

La disinfezione dell'aria in respiratori e condotti di aria condizionata: design innovativi e simulazioni ottiche

Matteo Lombini

Andrea Bianco, Fausto Cortecchia, Adriano De Rosa, Emiliano Diolaiti, Mauro Fiorini, Luigi Lessio, Giuseppe Malaguti, Giovanni Pareschi, Alessio Zanutta

OAS Bologna, OAPadova, OABrera, IAPS Milano

Inizio delle attività



Nel bando 'Innova per l'Italia' del marzo 2020, si invitavano, tra gli altri, gli Enti di Ricerca a contribuire nell'ambito di:

Tecnologie e strumenti che consentano o facilitino il monitoraggio, la prevenzione, il trattamento e il controllo del Covid-19.

Le attività INAF riguardanti l'inattivazione dei patogeni nell'aria mediante irraggiamento con luce UVC partono dall'idea di un dispositivo per la disinfezione di fluidi, brevettato nel maggio 2020

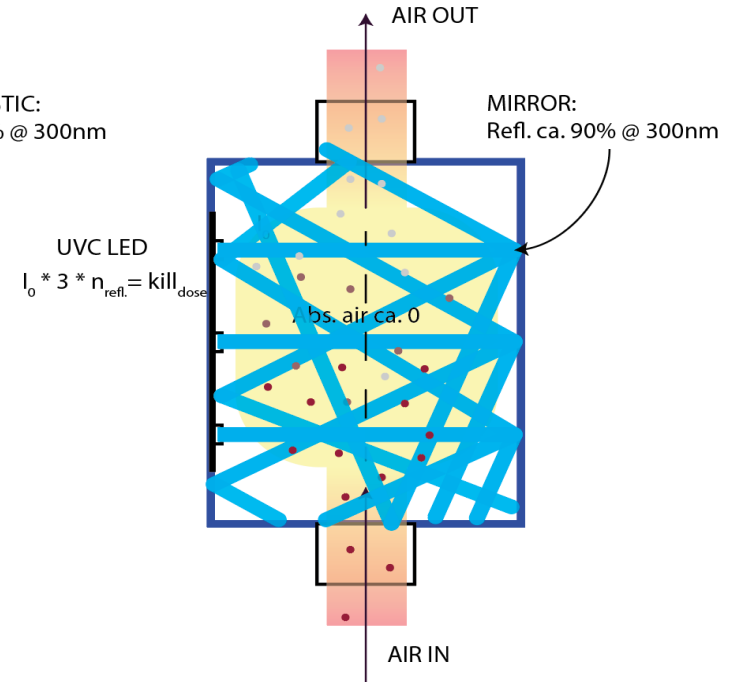
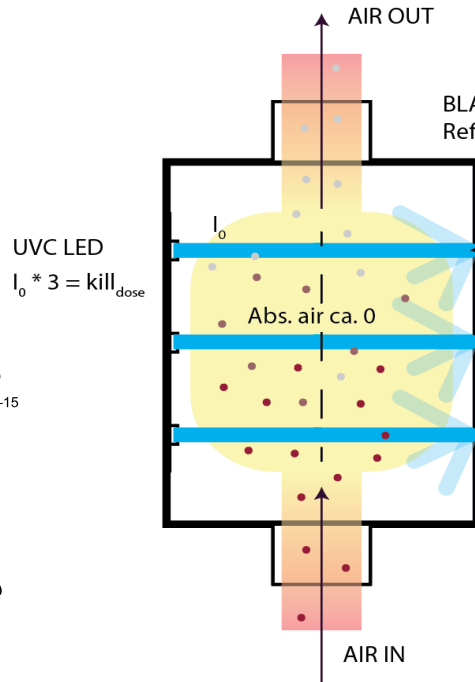
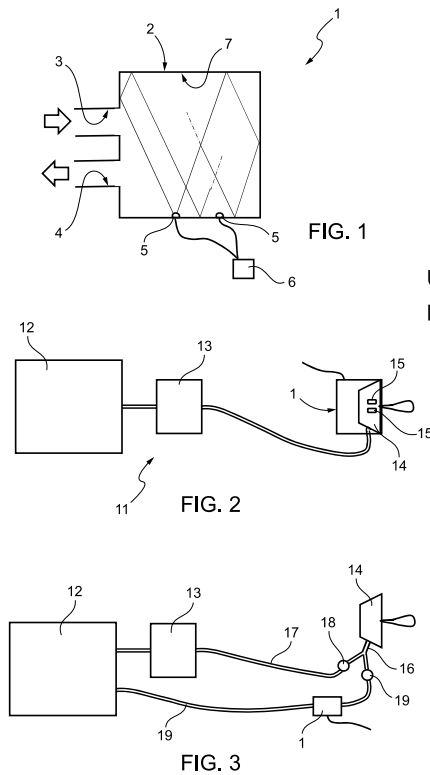
La caratteristica (innovativa) di questo dispositivo è l'utilizzo di una **cavità** con superfici interne altamente **riflettenti** e illuminata con sorgenti UVC **LED**, in modo da produrre un effetto **moltiplicativo** dell'intensità di illuminazione, aumentando l'efficienza di inattivazione dei patogeni trasportati dall'aria che fluisce all'interno della cavità.

La vera innovazione è la simulazione accurata delle prestazioni mediante simulazione numerica tramite programmi di ray tracing

Cavità riflettente

Brevetto INAF - Maggio 2020

Titolo: Dispositivo e metodo per la disinfezione di un flusso di fluido mediante radiazioni uv-c



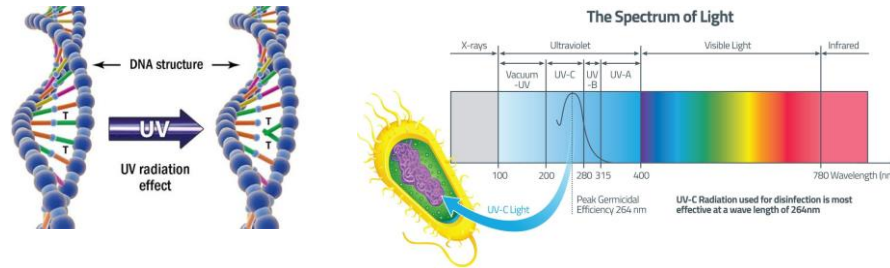
Motivazioni scientifiche e tecniche



- Ci sono evidenze che, per il virus SARS CoV 2, l'aerosol sia uno dei vettori principali di trasmissione e che il virus possa rimanere vivo in sospensione per ore
- Più in generale, la trasmissione aerea dei patogeni è uno dei maggiori problemi della salute pubblica si scala mondiale (ad esempio l'influenza, TBC, ecc.)
- Tra i differenti metodi di inattivazione dei patogeni, l'irraggiamento con radiazione nella banda ultravioletta germicida (UVGI), tra 200nm e 280nm (UVC) è molto efficace
- Nel 1845 si scopre che i microorganismi (animali da infusione) sono sensibili alla luce
- I primi esperimenti documentati di inattivazione dei patogeni con luce ultravioletta sono di Downes and Blunt a partire dal 1877, i quali osservarono che l'esposizione alla luce solare di provette organiche impediva la crescita di microorganismi all'interno
- La sanificazione dell'aria mediante luce UV parte dal 1935 ed è stata studiata o applicata fino ai giorni nostri → Ultra Violet Germicidal Irradiation o **UVGI**

Meccanismi di inattivazione

I meccanismi di inattivazione da irradiazione UVC sono noti



Ogni patogeno ha una differente resistenza alla luce UVC, dovuto ad esempio alla lunghezza della catena DNA o RNA

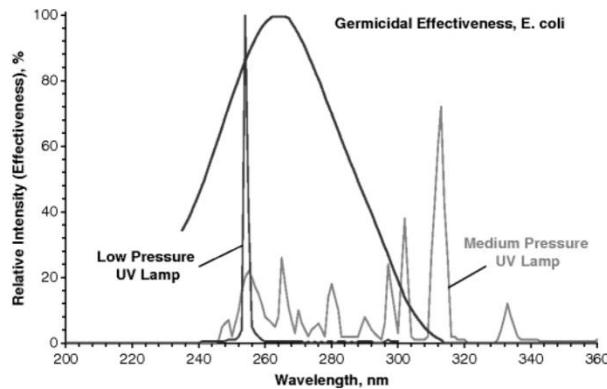
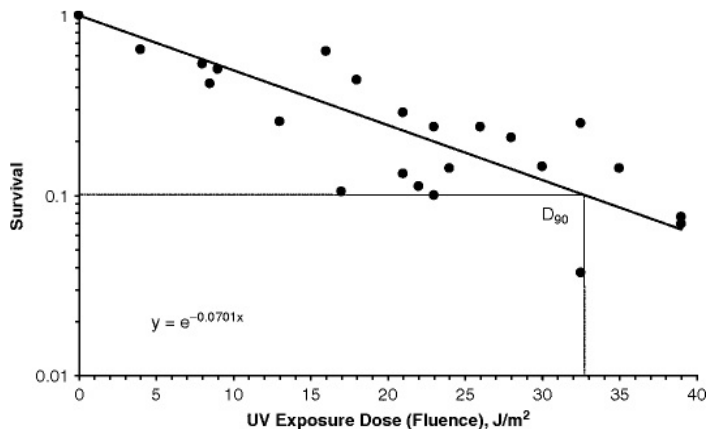


Fig. 2.1 Germicidal efficiency of UV wavelengths, comparing High (or medium) and Low pressure UV lamps with germicidal effectiveness for *E. coli*. Based on data from Luckiesh (1946) and IESNA (2000)

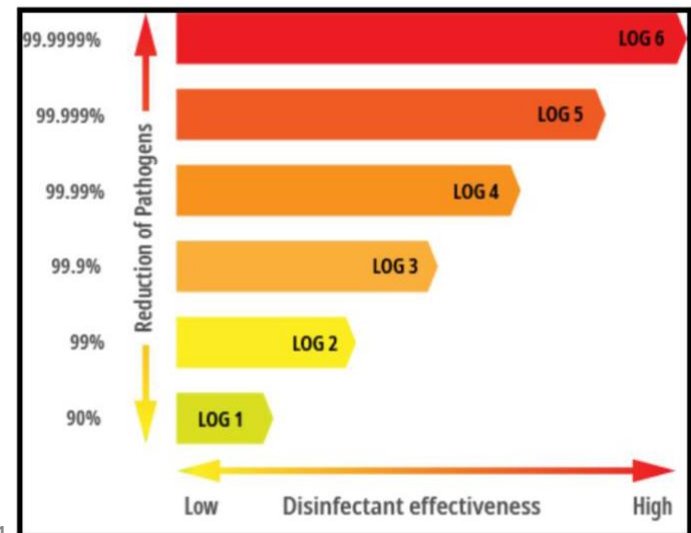
Suscettibilità all'UVGI

$$S = \frac{N}{N_0} = e^{-ktP} = e^{-kF} \quad S = \text{Survival rate}$$

- N/N_0 = frazione della popolazione iniziale sopravvissuta
- P = irradianza (mW/cm^2)
- t = durata dell'esposizione (s)
- $F = P \times t$ = irraggiamento o dose (mJ/cm^2)
- k = costante di decadimento ($cm^2/\mu J$)
- Efficienza di inattivazione: $(1 - S) \times 100$
- L'inattivazione è una riduzione percentuale del numero di agenti patogeni e non dipende dalla concentrazione



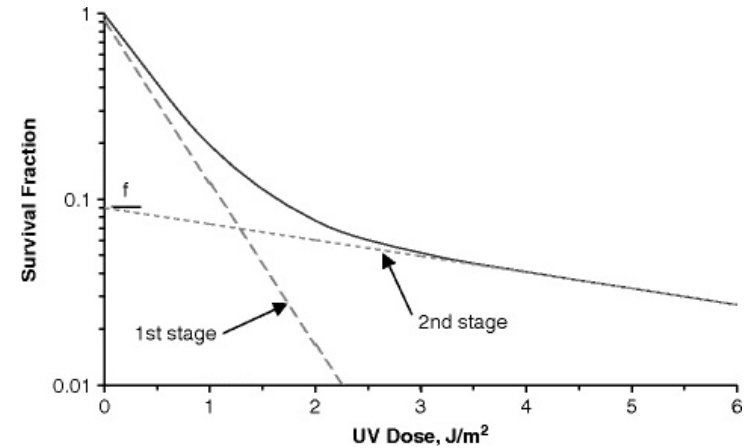
Crediti: Kowalski – Ultraviolet Germicidal Irradiation Handbook



Suscettibilità all'UVGI

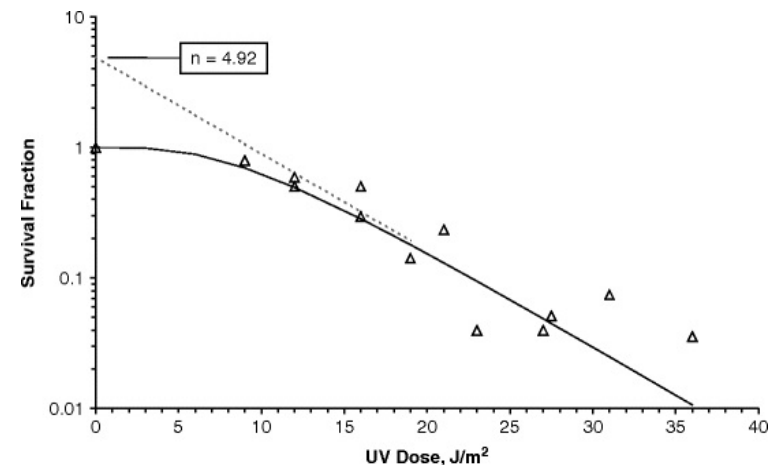
Curva a due livelli:
Sovrapposizione di popolazioni con differente resistenza

$$S = (1 - f)e^{-k_1F} + fe^{-k_2F}$$



Curva a spalla:
Soglia minima per decadimento esponenziale

$$S = 1 - (1 - e^{-kF})^n$$

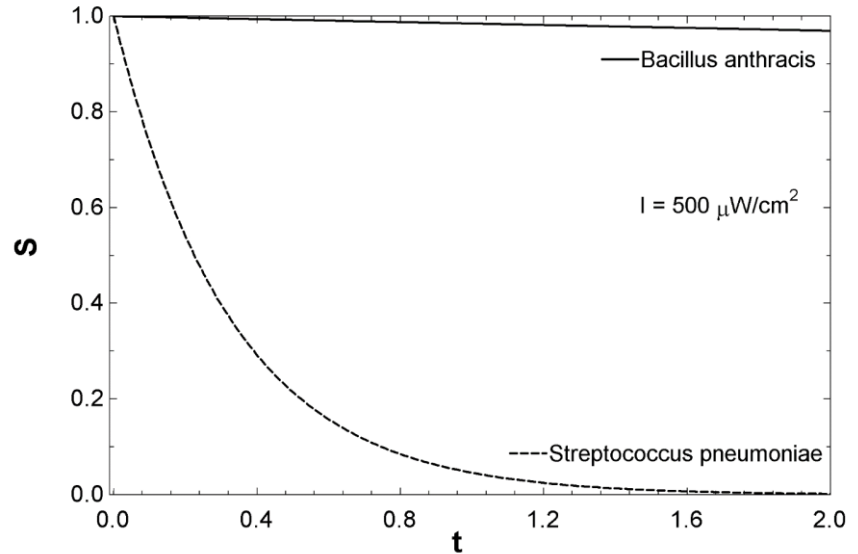


E' importante rimanere nella zona lineare della curva, dose > soglia

Suscettibilità all'UVGI spore e batteri

$$S = \frac{N}{N_0} = e^{-ktP} = e^{-kF}$$

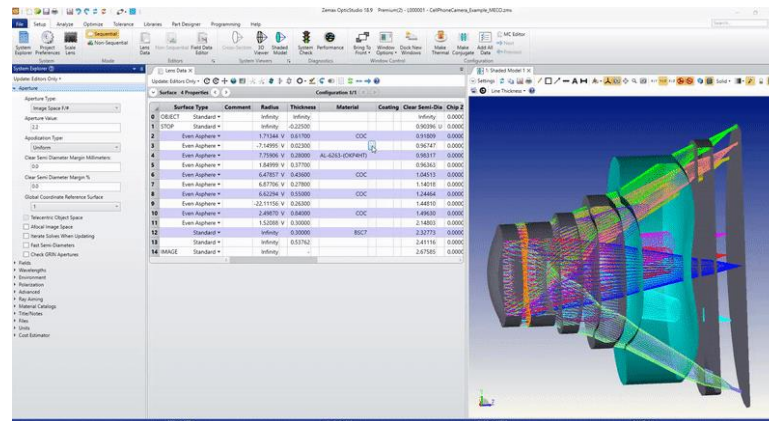
- k varia tra i diversi patogeni ($cm^2/\mu J$)
- Bacillus anthracis 0.000031 Influenza A 0.0019
- Mycobacterium tuberculosis 0.002132
- Streptococcus pneumoniae 0.006161



- Le misure di k, per lo stesso patogeno, sono spesso differenti tra loro per differenze nei sistemi sperimentali

Software simulazione

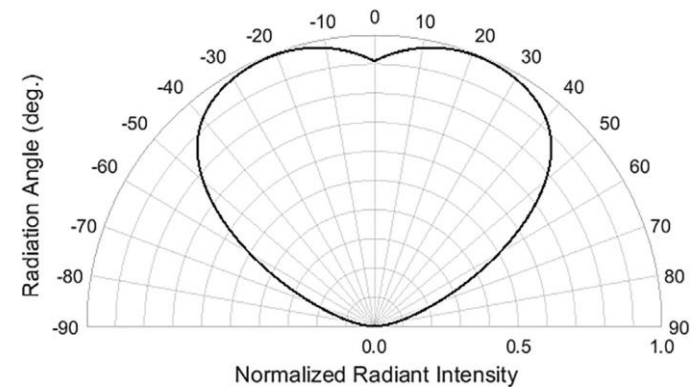
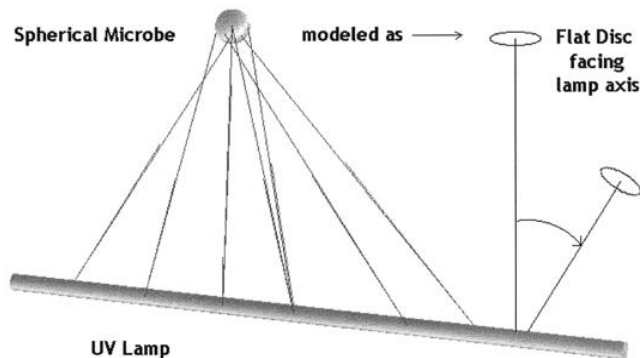
- Zemax OpticStudio® è un software di progettazione ottica tramite 'ray tracing' che permette di eseguire simulazioni di imaging e illuminazione, quindi anche di calcolare il flusso di fotoni simulando sorgente e geometria



- In astronomia, questo software è utilizzato in maniera estensiva per la progettazione e verifica delle prestazioni di telescopi e strumentazione

Simulazioni ottiche applicate all'UVGI

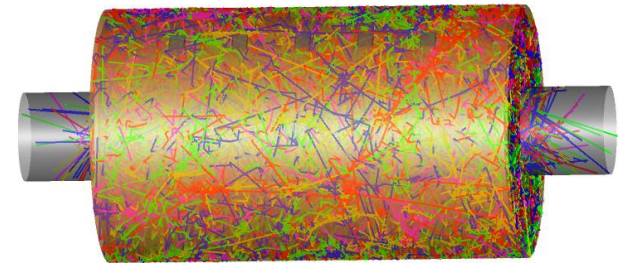
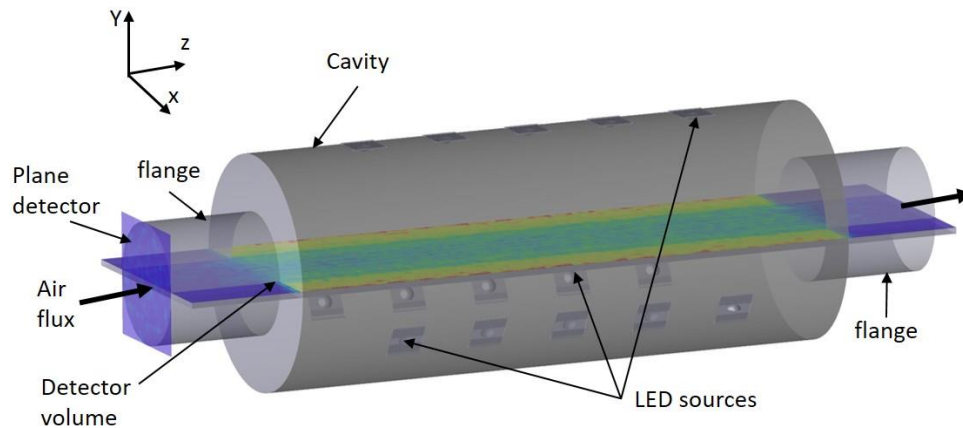
- Nella quasi totalità delle applicazioni di UVGI vengono utilizzate formule analitiche per l'emissione da parte delle sorgenti e l'irraggiamento
- Nel caso di molteplici sorgenti, riflessione, assorbimento o diffusione della luce (scattering) da parte delle superfici, è impossibile valutare in maniera accurata la distribuzione spaziale dell'irraggiamento
- Con i programmi di ray tracing l'emissione della luce e la misura di irradianza sono calcolati numericamente



$$I_{norm}(\theta) = c11 * \cos(|\theta| - c21)^{c31} + c12 * \cos(|\theta| - c22)^{c32} + c13 * \cos(|\theta| - c23)^{c33} + c0$$

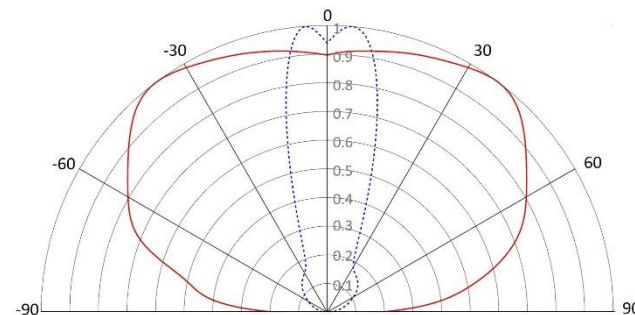
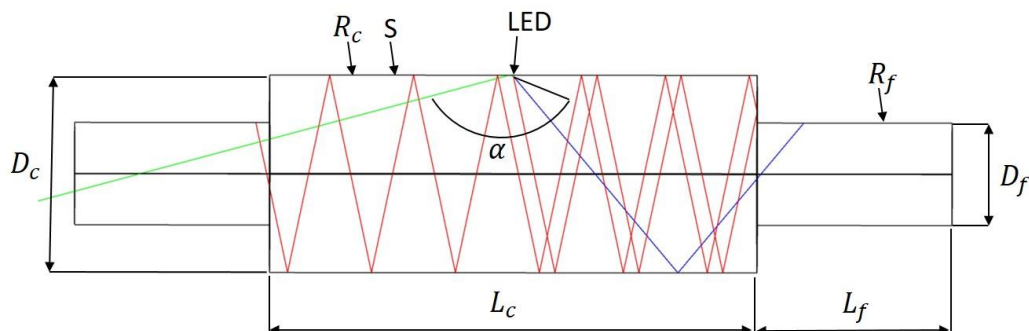
Filtro per sanificazione aria mediante irraggiamento con luce UVC

- Applicazione:
sanificazione dell'aria espirata da pazienti sottoposti a ventilazione assistita tramite caschi CPAP
- Domanda di finanziamento su bando FISR
- Consulenza conto terzi verso una impresa nell'ambito di un bando regionale dell'Emilia Romagna

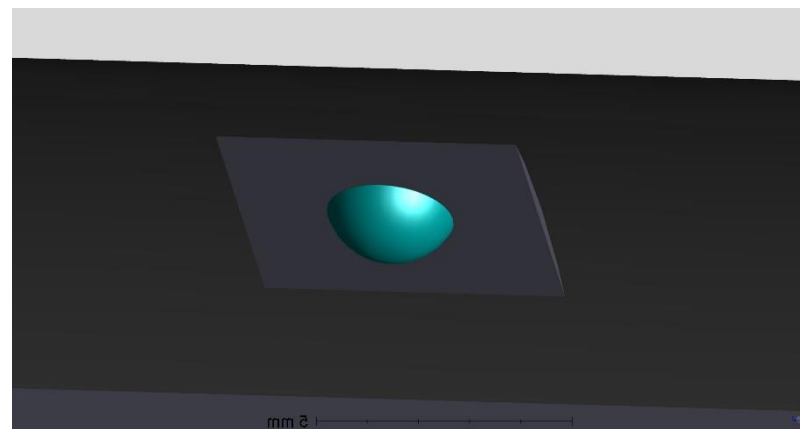


Simulazione ottica delle prestazioni

Studio delle prestazioni al variare di alcuni parametri

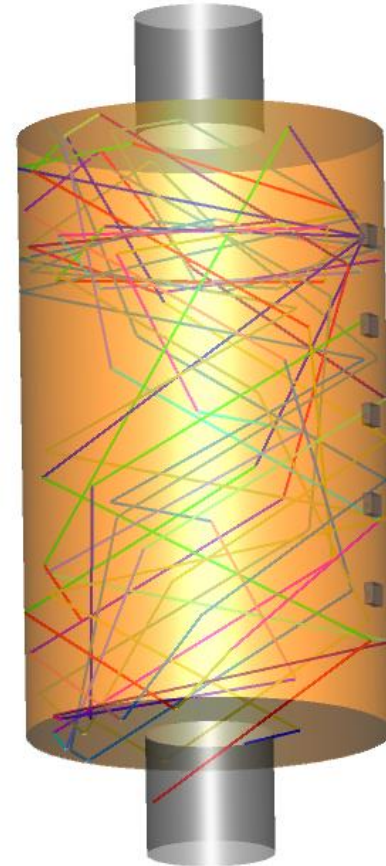
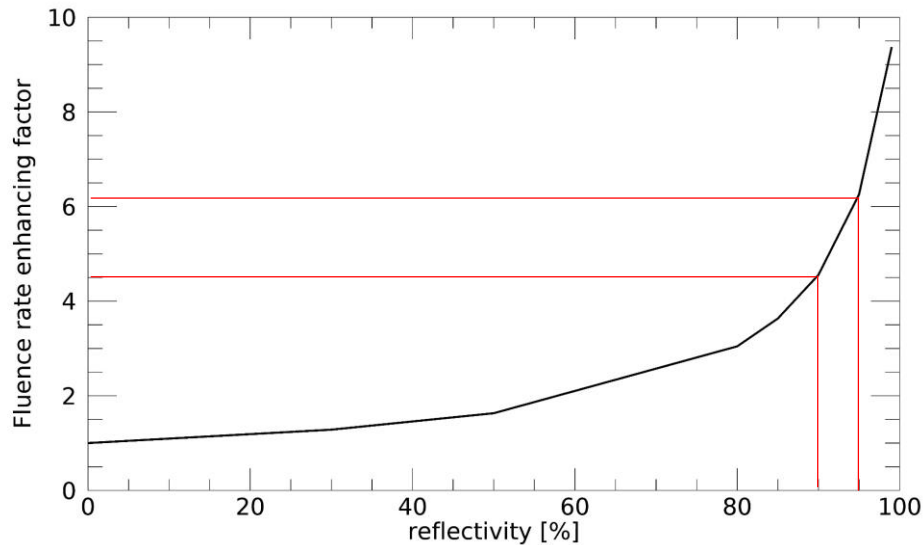


Object	Parameter	symbol	Unit	Value	Reference	Comparison cases
Filter	shape			Cylinder		
	diameter	D_c	mm	40		30, 50, 60
	length	L_c	mm	100		50, 150
	reflectivity	R_c		0.9		0, 0.8, 0.85, 0.95, 0.99
	scattering cone angle	S_c		0		FWHM 5°, Lamb
Flange	shape			Cylinder		
	diameter	D_f	mm	21		
	length	L_f	mm	20		40
	reflectivity	R_f		0		0.9
LED	emission power	I_0	mW	100		
	Number			15		
	Emission cone angle	α	degrees	150		30



Riflettività interna della cavità

$$p_{tot} = p_0 + p_0 \cdot R + p_0 \cdot R^2 + \dots + p_0 \cdot R^n \lim_{n \rightarrow \infty} p_0 \cdot \frac{1}{1 - R}$$

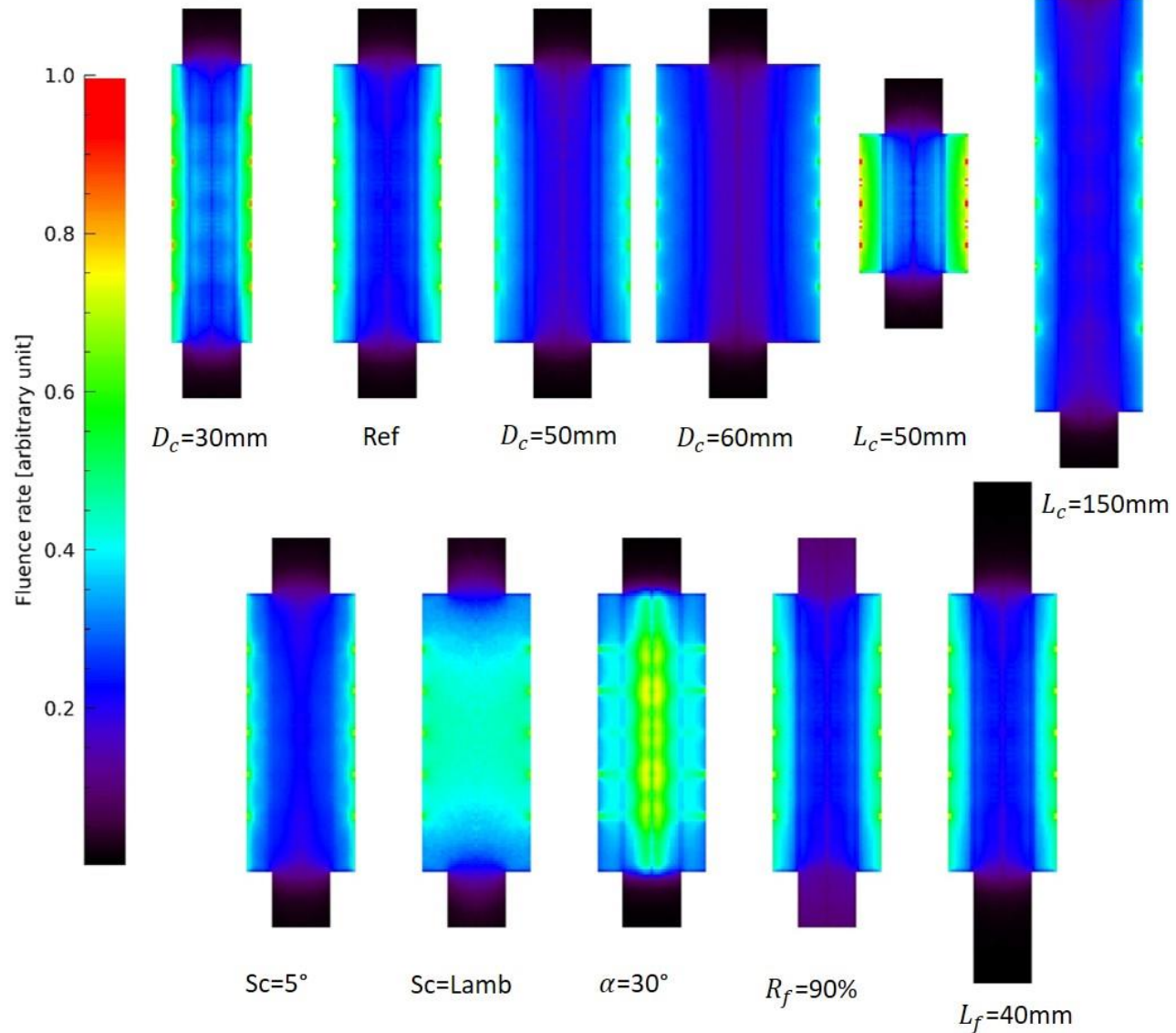


E' importante la dose $J = W \times s$

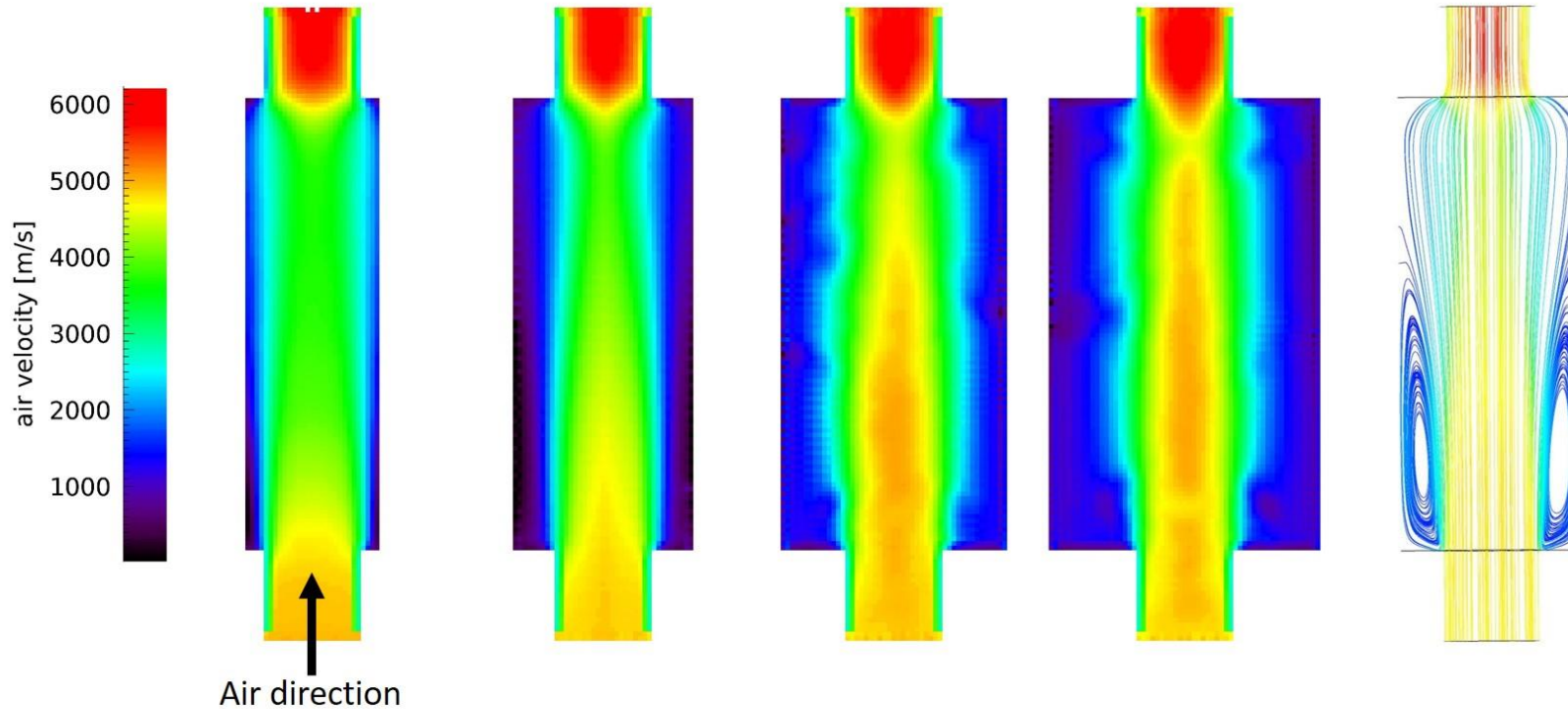
La luce può essere 'somministrata a pezzi' per la legge di Bunsen e Roscoe

Irradianza all'interno del filtro

Trade-off parametri filtro



Flusso di aria



- Simulazioni fluidodinamiche per differenti geometrie e flusso di aria in ingresso
- Flusso max di 100 l/min, tempo minimo dell'aria all'interno del filtro circa 1/40 secondo
- Il flusso è tendenzialmente laminare anche per flussi minori (20 l/min)

Efficacia del filtro



- In ogni cella, la velocità viene trasformata in tempo di permanenza e moltiplicata per l'irradianza → irraggiamento locale
- Il volume di aria in ingresso viene diviso in n traiettorie (particle tracking) per le quali è calcolata la dose accumulata attraverso gli z volumetti attraversati e la relativa frazione di sopravvivenza S_n

$$S_n = \prod_z S_{n,z} = e^{-k \sum t_{n,z} P_{n,z}}$$

La frazione di sopravvivenza per una determinata velocità S_v è la somma delle S_n pesate per la frazione di aria (e di patogeni) che è entrata dentro il tubo

$$S_v = \sum_n S_n \cdot a_n$$

L'irraggiamento equivalente è l'irraggiamento che produce la stessa frazione di sopravvivenza del filtro, utilizzando le formule sopra descritte

$$S_v = e^{-k F_{eq}} \rightarrow F_{eq} = -\frac{\log(S_v)}{k}$$

Case	Parameter variation respect to reference case			Equivalent fluence for $v_{in} = 5m/s$	Light leak through each aperture
	symbol	unit	value	unit mJ/cm^2	Unit mW/cm^2
Reference case				5.46	5.25
1	R_c		0	1.42	0.15
2	R_c		0.8	4.03	4.66
3	R_c		0.85	4.63	4.93
4	R_c		0.95	6.72	5.67
5	R_c		0.99	8.44	6.11
6	D_c	mm	30	7.29	6.92
7	D_c	mm	50	3.82	3.89
8	D_c	mm	60	3.03	2.96
9	L_c	mm	50	2.95	5.97
10	L_c	mm	150	7.00	4.59
11	L_f	mm	40	5.46	1.47
12	R_f		0.9	5.89	31.01
13	S_c	mm	5	5.42	6.79
14	S_c		Lambertian	8.84	11.64
15	α	degrees	30	10.77	2.32

Symbols legend: R_c cavity reflectivity; D_c cavity diameter; L_c cavity length; L_f flange length; R_f flange reflectivity; S_c Scattering distribution; α LED emission cone angle

Canali e sistemi di ventilazione

- Impianti domestici o industriali
- Flussi aria 1000-5000 m^3/h
- Lampade a scarica di mercurio → goal è l'utilizzo di matrici di LED
- Brevetto INAF – dicembre 2020
 Titolo: *Dispositivo per la disinfezione di un flusso di fluido in un condotto mediante radiazioni uv-c*
- Possibile impianto pilota in collaborazione con un tecnopolo

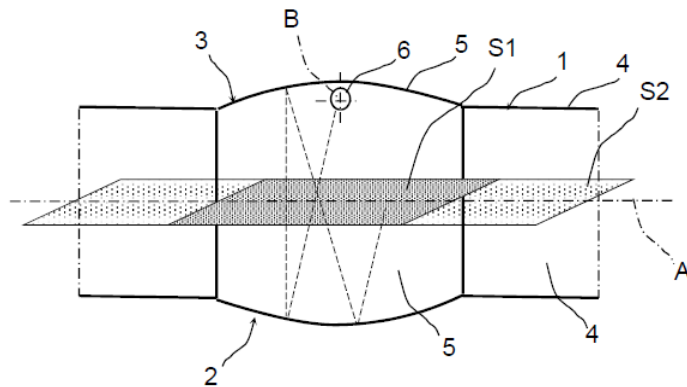


Fig. 3

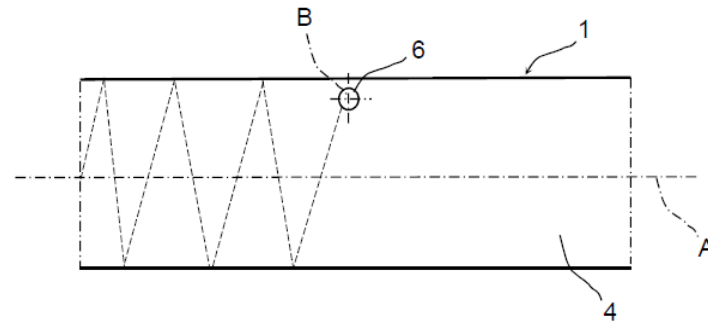
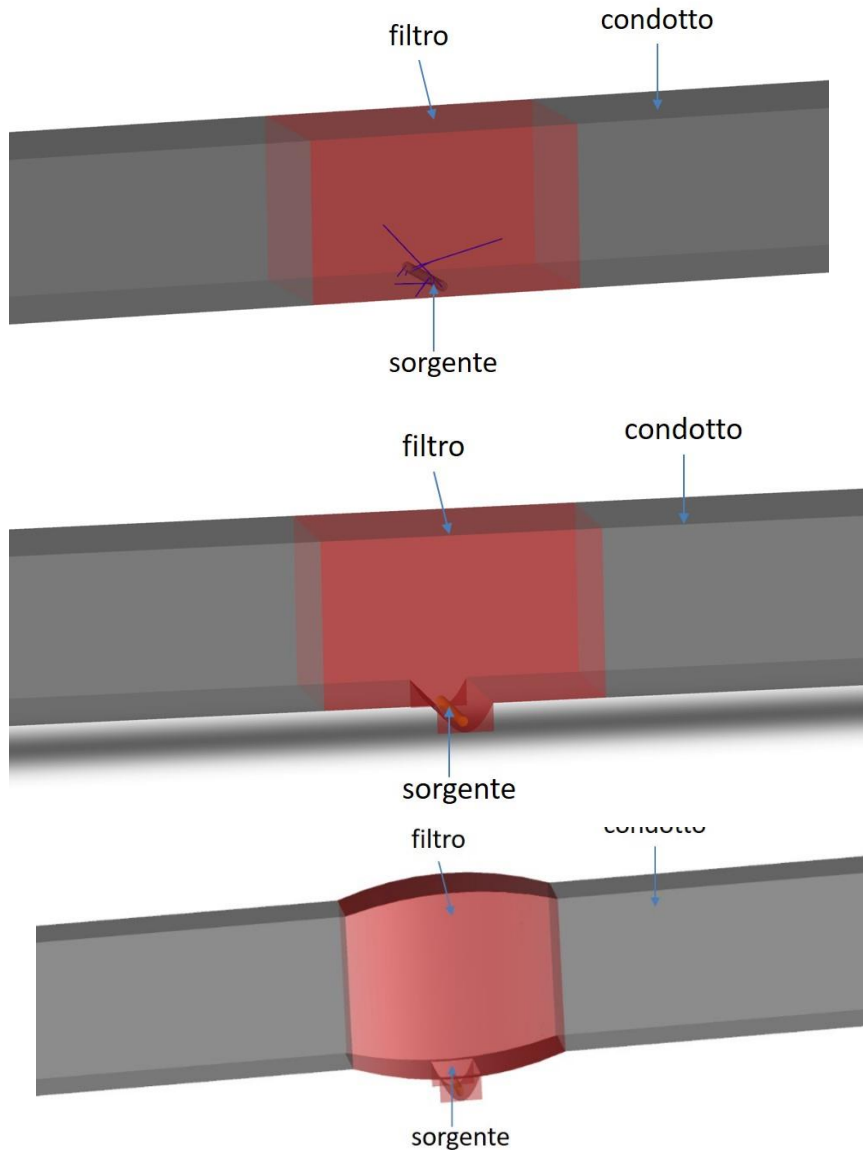


Fig. 4

Canali e sistemi di ventilazione



Ottimizzazione disegno in base ai parametri:

- forma riflettore sorgente
- curvatura pareti
- Lunghezza filtro
- Flusso aria

La forma delle pareti è importante per materiali con riflessione quasi speculare

Conclusioni



- Le simulazioni ottiche e fluidodinamiche indicano che i filtri per la sanificazione dell'aria sono efficaci
- Prototipi in fase di costruzione
- Possibilità di ottimizzazione geometrie e parametri dei componenti aumentare le prestazioni
- Possibile disponibilità a breve termine di materiale ad alta riflettività e scattering ridotto
- Probabile aumento potenza ed efficienza dei LED UVC su tempi scala di mesi/anno

- INAF ha fornito e sta fornendo consulenza e assistenza alla comunità scientifica e industriale
- Forte impulso al trasferimento tecnologico
- Crescita professionale ed aumento della rete di collaborazioni
- Ritorno tecnico scientifico per applicazioni astrofisiche