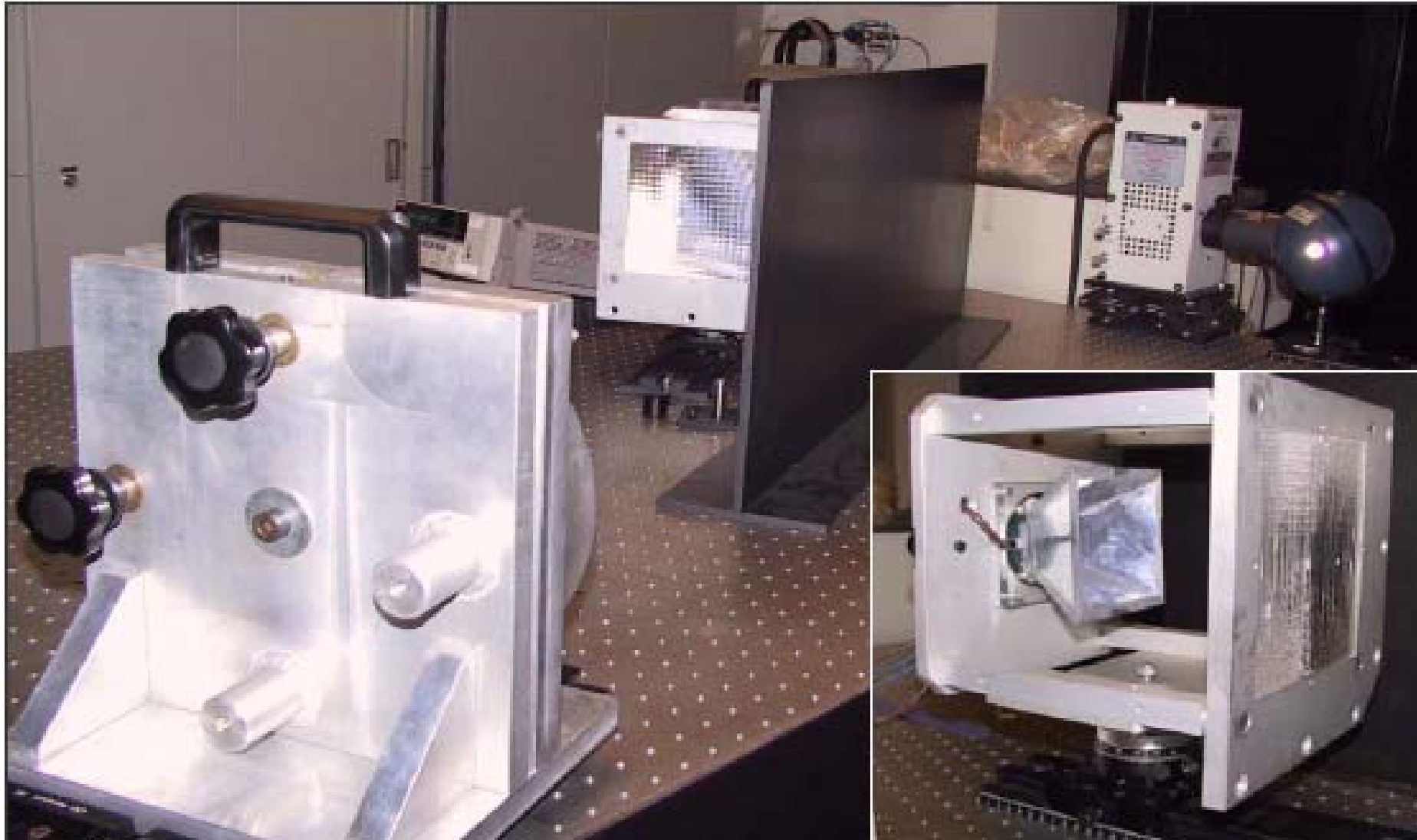
Apparato sperimentale per la caratterizzazione indoor di concentratori solari.

FASCIO COLLIMATO CON DIVERGENZA ANGOLARE PARI A QUELLA DEL SOLE ($\pm 027^\circ$)



Schema utilizzato per la riproduzione in laboratorio di un fascio di luce con la divergenza dei raggi solari sul banco di prova

FASCIO COLLIMATO CON DIVERGENZA ANGOLARE PARI A QUELLA DEL SOLE ($\pm 027^\circ$)



PROBLEMA:

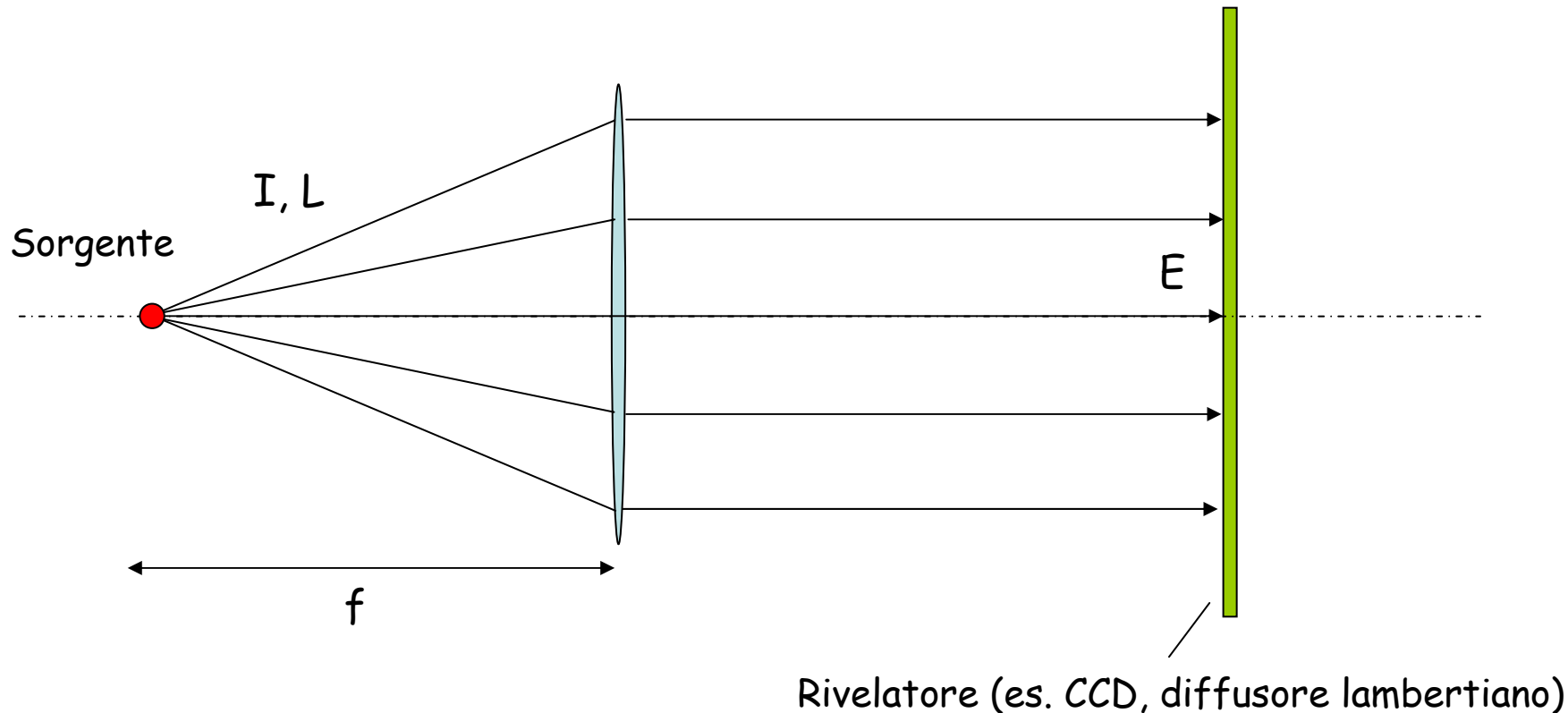
ASSODATO CHE UNA SFERA INTEGRATRICE E' ADATTA PER PRODURRE UN FASCIO DI LUCE COLLIMATA A DIVERGENZA FISSATA, QUAL'E' LA DISTRIBUZIONE DELL'INTENSITA' (IRRADIANZA) DEL FASCIO IN UNA SUA SEZIONE ORTOGONALE?

...

OVVERO:

E SE QUESTA DISTRIBUZIONE NON FOSSE OMOGENEA, QUAL'E' LA SORGENTE PIU' ADATTA PER OTTENERE UN FASCIO CON IRRADIANZA COSTANTE?

VOGLIAMO: FASCIO COLLIMATO OMOGENEO, OVVERO CON IRRADIANZA COSTANTE



Proviamo diverse sorgenti:

Sorgente lambertiana (sfera integratrice illuminata)

Sorgente isotropa

....

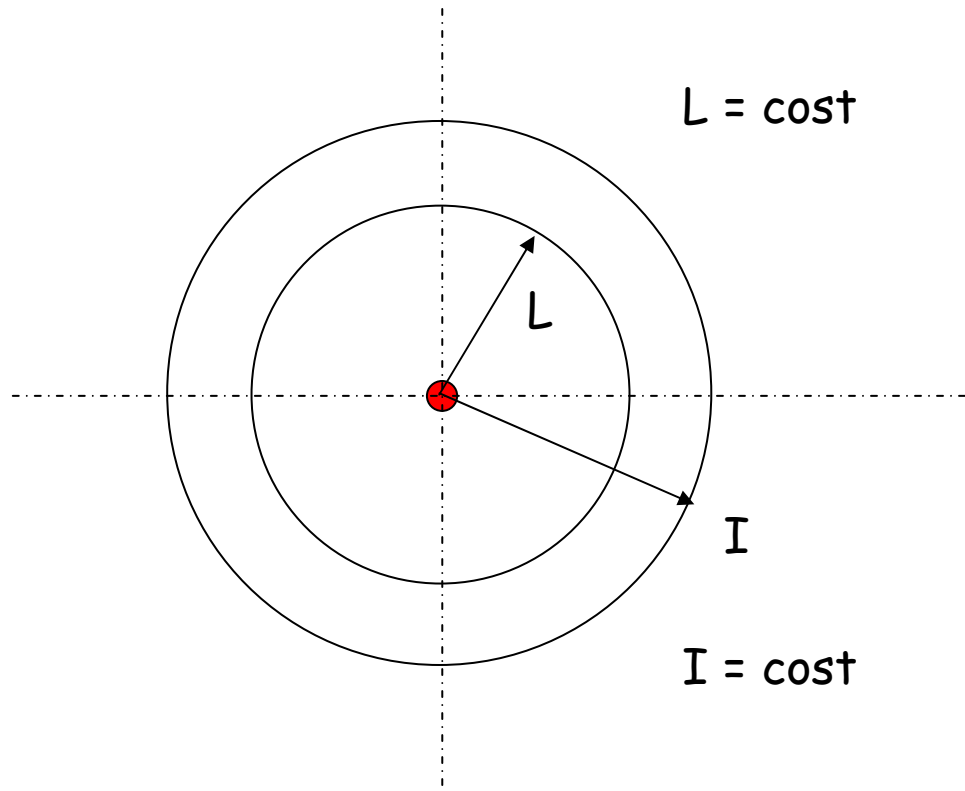
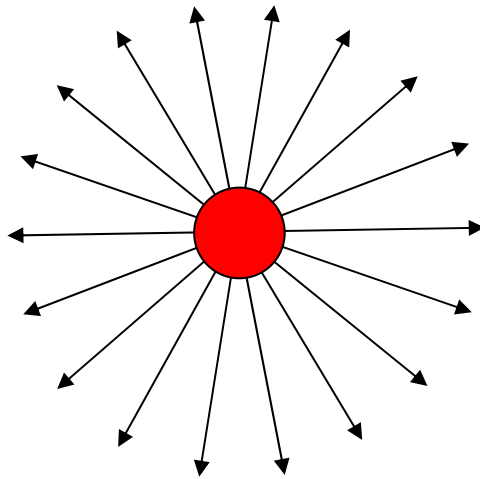
SORGENTE ISOTROPA

Emette in maniera isotropa in tutte le direzioni.

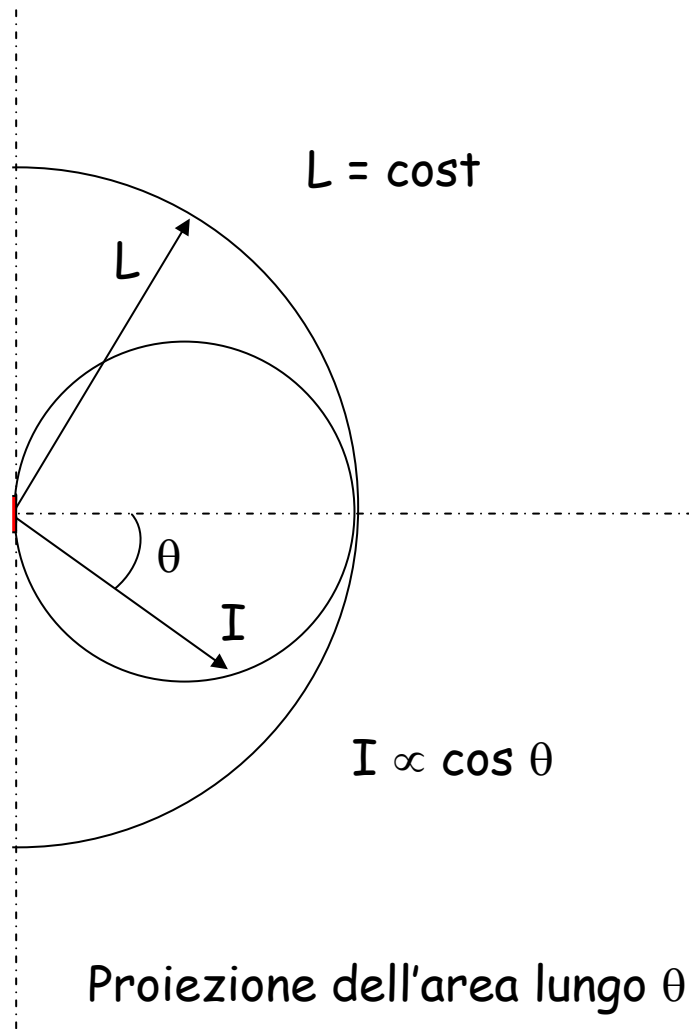
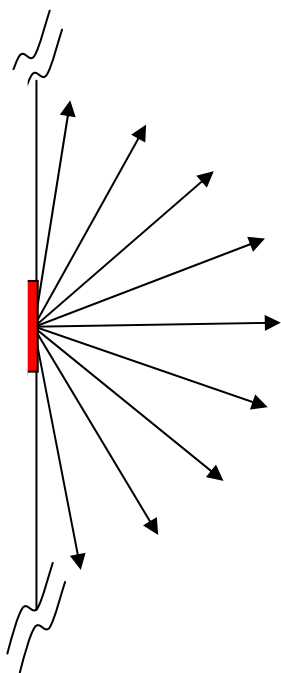
Quindi:

Intensità costante,

Radianza costante (proiezione costante)



SORGENTE LAMBERTIANA: SFERA INTEGRATRICE

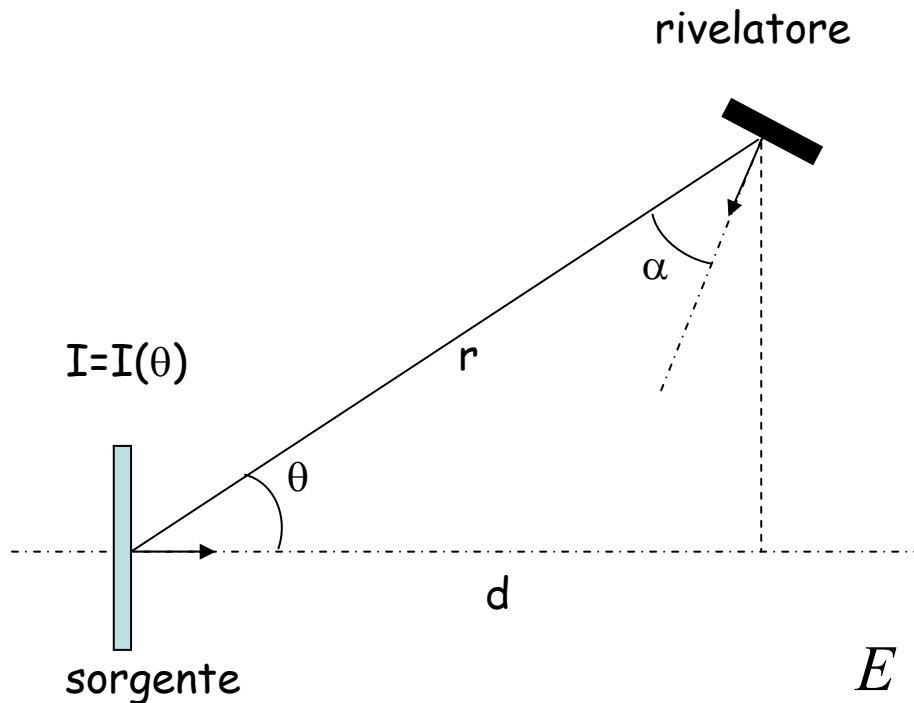


ESERCIZIO:

CALCOLARE LA DISTRIBUZIONE DELL'INTENSITA' (IRRADIANZA)
DEL FASCIO SU UNA SEZIONE ORTOGONALE ALL'ASSE OTTICO
PRINCIPALE PER UNA SORGENTE ISOTROPA E UNA LAMBERTIANA.

...

Prima scriviamo l'equazione generale per il flusso intercettato da una superficie comunque disposta rispetto ad una sorgente generica:



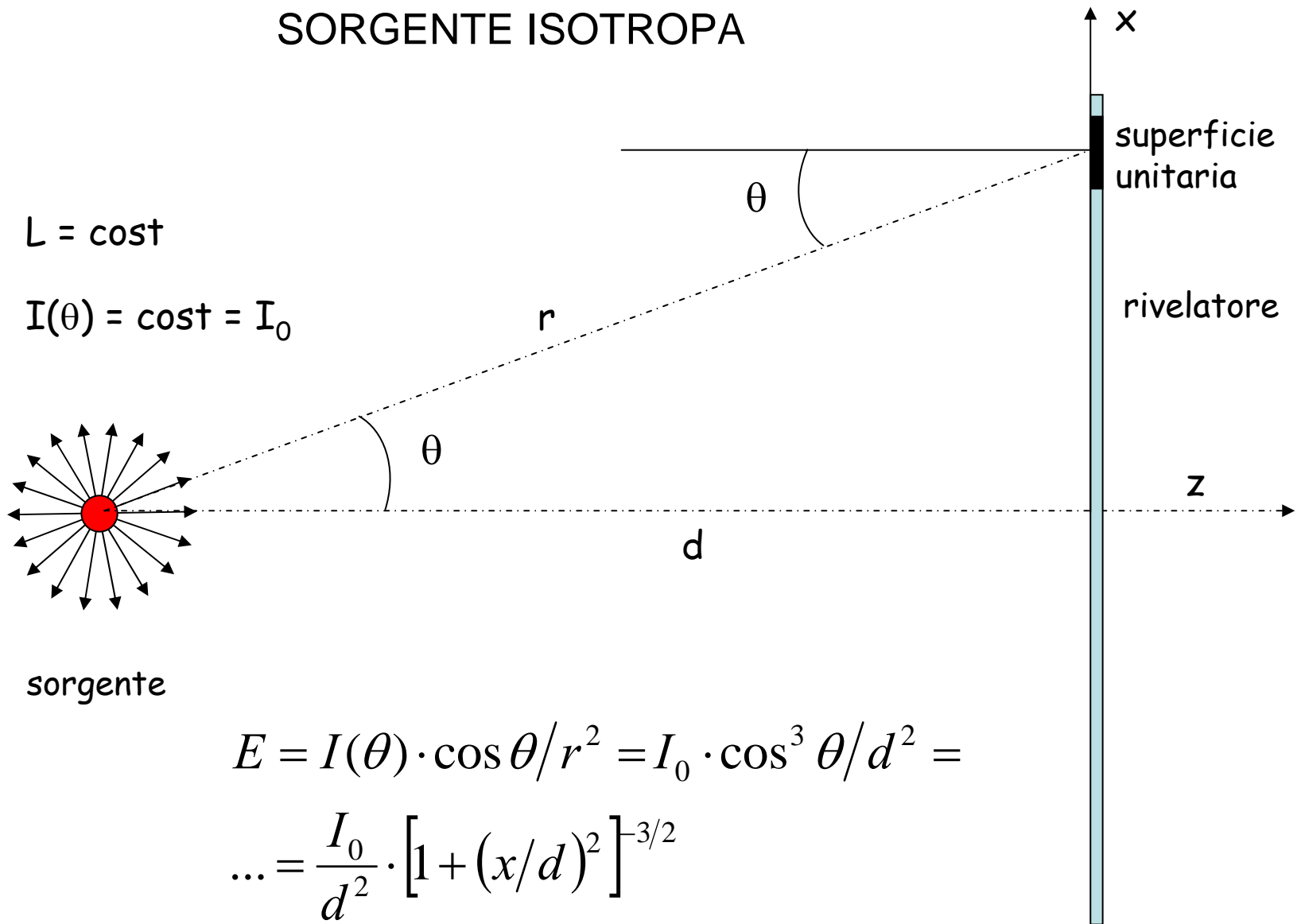
$$\Phi = I(\theta) \cdot S_R \cdot \cos \alpha / r^2$$

Flusso (W) assorbito dal rivelatore di area S_R

$$E = I(\theta) \cdot \cos \alpha / r^2 =$$
$$\dots = I(\theta) \cdot \cos \alpha \cdot \cos^2 \theta / d^2$$

Irradianza (W/m^2) sulla superficie del rivelatore

SORGENTE ISOTROPA



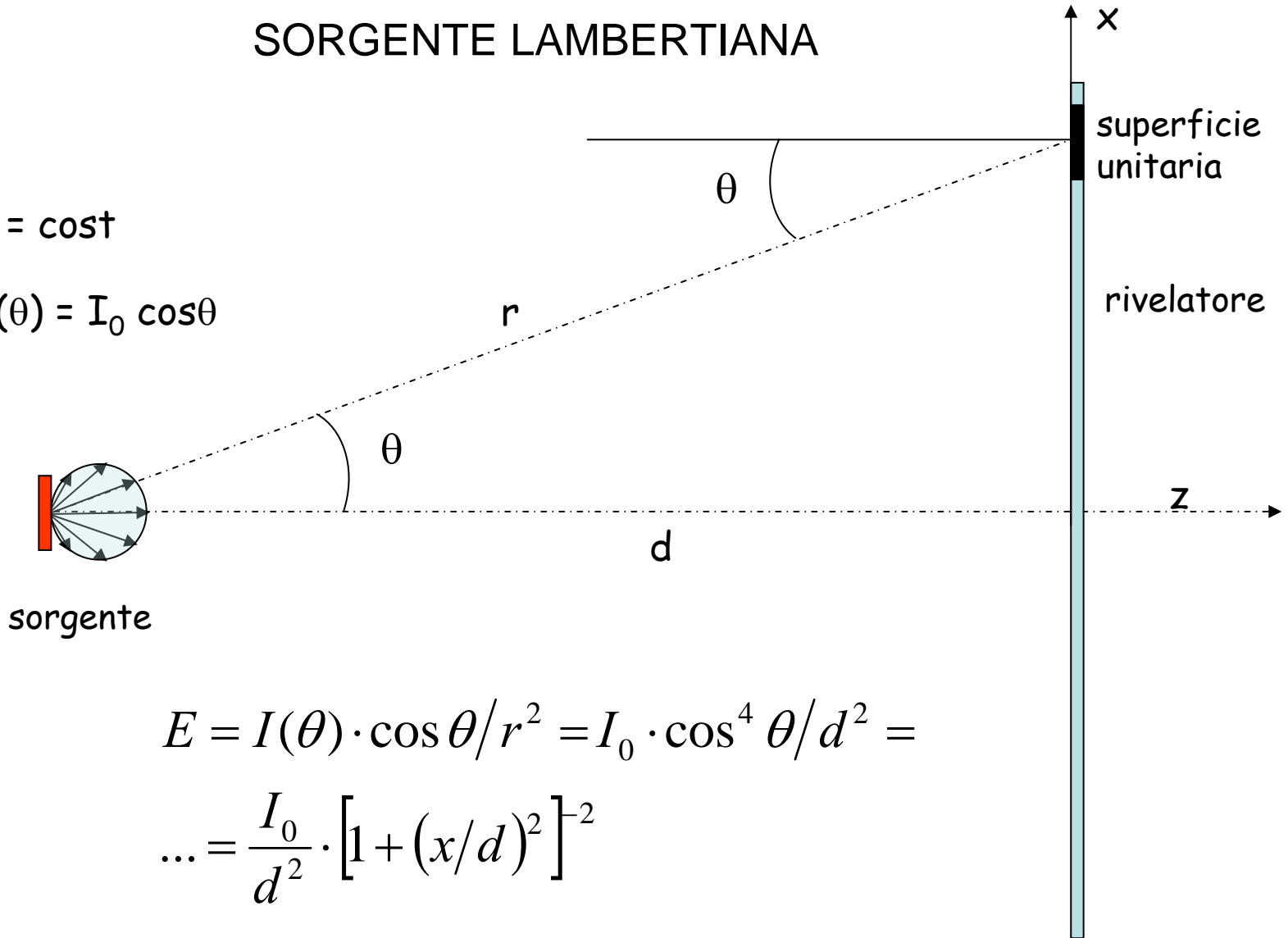
$$E = I(\theta) \cdot \cos \theta / r^2 = I_0 \cdot \cos^3 \theta / d^2 =$$
$$\dots = \frac{I_0}{d^2} \cdot \left[1 + (x/d)^2 \right]^{-3/2}$$

Irradianza (W/m^2) sulla superficie del rivelatore

SORGENTE LAMBERTIANA

$$L = \text{cost}$$

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



$$E = I(\theta) \cdot \cos\theta / r^2 = I_0 \cdot \cos^4\theta / d^2 =$$
$$\dots = \frac{I_0}{d^2} \cdot \left[1 + (x/d)^2\right]^{-2}$$

Irradianza (W/m²) sulla superficie del rivelatore

VERIFICARE I RISULTATI CON UNA SIMULAZIONE
AL COMPUTER.

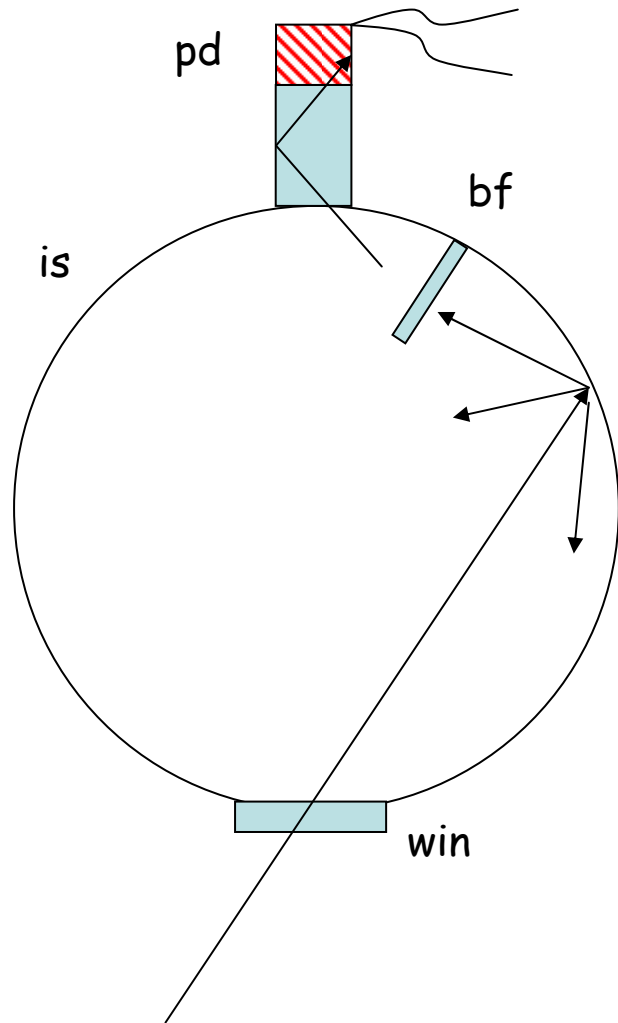
...

LA SFERA INTEGRATRICE, OLTRE CHE ESSERE UNA SORGENTE DI LUCE DIFFUSA, E' ANCHE LO STRUMENTO PIU' ADATTO PER MISURARLA.

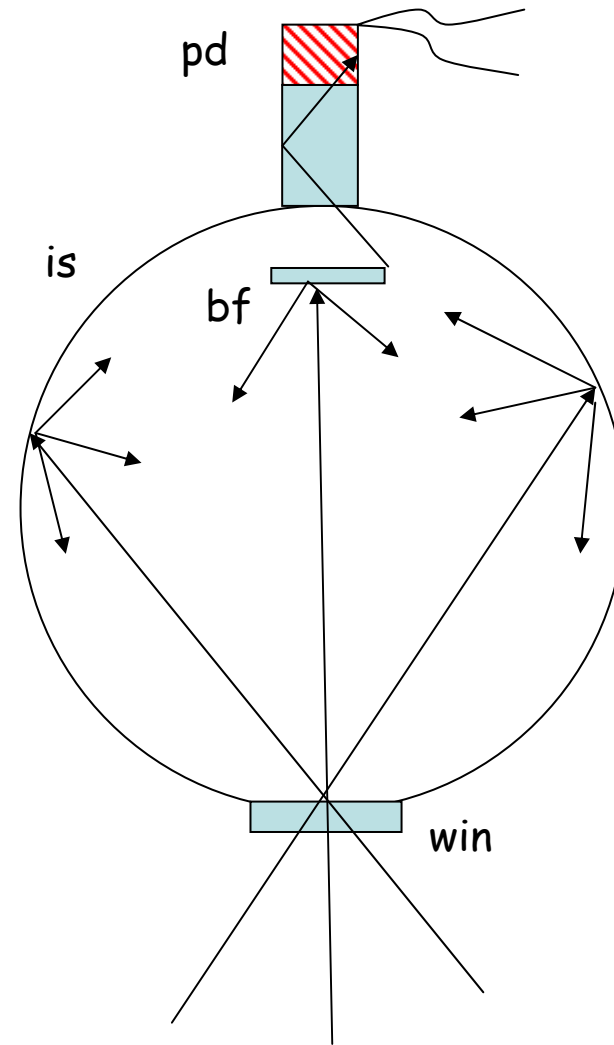
...

VEDIAMO COME:

SFERA INTEGRATRICE PER LA MISURA DELLA LUCE



Misura del flusso di un fascio collimato



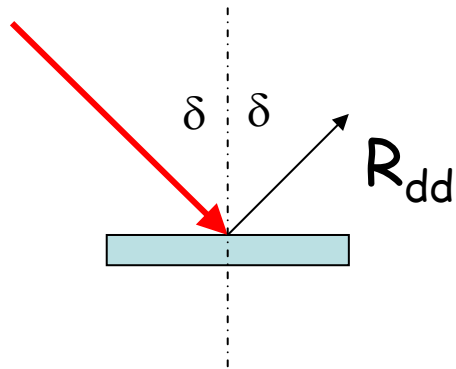
Misura del flusso di un fascio diffuso

DATO CHE LA LUCE RIFLESSA DA UN CAMPIONE DIPENDE DALLA SUA RIFLETTANZA, LA SFERA INTEGRATRICE MISURA ANCHE LA RIFLETTANZA DI UN CAMPIONE QUALSIASI.

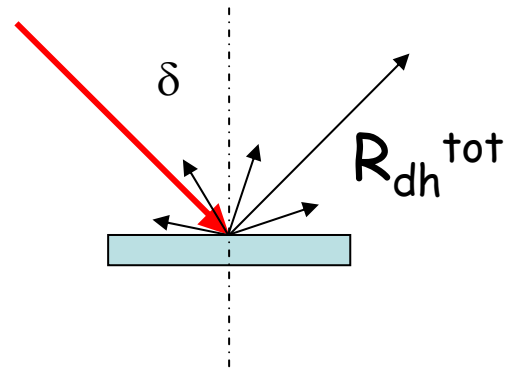
...

PRIMA DI VEDERE COME, DEFINIAMO ALCUNE GRANDEZZE:

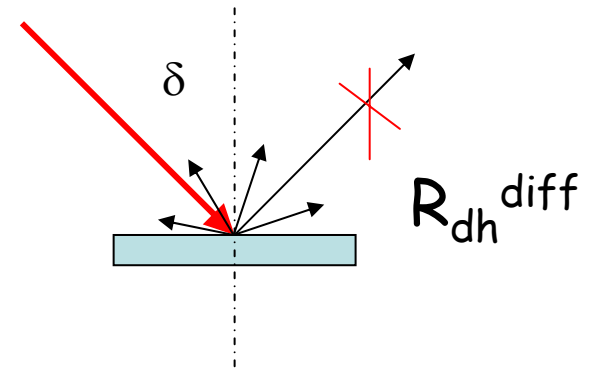
RIFLETTANZA E TRASMITTANZA IN LUCE DIRETTA



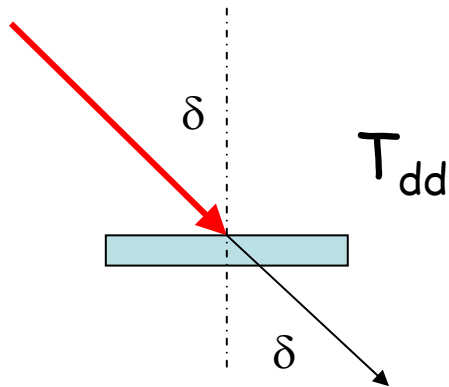
Riflettanza speculare
(funzione di δ)



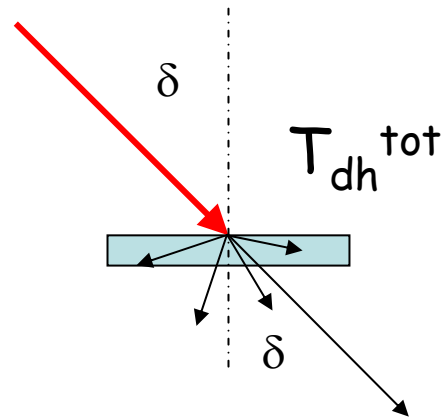
Riflettanza totale
direzionale/emisferica
d/h (funzione di δ)



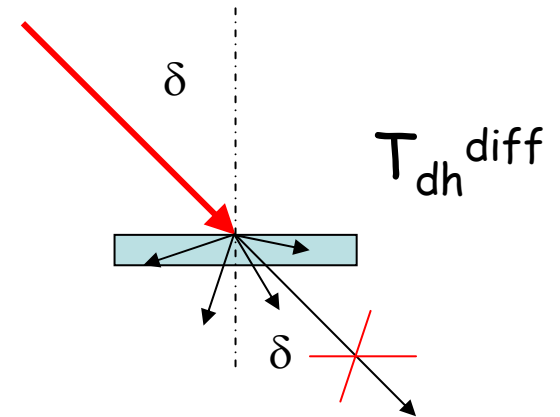
Riflettanza diffusa
direzionale/emisferica
d/h



Trasmittanza diretta
(funzione di δ)

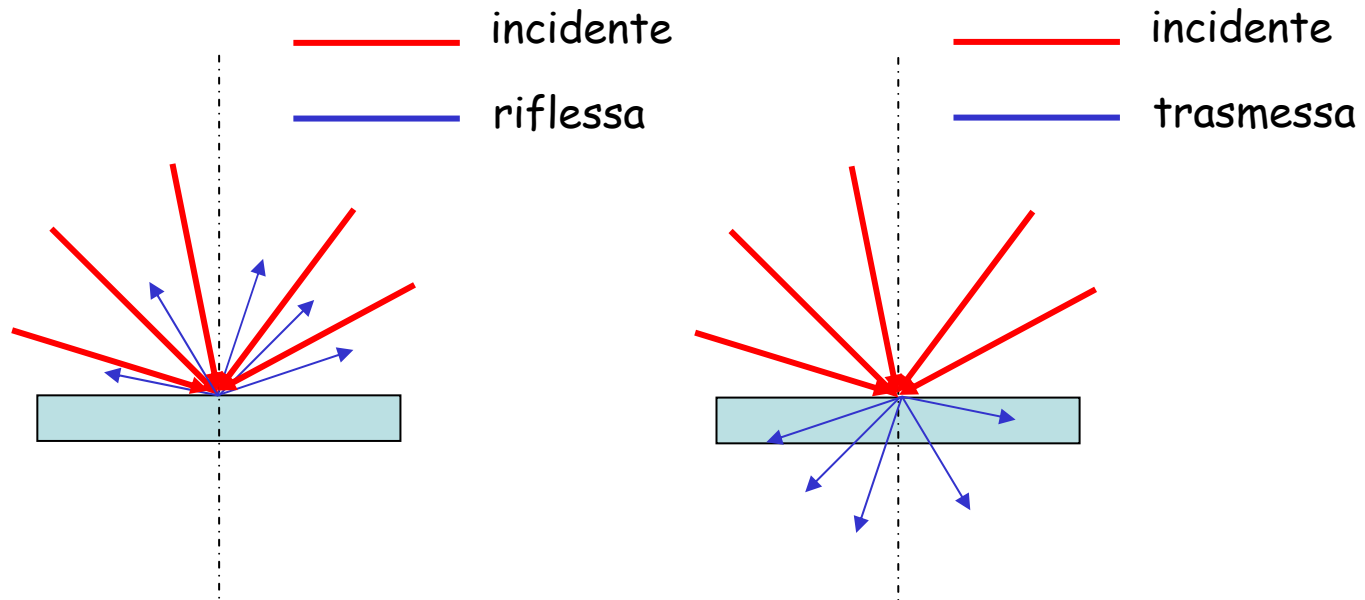


Trasmittanza totale
direzionale/emisferica
d/h (funzione di δ)



Trasmittanza diffusa
direzionale/emisferica
d/h (funzione di δ)

RIFLETTANZA E TRASMITTANZA IN LUCE DIFFUSA



Riflettanza totale
emisferica/emisferica
h/h

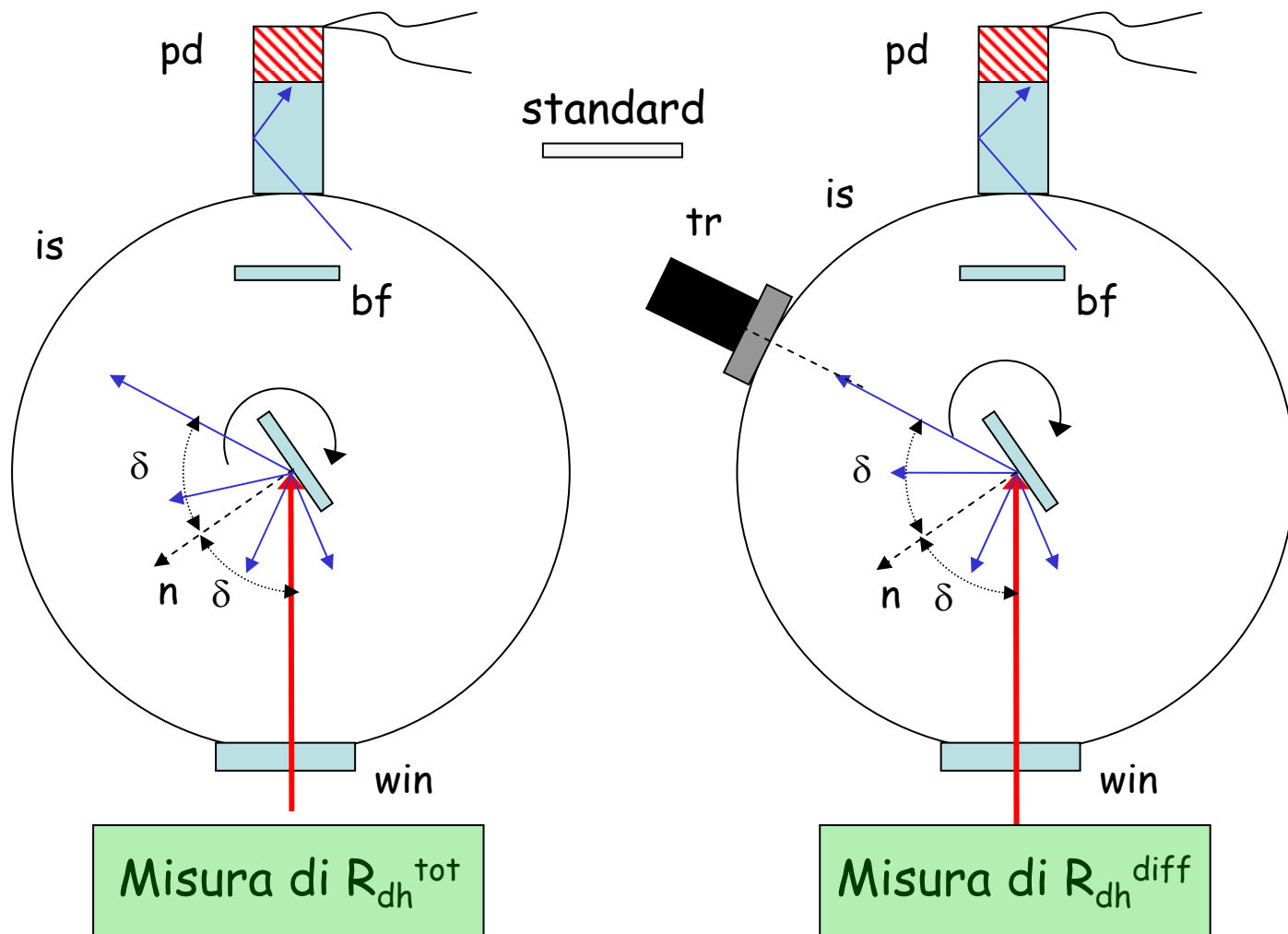
$$R_{hh}$$

Trasmittanza totale
emisferica/emisferica
h/h

$$T_{hh}$$

MISURE IN LUCE DIRETTA SU CAMPIONI PICCOLI

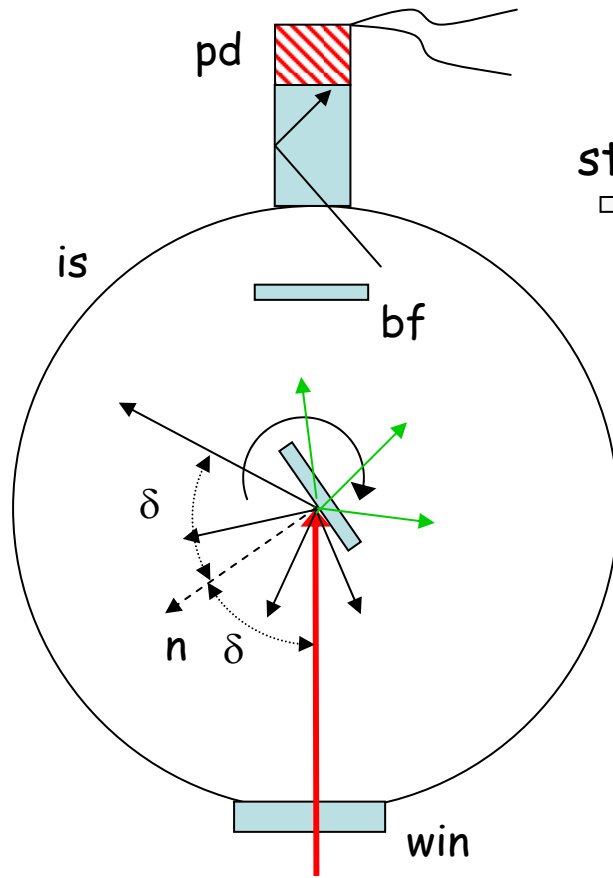
SFERA INTEGRATRICE PER LA MISURA DI R, A (Campione opaco, T=0)



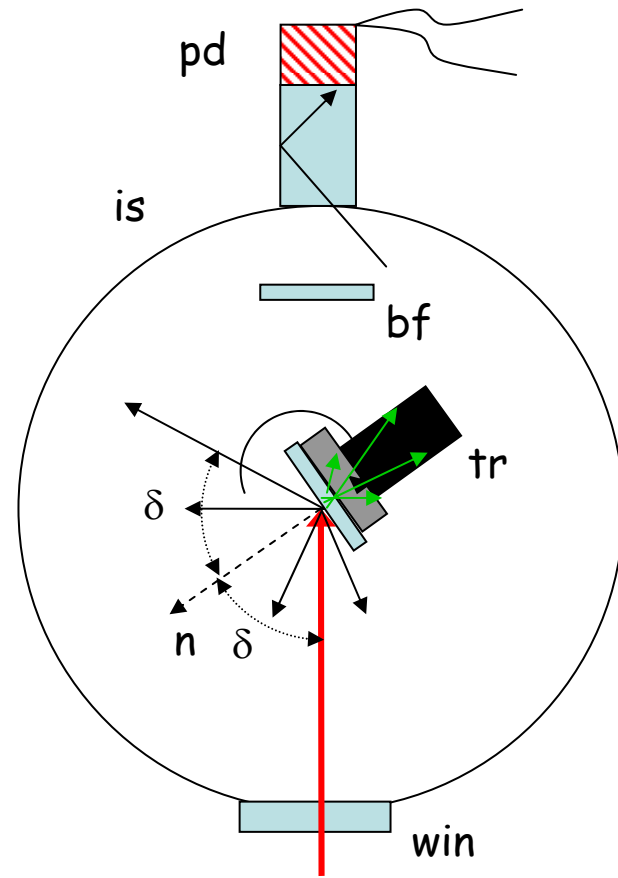
$$A_{dh} = 1 - R_{dh}^{tot}$$

$$R_{dd} = R_{dh}^{tot} - R_{dh}^{diff}$$

SFERA INTEGRATRICE PER LA MISURA DI R, T, A (Campione semitrasparente)



standard



Misura di $R_{dh}^{tot} + T_{dh}^{tot}$

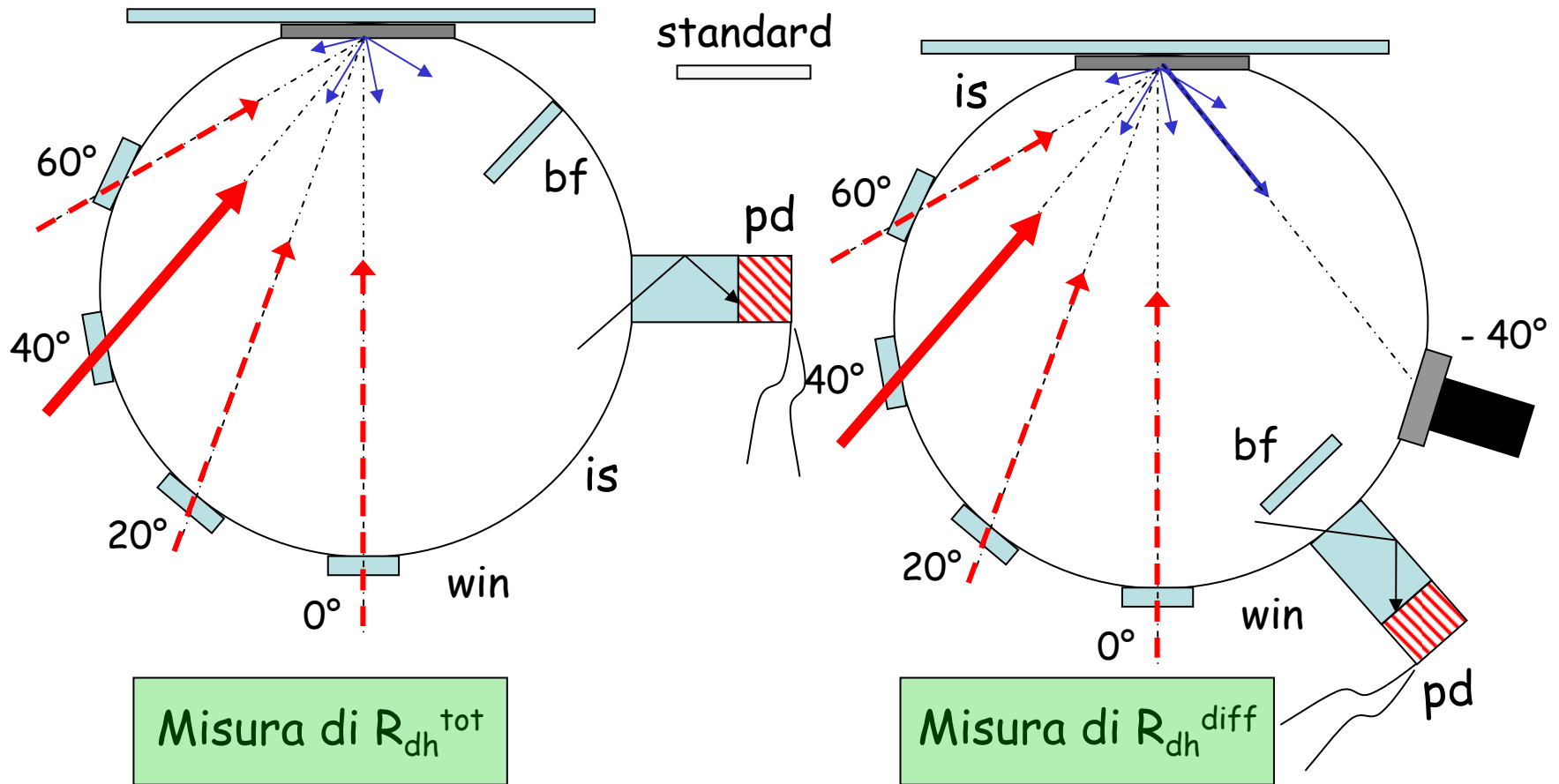
$$A_{dh}^{tot} = 1 - (R_{dh}^{tot} + T_{dh}^{tot})$$

Misura di R_{dh}^{tot}

$$T_{dh}^{tot} = 1 - A_{dh}^{tot} - R_{dh}^{tot}$$

MISURE IN LUCE DIRETTA SU CAMPIONI GRANDI

SFERA INTEGRATRICE PER LA MISURA DI R, A (campione opaco)



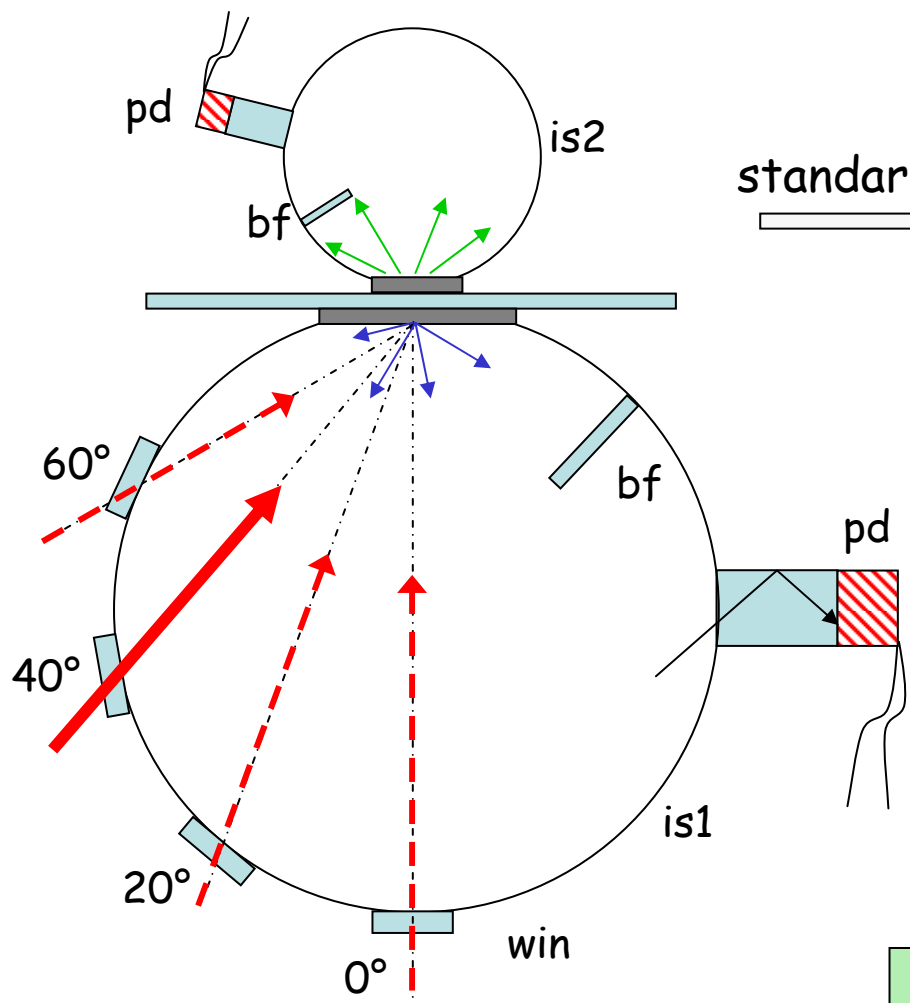
Misura di R_{dh}^{tot}

Misura di R_{dh}^{diff}

$$A_{dh} = 1 - R_{dh}^{tot}$$

$$R_{dd} = R_{dh}^{tot} - R_{dh}^{diff}$$

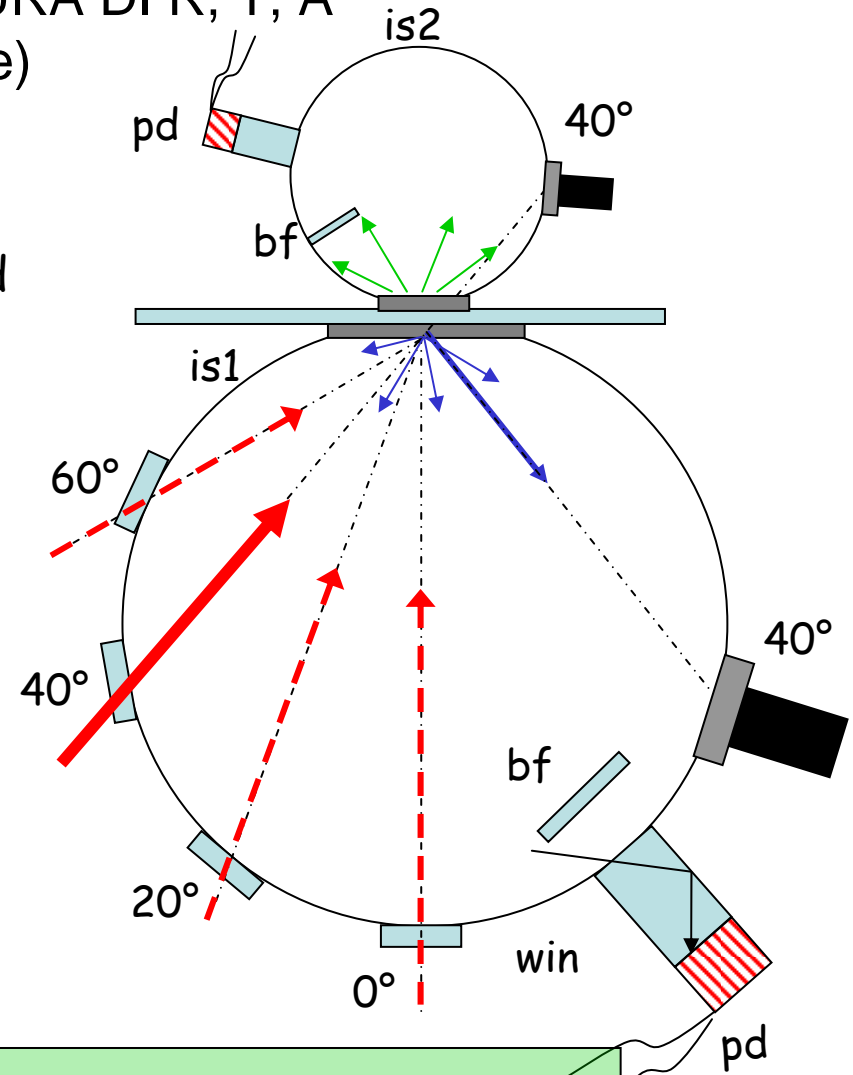
SFERA INTEGRATRICE PER LA MISURA DI R, T, A (campione semitrasparente)



Misura di R_{dh}^{tot} e T_{dh}^{tot}

$$A_{dh} = 1 - R_{dh}^{tot} - T_{dh}^{tot}$$

standard



Misura di R_{dh}^{diff} e T_{dh}^{diff}

$$R_{dd} = R_{dh}^{tot} - R_{dh}^{diff}; \quad T_{dd} = T_{dh}^{tot} - T_{dh}^{diff};$$

$$A_{dh} = 1 - R_{dh}^{diff} - T_{dh}^{diff}$$

Campioni standard di riflettanza come diffusori lambertiani



Diffusori Spectralon (Labsphere)
Serie SRS-xx-030, da 3"



Diffusori Spectralon (Labsphere)
Serie SRS-xx-020, da 2"

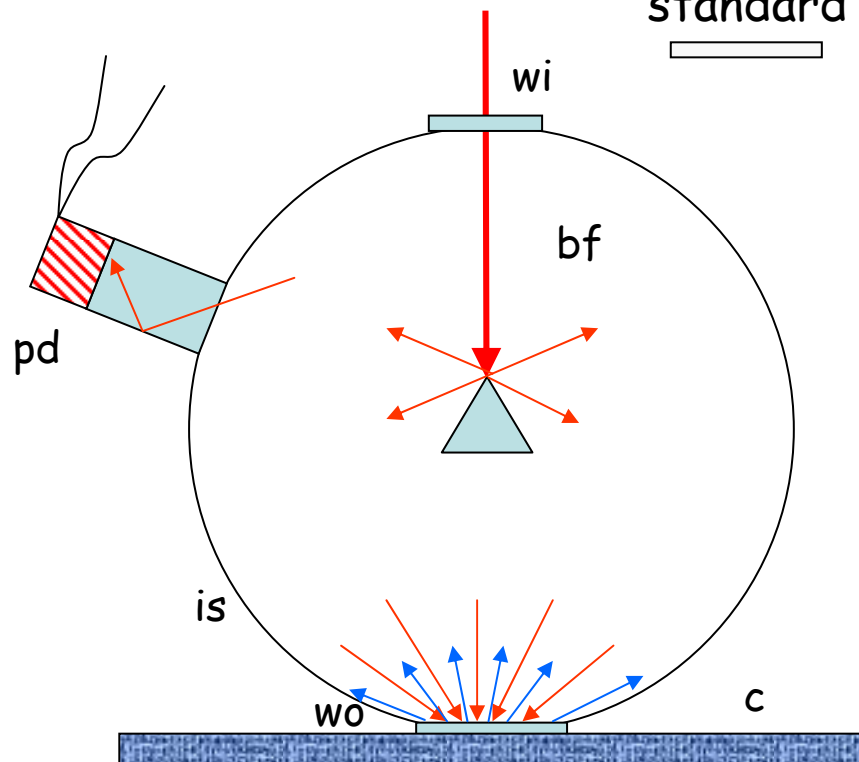
Serie SRS-xx-

xx = 2%, 5%, 10%, 20%, 40%, 60%, 80%, 99%

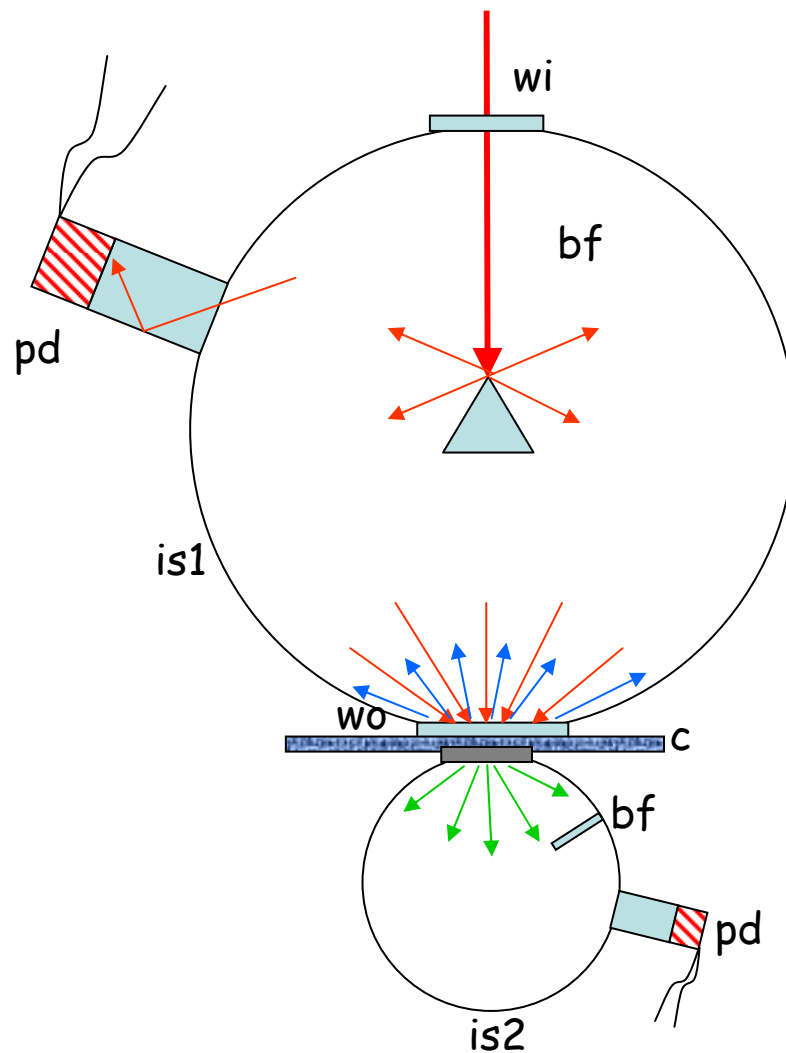
MISURE IN LUCE DIFFUSA

SFERA INTEGRATRICE PER LA MISURA DI R, T

standard



Misura di R_{hh}



Misura di T_{hh} e R_{hh}

BREVE PANORAMICA DELLE APPARECCHIATURE
OTTICHE SVILUPPATE DA ME ALL'ENEA DI PORTICI
PER LA CARATTERIZZAZIONE DI CAMPIONI FOTOVOLTAICI

MISURE OTTICHE DI RIFLETTANZA E TRASMITTANZA CON LA SFERA INTEGRATRICE.

REALIZZATI DIVERSI RIFLETTOMETRI:

Il Riflettometro ROSE


Il Riflettometro ARDR

Il Riflettometro CAR

Il Riflettometro PROM

Il Riflettometro SIR
(misure simultanee di riflettanza e corrente)

Il Riflettometro HERE



Misure ottiche
in luce diretta

Misure in luce diffusa

RIFLETTOMETRO ROSE (patented)

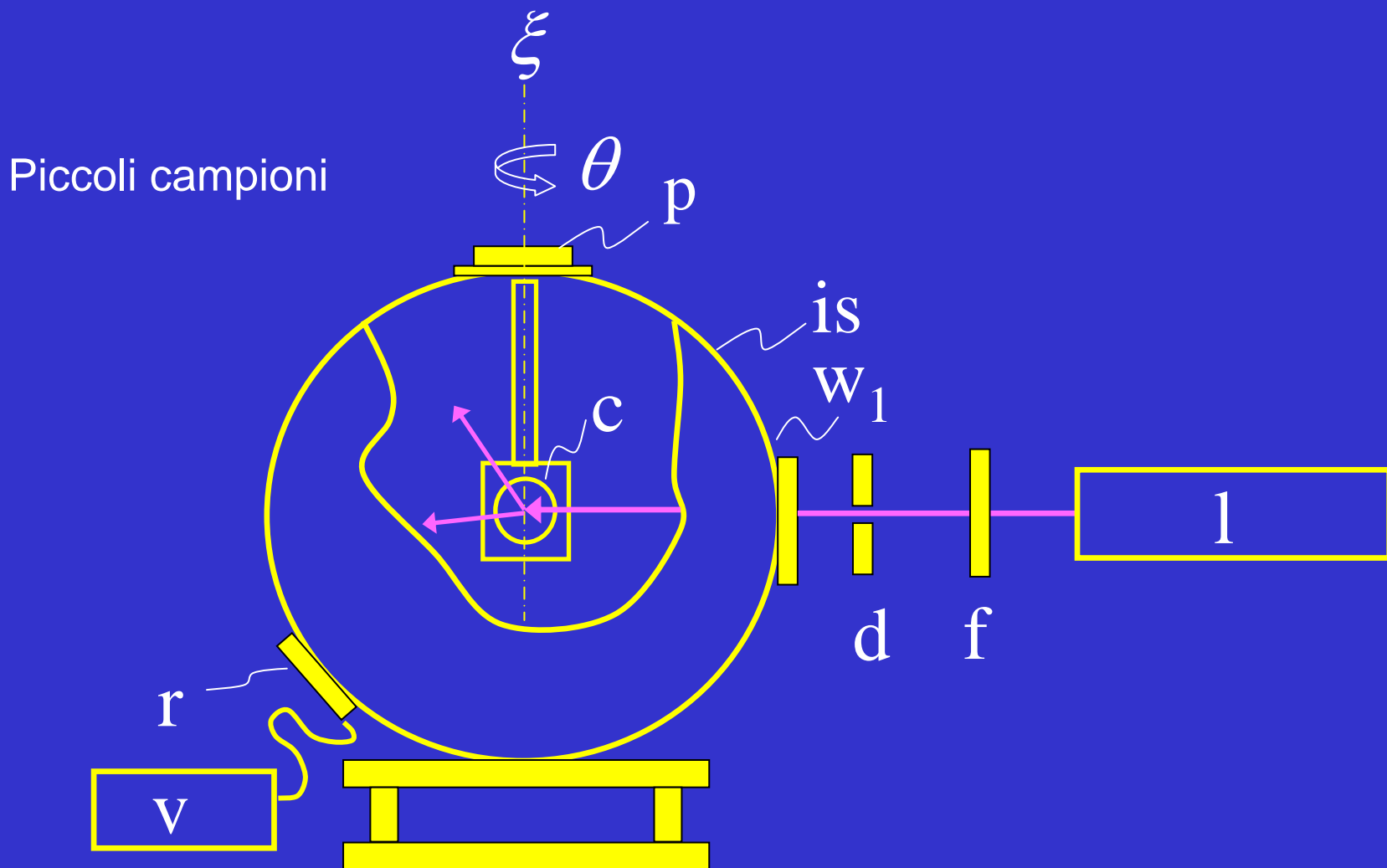
(Reflectometer for Optical measurements in Solar Energy)

A che cosa serve?

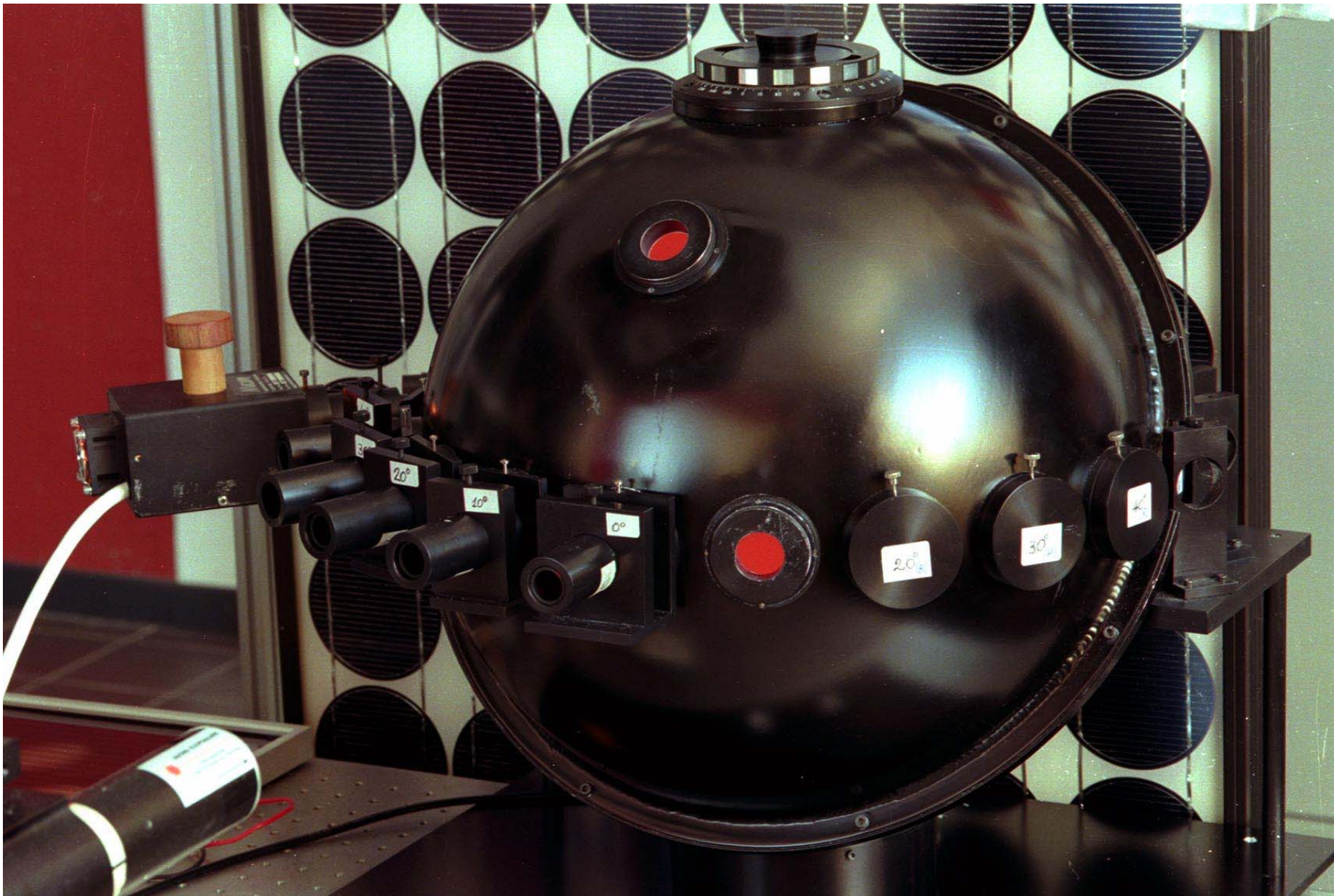


- * Riflettanza, trasmittanza, direzionale/emisferica, totale, diffusa, su piccoli e grandi campioni;
- * Assorbanza direzionale/emisferica, su piccoli e grandi campioni;
- * Misure ad angolo variabile continuo per piccoli campioni;
- * Misure ad angolo variabile discreto da 0° a 70° , step di 10° , per grandi campioni.

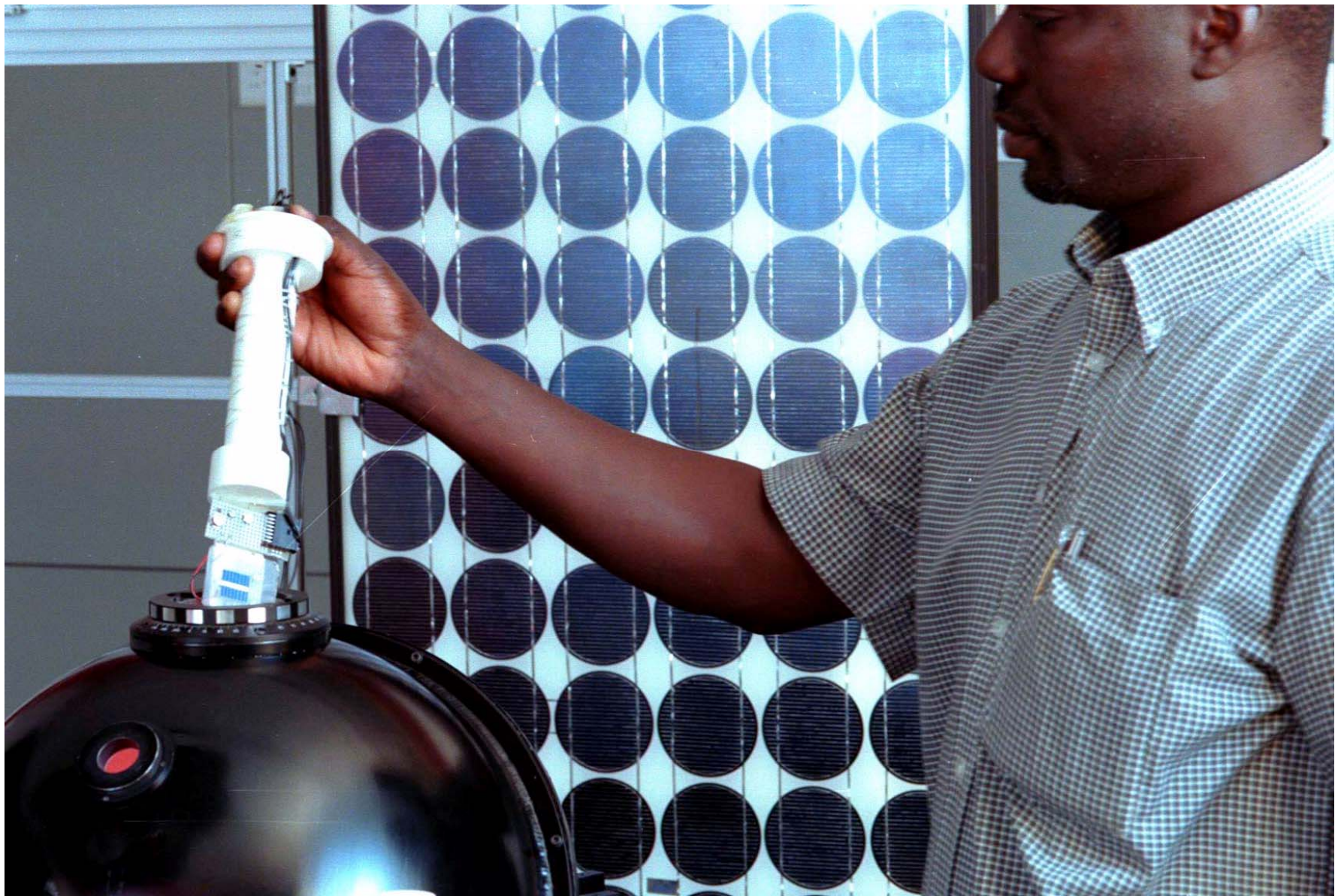
RIFLETTOMETRO ROSE



Misure di R (light trapping), A vs. θ , λ su celle solari, TCO/glass.

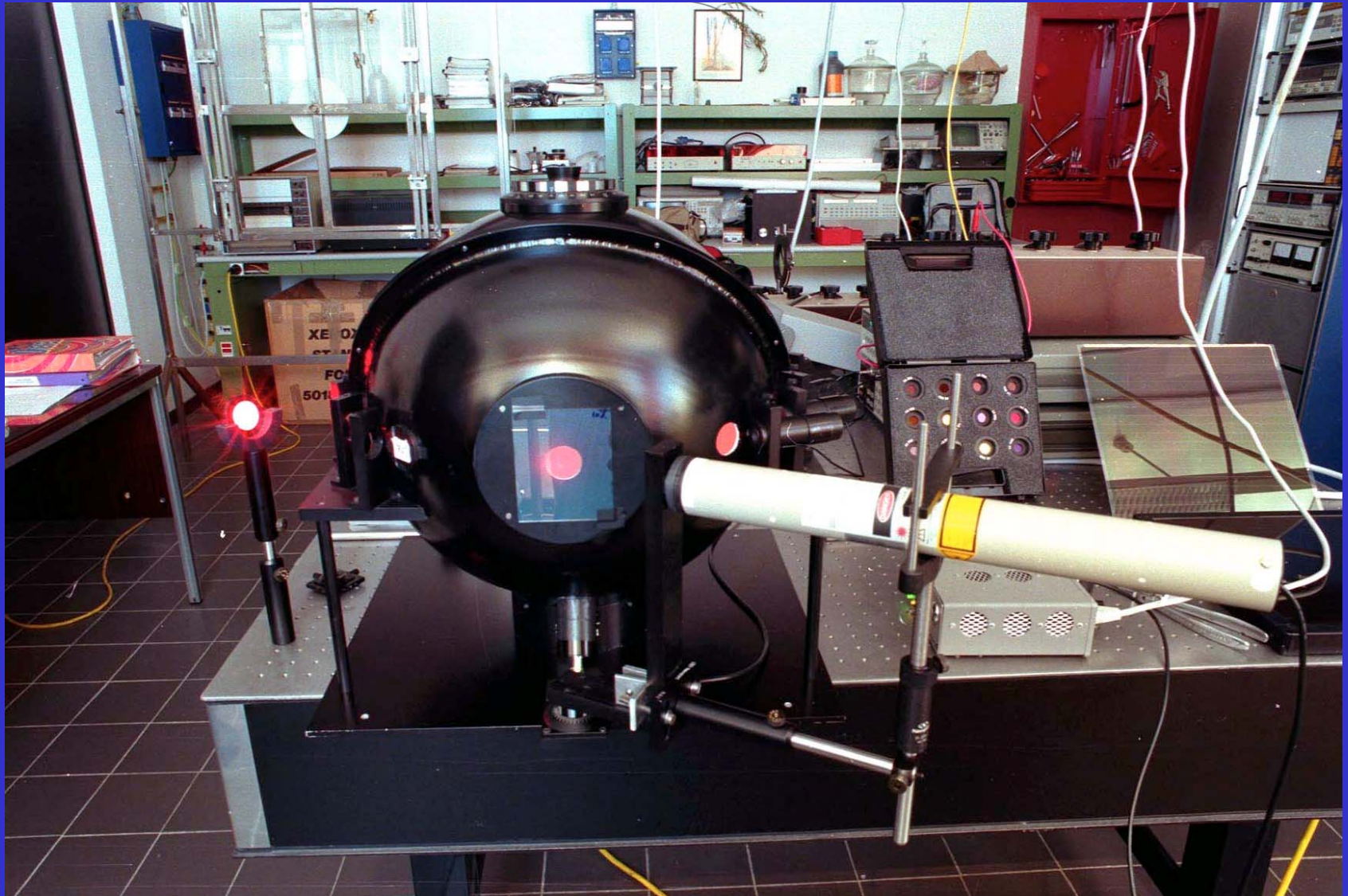


Fascio di luce laser diretto dentro la sfera integratrice.



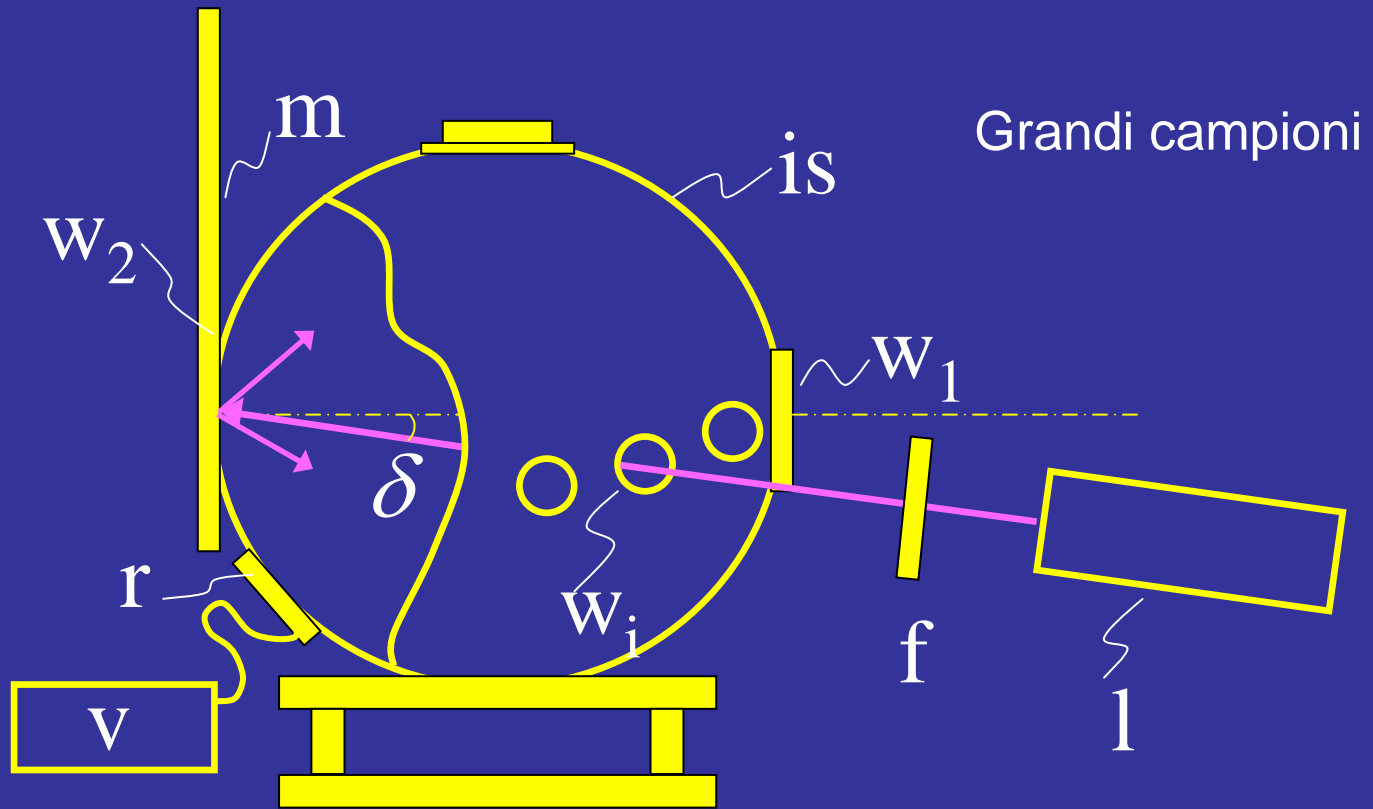
Portacampioni con montata una cella solare per misure di riflettanza, ed eventualmente di fotocorrente.

RIFLETTOMETRO ROSE



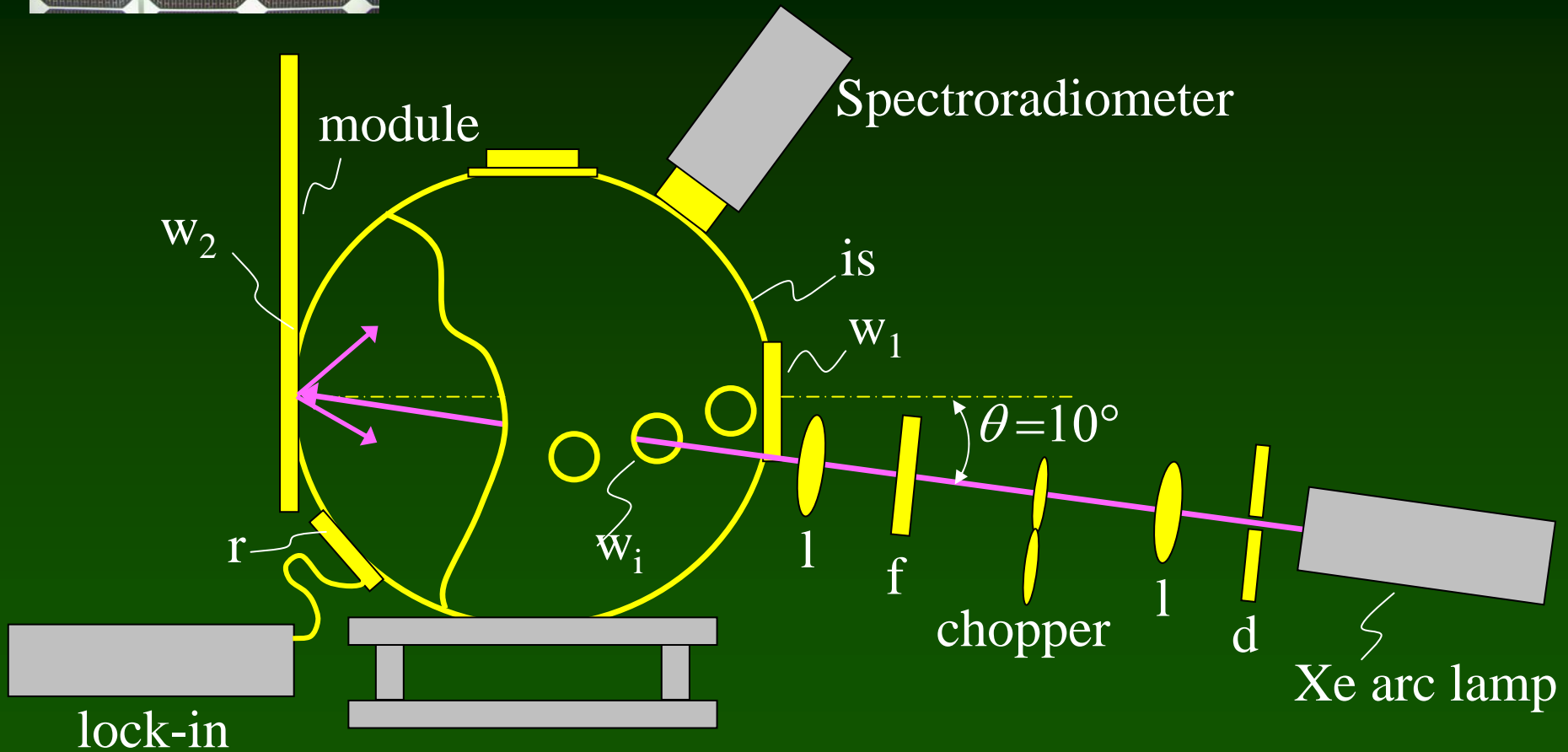
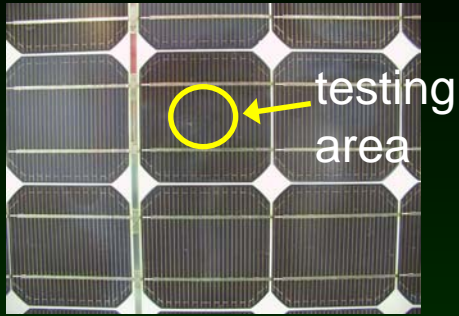
Riflettometro ROSE applicato alla misura di trasmittanza T vs. θ .
E' mostrato un campione di TCO/vetro.

RIFLETTOMETRO ROSE



Misure di R vs. δ , λ su su campioni di larga area
(moduli FV, vetri, lenti di Fresnel).

RIFLETTOMETRO "ROSE"



RIFLETTOMETRO ROSE



Misura di riflettanza R vs. δ .

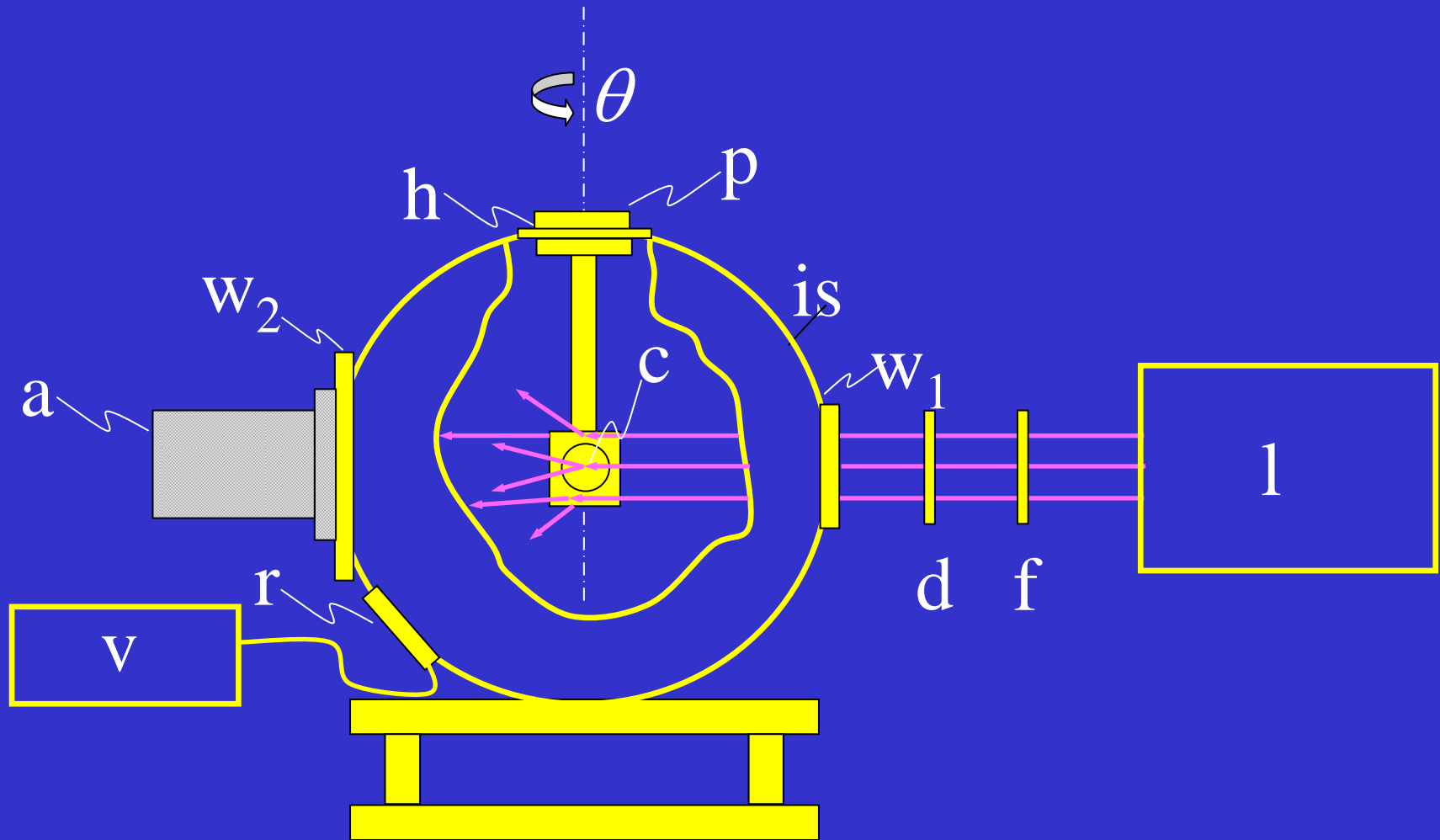
RIFLETTOMETRO ARDR (patented)
(Angle-Resolved Differential Reflectometer)

A che cosa serve?



- * Riflettanza direzionale/emisferica, totale, su piccoli campioni;
- * Misure ad angolo variabile continuo da 0° a 90°.

RIFLETTOMETRO ARDR



Metodo adatto per misure su campioni di piccola area di R vs. θ , λ senza limiti sull'angolo d'incidenza (0° - 90°). Il metodo ARDR è ideale per campioni otticamente eterogenei.

RIFLETTOMETRO ARDR

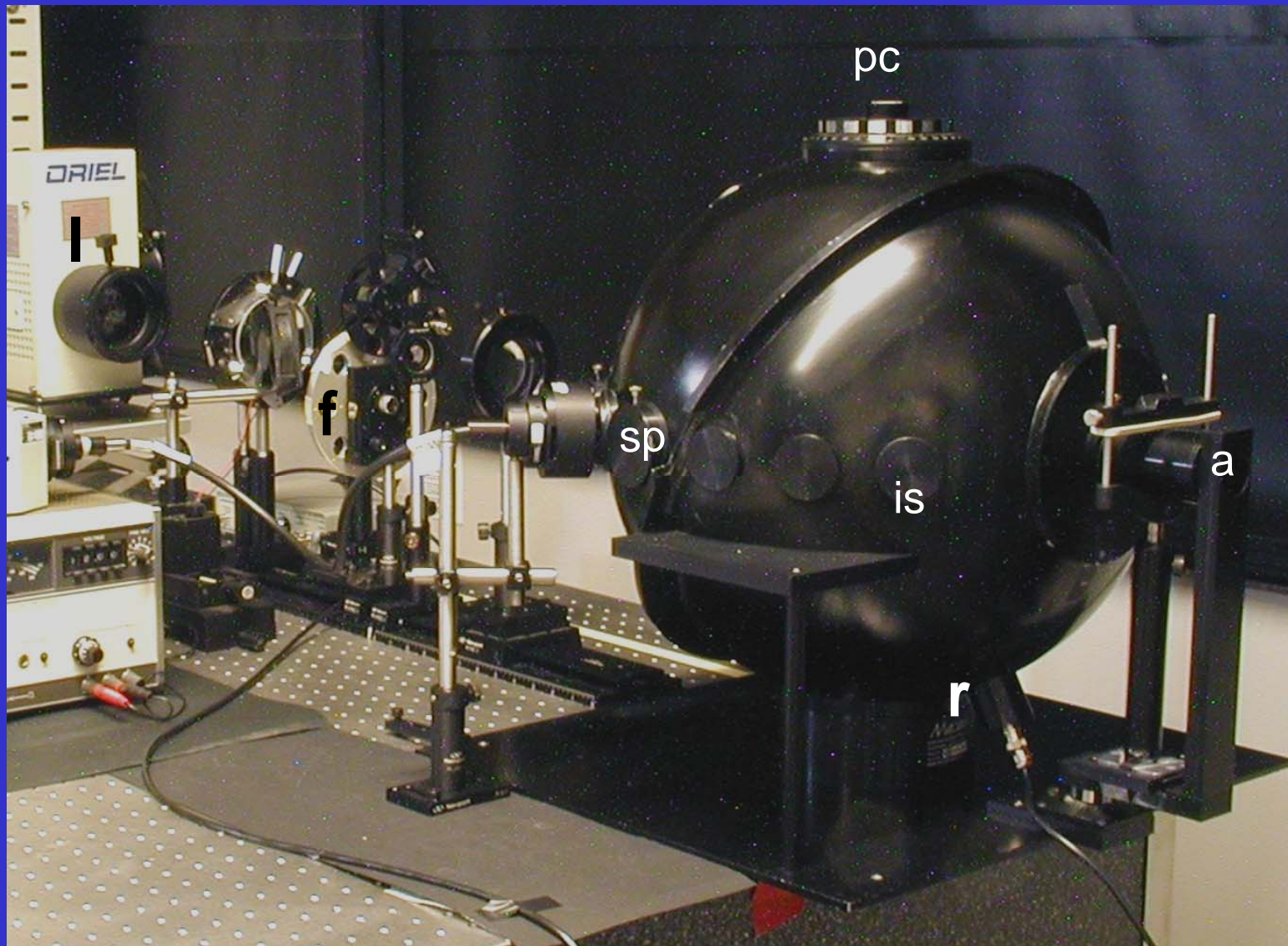


Foto del riflettometro ARDR impiegato per misure di R vs. θ , λ su celle solari testurizzate piane.

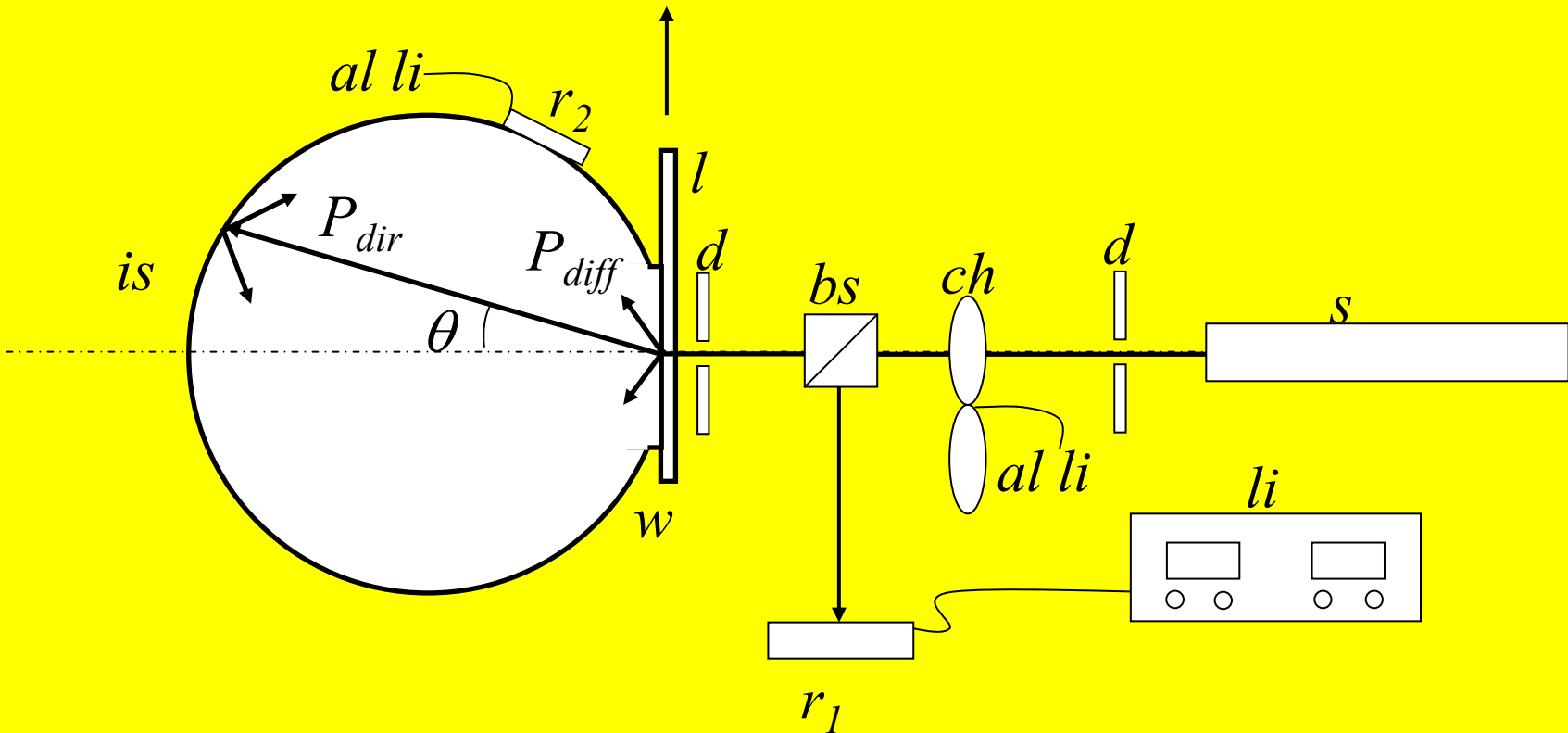
APPARATO CAR
(Continuous Angle Reflectometer)

A che cosa serve?



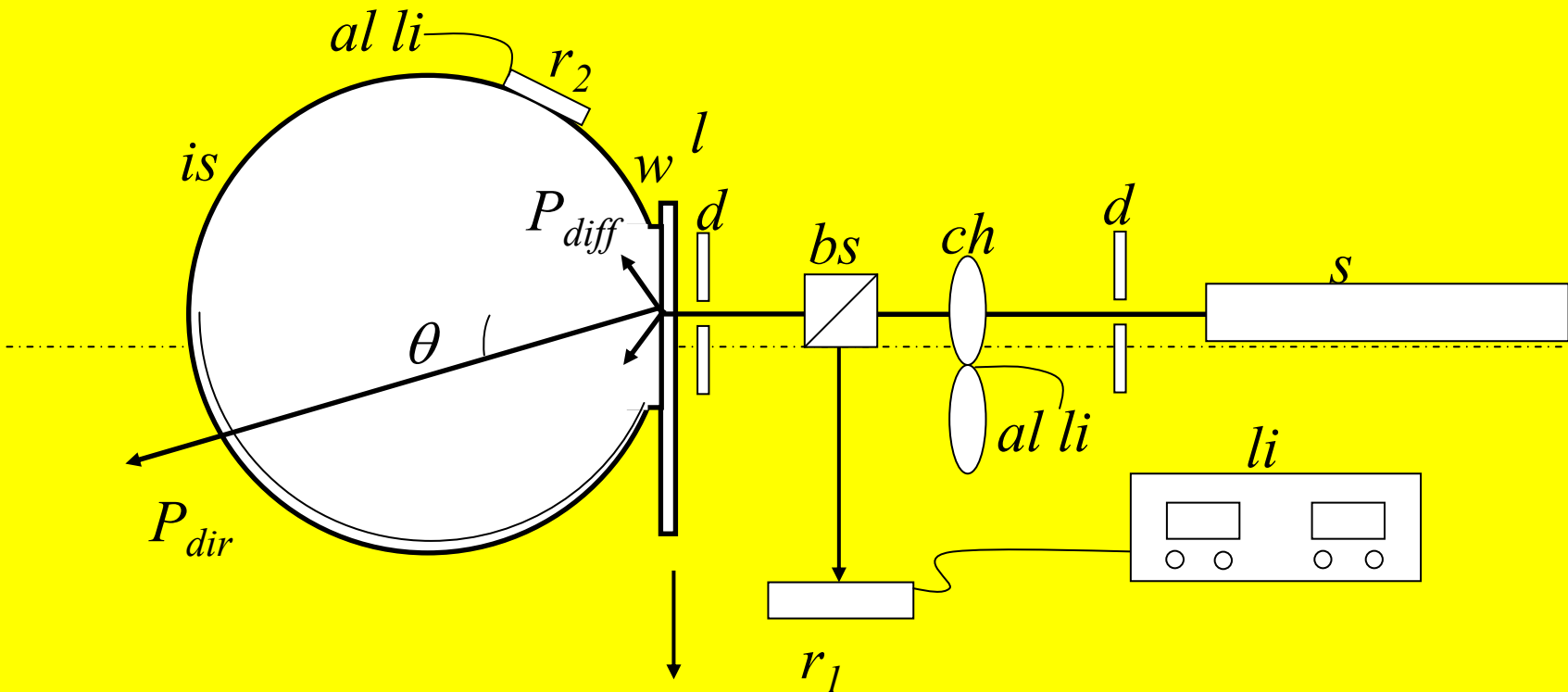
- * Riflettanza, trasmittanza, direzionale/emisferica, totale, diffusa, su piccoli e grandi campioni;
- * Assorbanza direzionale/emisferica, su piccoli campioni;
- * Misure ad angolo variabile continuo di riflettanza e trasmittanza, totale e diffusa, su piccoli campioni;
- * Misure ad angolo variabile continuo di riflettanza totale e trasmittanza totale e diffusa su grandi campioni.

APPARATO CAR



Riflettometro CAR nella configurazione per la misura della trasmissione totale di una lente di Fresnel.

APPARATO CAR



Riflettometro CAR nella configurazione per la misura della sola trasmissione diffusa di una lente di Fresnel.

La sfera è dotata di una fenditura attraverso la quale viene estratto il raggio trasmesso diretto.

APPARATO CAR



APPARATO CAR



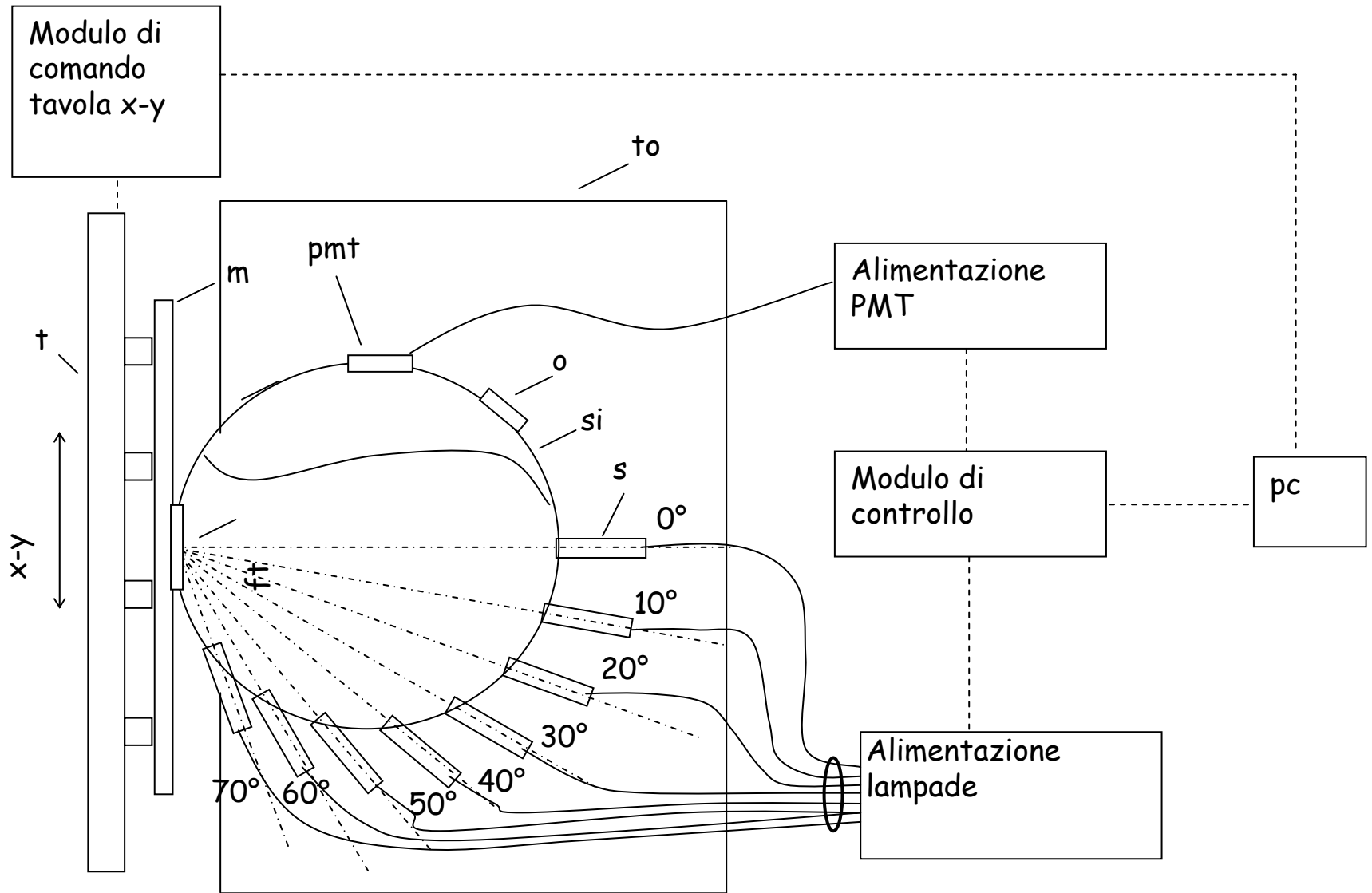
APPARATO PROM (patented)
(Pulsed Reflectometer for Optical Mapping)

A che cosa serve?

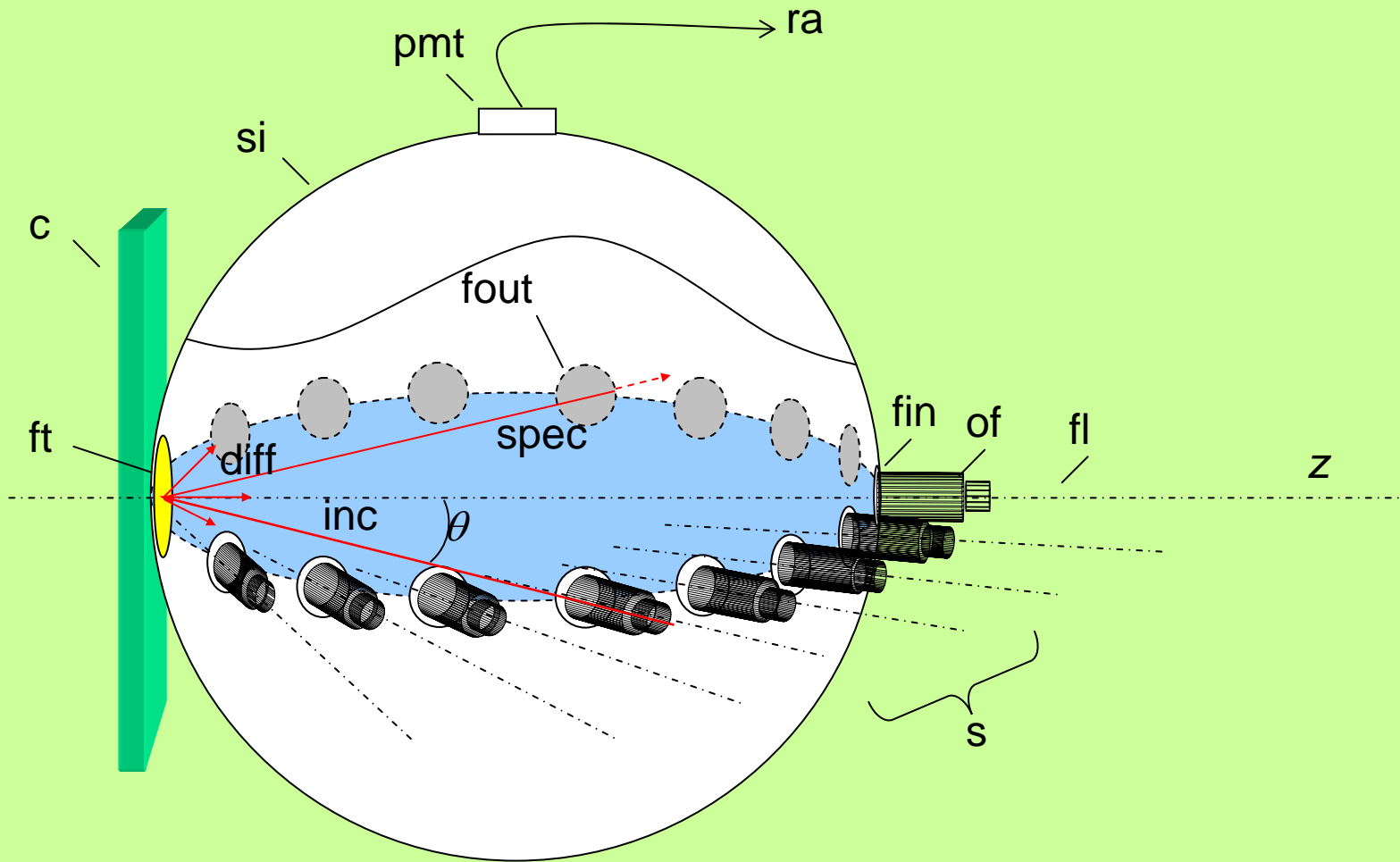
- Misure ottiche di riflettanza totale e diffusa su campioni di larga area;
- Mappatura ottica veloce di moduli fotovoltaici al silicio cristallino;
- Mappatura ottico / elettrica veloce di moduli fotovoltaici al silicio amorfo.



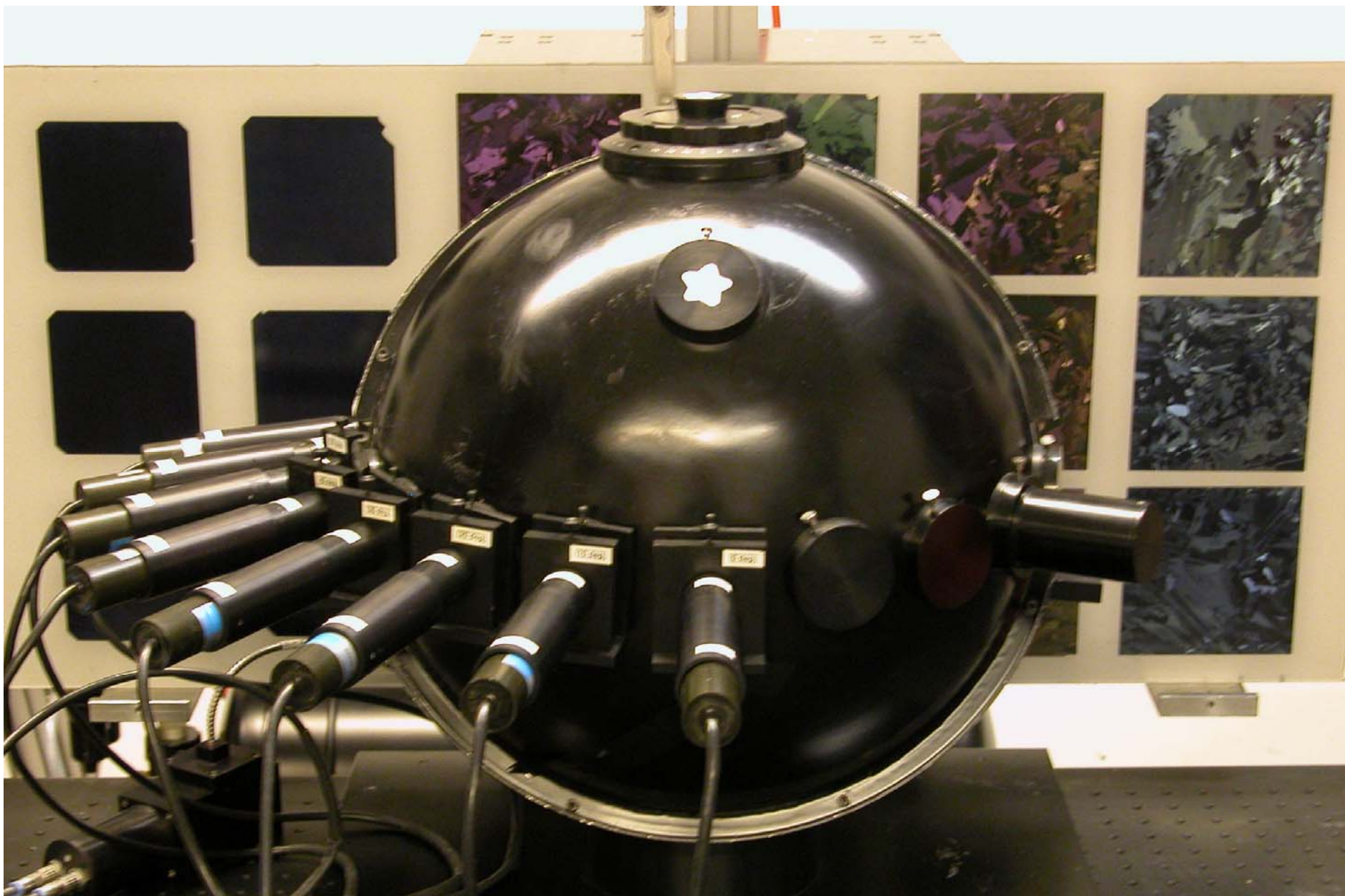
APPARATO PROM



APPARATO PROM



APPARATO PROM



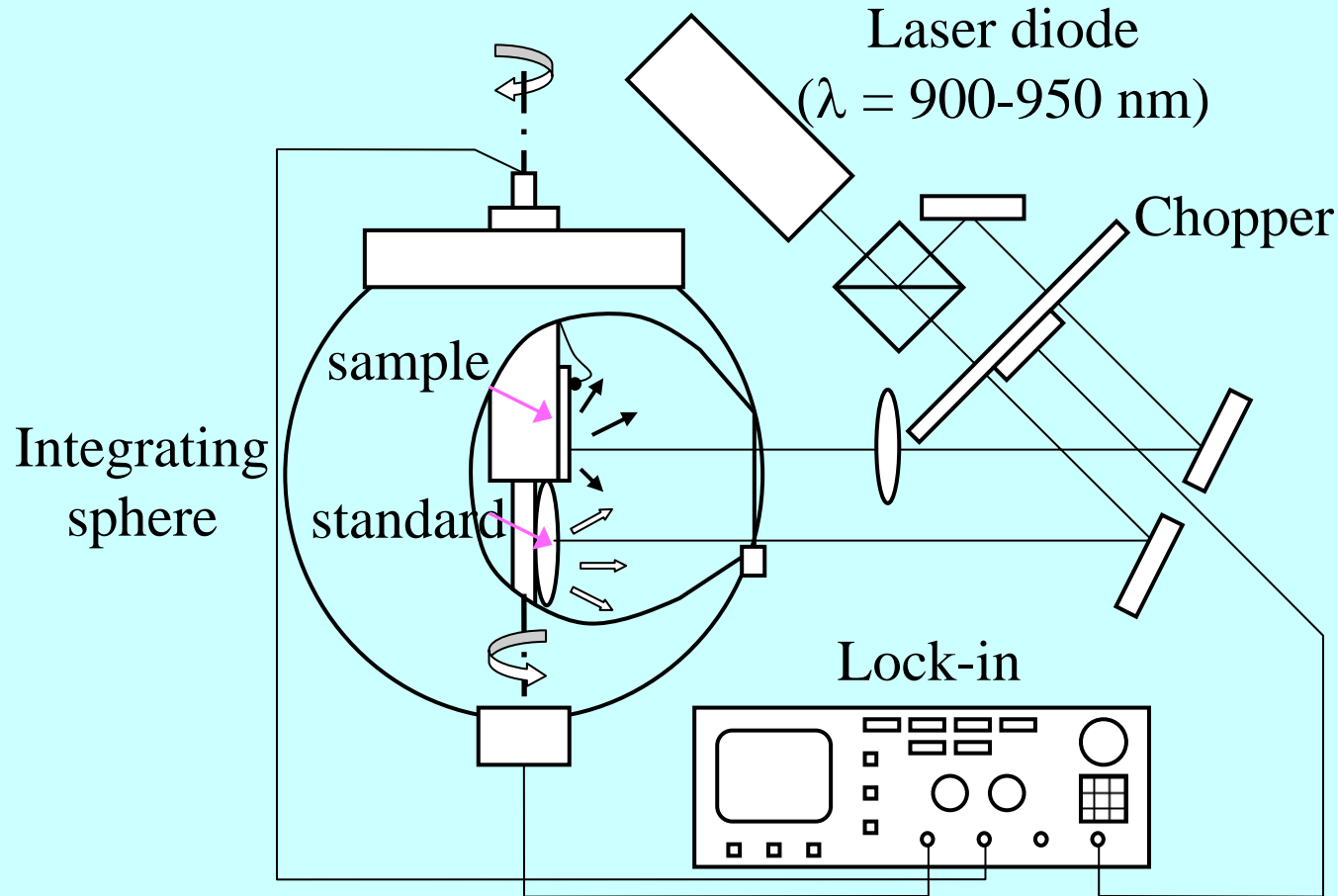
APPARATO SIR (patented)
(Simultaneous I / R apparatus)

A che cosa serve?

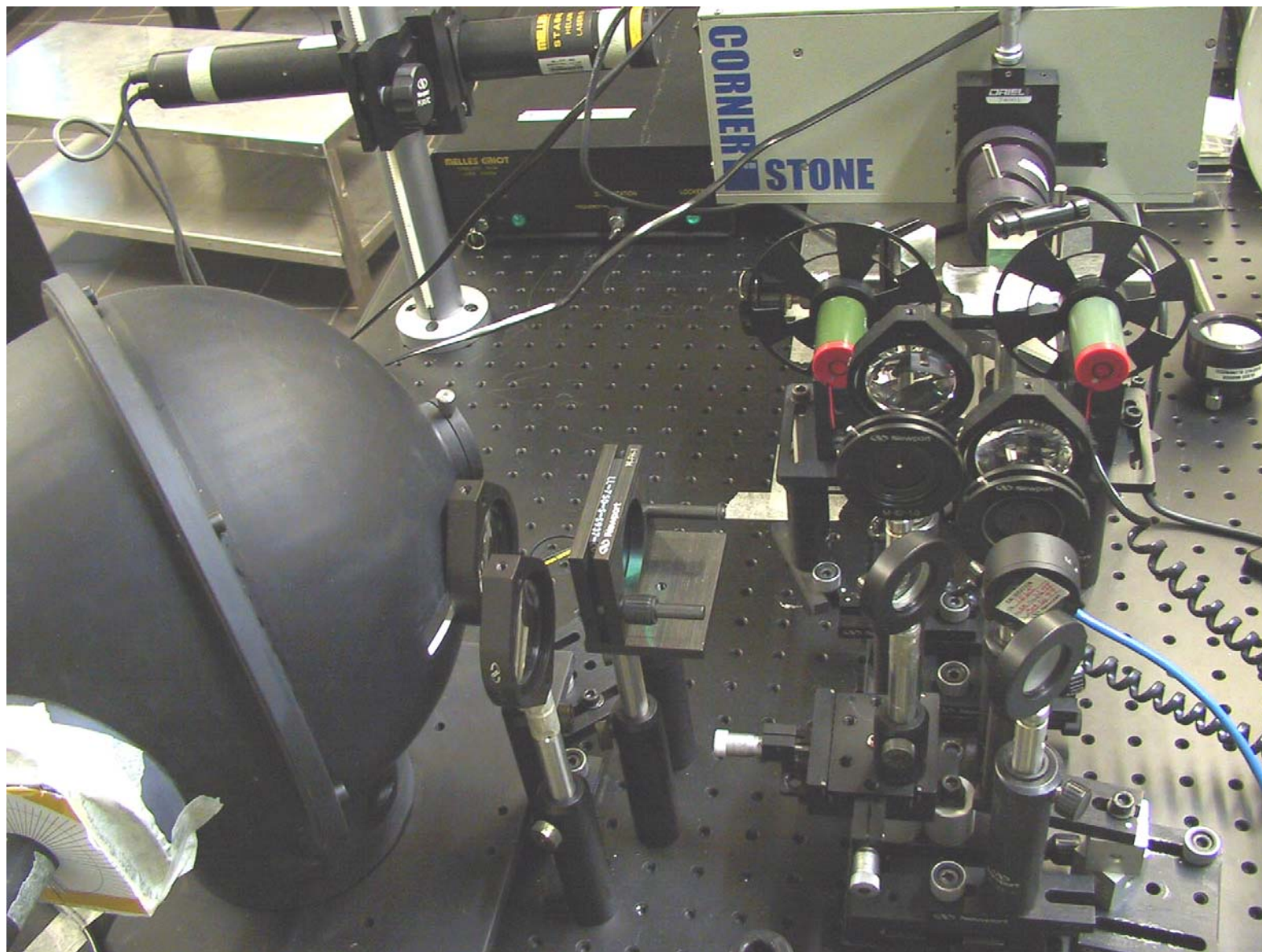


- * Misure ottiche (riflettanza totale) ed elettriche (corrente di corto circuito) simultanee, ad angolo d'incidenza variabile, su celle solari;
- * Scopo: Ridurre al massimo gli errori associati a misure separate di riflettanza e corrente, e derivanti da errori sistematici sull'impostazione dell'angolo d'incidenza e della regione illuminata.

APPARATO SIR



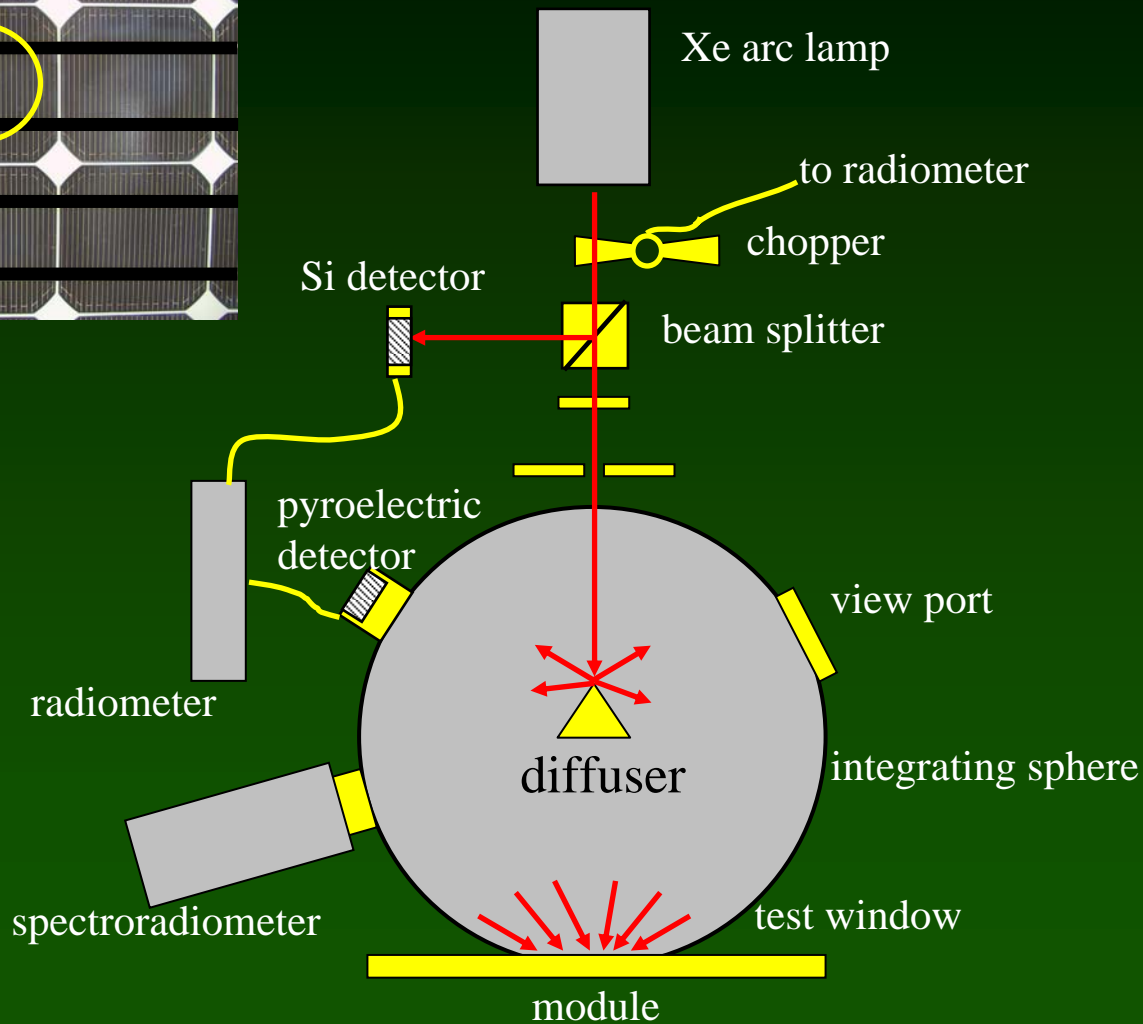
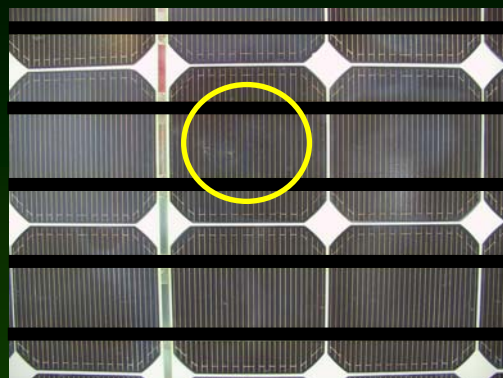
Apparato per la misura simultanea della riflettanza $R(\theta, \lambda)$ e della corrente $I_{sc}(\theta, \lambda)$ esterna di una cella solare. Dalle curve di corrente interna risolta in angolo si può ricavare il parametro di lunghezza di diffusione.



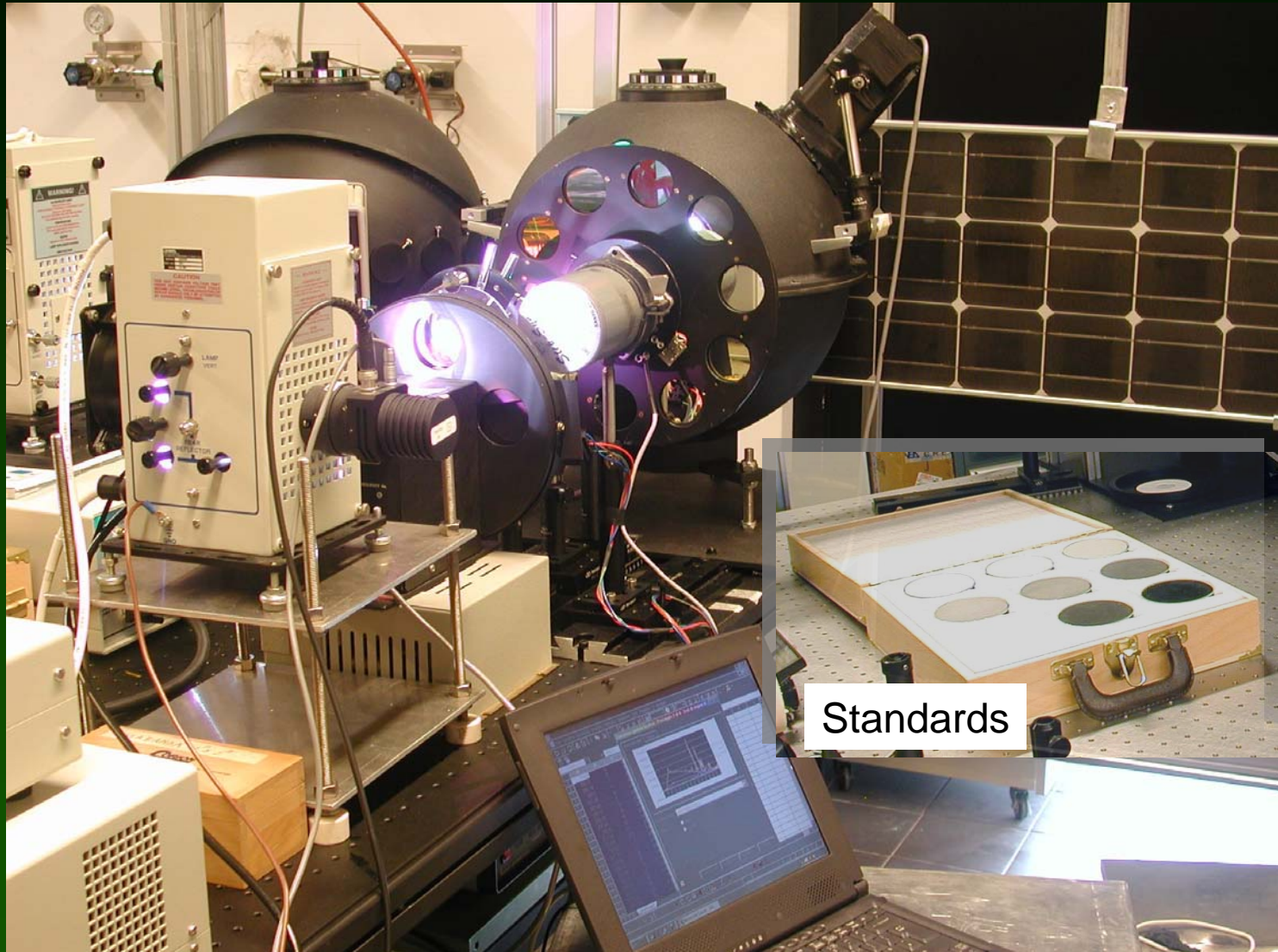
Visione d'insieme dell'apparato SIR

APPARATO HERE

RIFLETTOMETRO "HERE" "HEmispherical / HEmispherical REflectometer"



RIFLETTOMETRO "HERE"



Standards