



TOR VERGATA
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA

Tecniche di monitoraggio ambientale mediante l'uso di sorgenti laser per la sicurezza e salvaguardia in aree urbane ed industriali

Prof. Pasquale Gaudio

Dipartimento di Ingegneria Industriale

Sommario

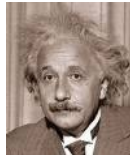
- ▶ Introduzione ai laser
- ▶ L'uso dei laser nel monitoraggio ambientale: la tecnica Lidar
 - ▶ La tecnica Dial
- ▶ Esempi di applicazioni alla Fisica dell'atmosfera e support alla meteorologia
- ▶ Esempi di applicazione al monitoraggio ambientale e alla misura degli inquinanti
- ▶ Applicazioni alla “Safety and Security” in ambito civile e militare (prevenzione rischio CBRN)

Breve storia del laser: cenni storici

L - Light
A - Amplification
by **S** - Stimulated
E - Emission
R - Radiation



1900 – Max Planck introduce la teoria dei quanti (la versione discontinua dell'energia $E = h\nu$).



1917 – Einstein introduce l'idea di “emissione stimolata”



1953 – C.H. Townes propone il primo modello fisico per la realizzazione di inversione di popolazione (il MASER con NH_3)



1960 – T.H. Maiman realizza il primo laser con corpo solido (il laser con rubino, $\lambda=694,3$ nm)



1961 – Ali Javan realizza il primo laser atomico con HeNe ($\lambda = 632,8$ nm)



1968 – C. K. N. Patel ha costruito il primo laser molecolare con CO_2

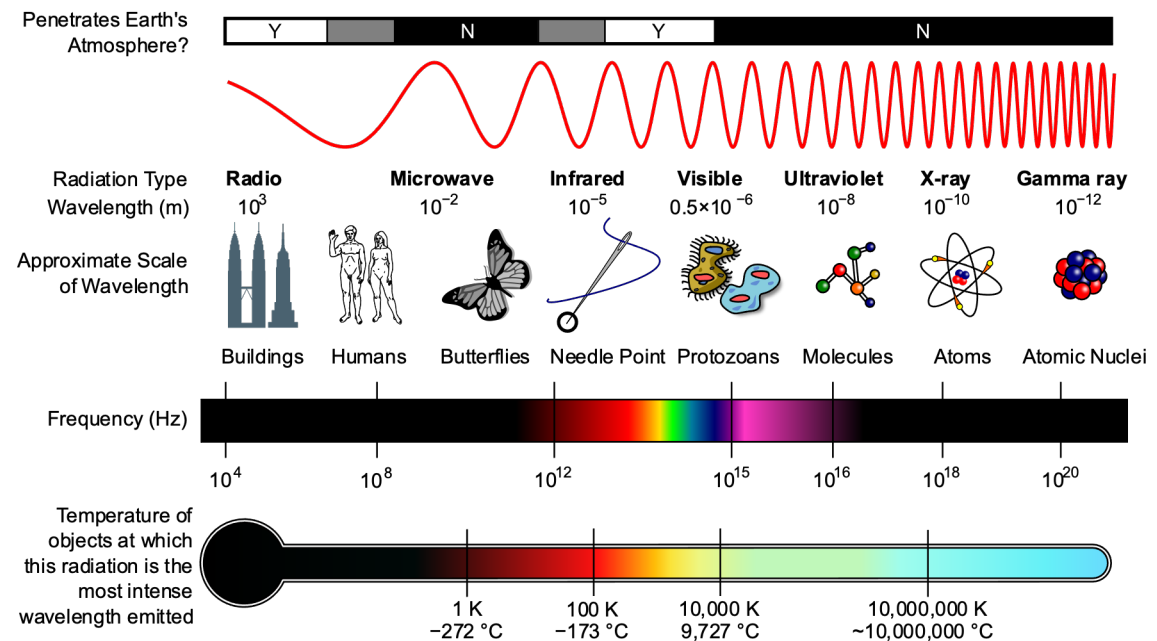
Prof. Pasquale Gaudio

Cosa è la luce

- La luce è un'onda che si muove come "le onde del mare" (Huygens)
- La luce è fatta da tanti corpuscoli che si muovono oscillando "nell'etere" (Newton)



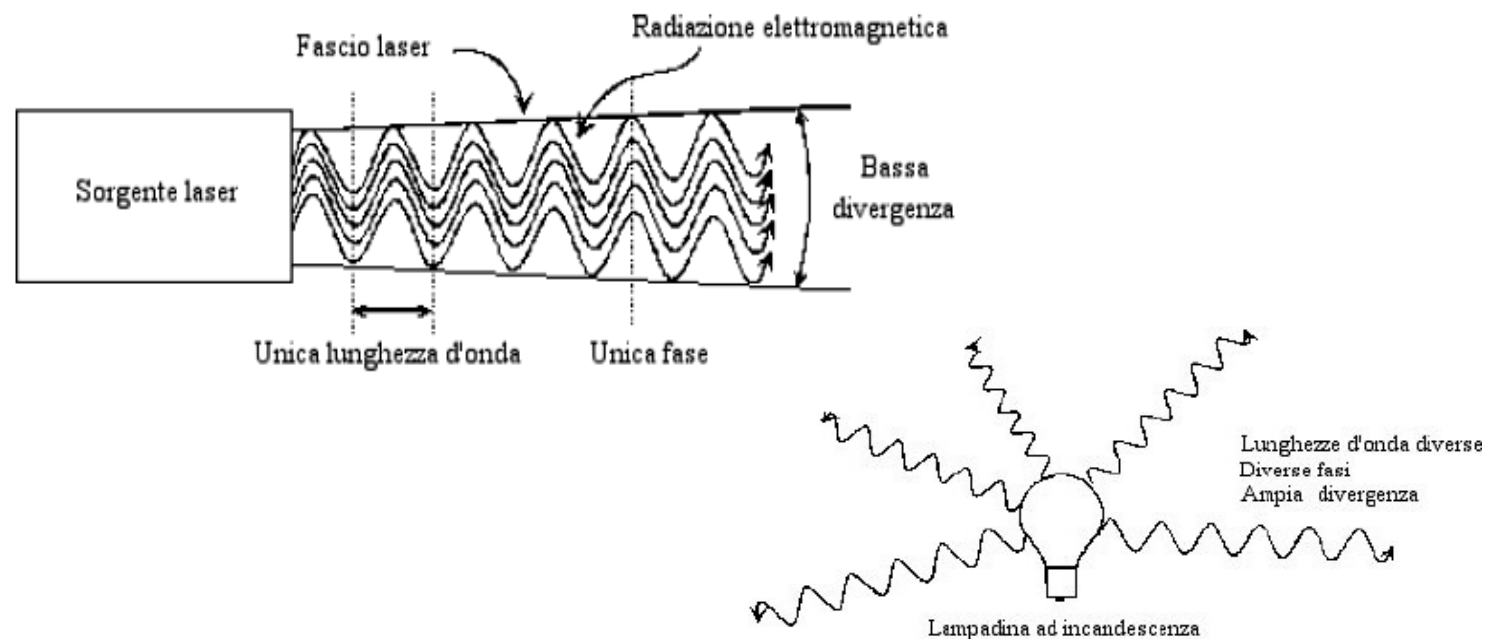
- La luce è un'onda costituita da tanti piccolo corpuscoli (Fotoni) che trasportano energia!



Come funziona un Laser

- Per iniziare confrontiamo due tipi di sorgenti:
- Sorgente di luce incoerente: emettono su tutto l'angolo solido, non esiste il controllo della lunghezza d'onda (colore) ne della direzione di emissione

- Sorgente Laser:
emette in modo
monocromatico coerente
e direzionale



Come funziona un Laser

► Per iniziare confrontiamo due tipi di sorgenti:

► Coerenza

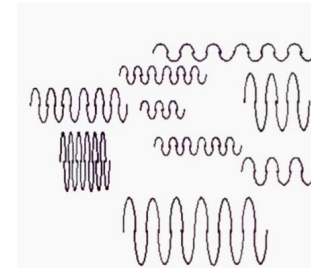
► Temporale

- Legato alla larghezza di riga
- Lunghezza di coerenza del treno d'onda
- $\Delta\nu = \frac{1}{t_c}$; $l_c = \frac{c}{\Delta\nu}$

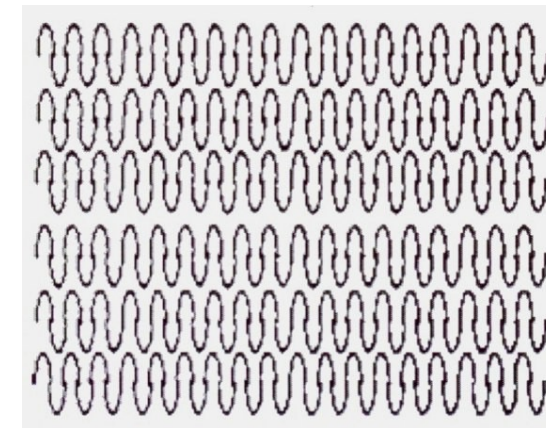
► Spaziale

se esiste una differenza di fase
costante tra due punti
qualunque del fronte d'onda

Emissione incoerente: i fotoni vengono emessi casualmente, in tempi diversi e con fase diverse



Emissione coerente: i fotoni vengono emessi simultaneamente e con la stessa fase



Coerenza spaziale:
le onde
hanno la
stessa fase
in tutti
punti della
sezione del
fascio

Coerenza temporale: le onde
conservano la stessa fase nel
tempo

Come funziona un Laser

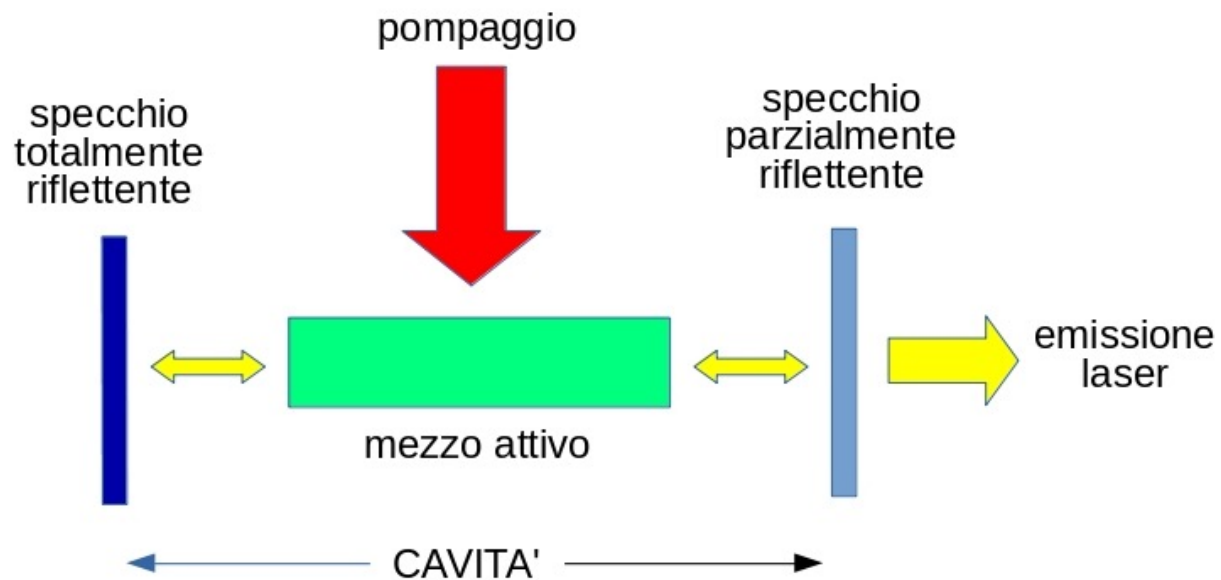
► **Monocromaticità**

- è la proprietà dei laser di emettere fasci di radiazione in un intervallo spettrale molto stretto.
- è correlata con la coerenza temporale.

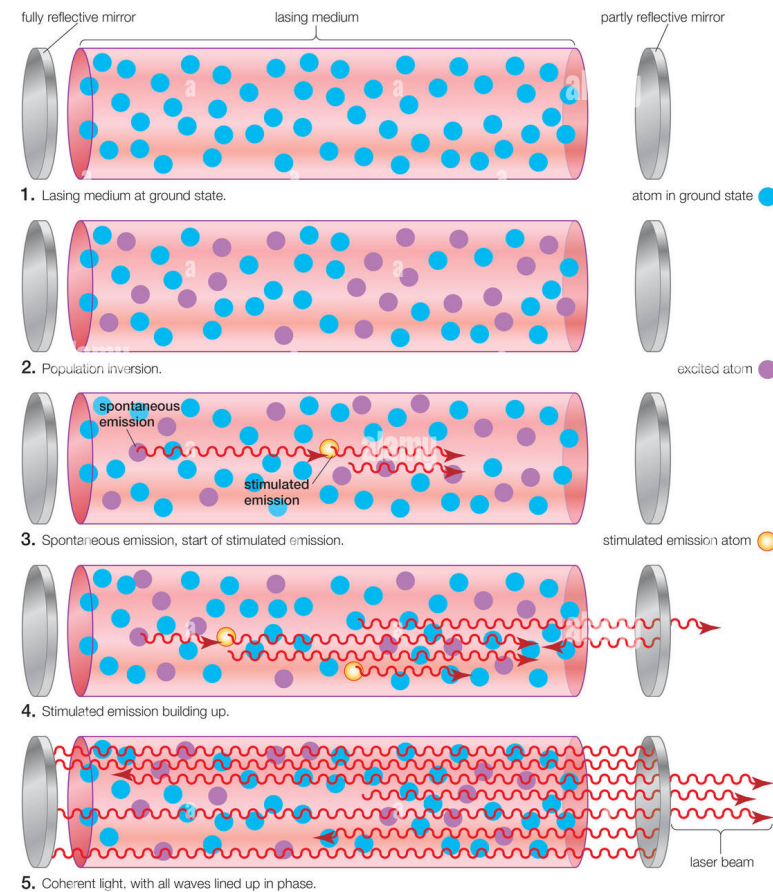
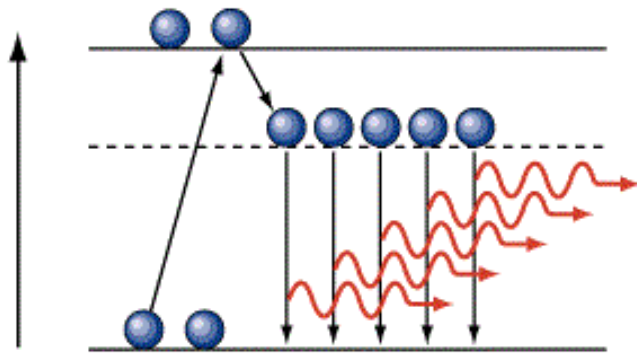
► **Direzionalità**

- il laser emette un fascio direzionale, fortemente collimato, però esiste una divergenza intrinseca dovuta alla diffrazione.
- è correlata con la coerenza spaziale.

Come funziona un Laser

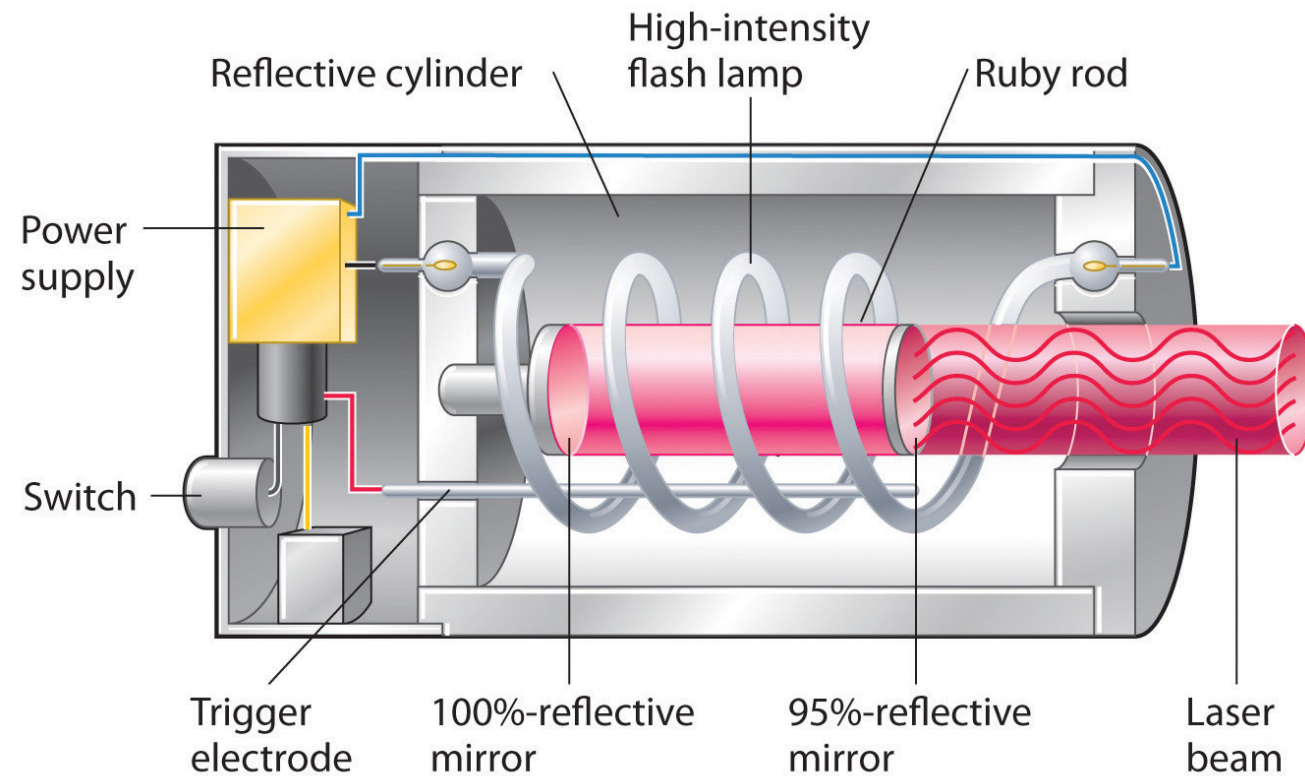


Come funziona un Laser



Come funziona un Laser

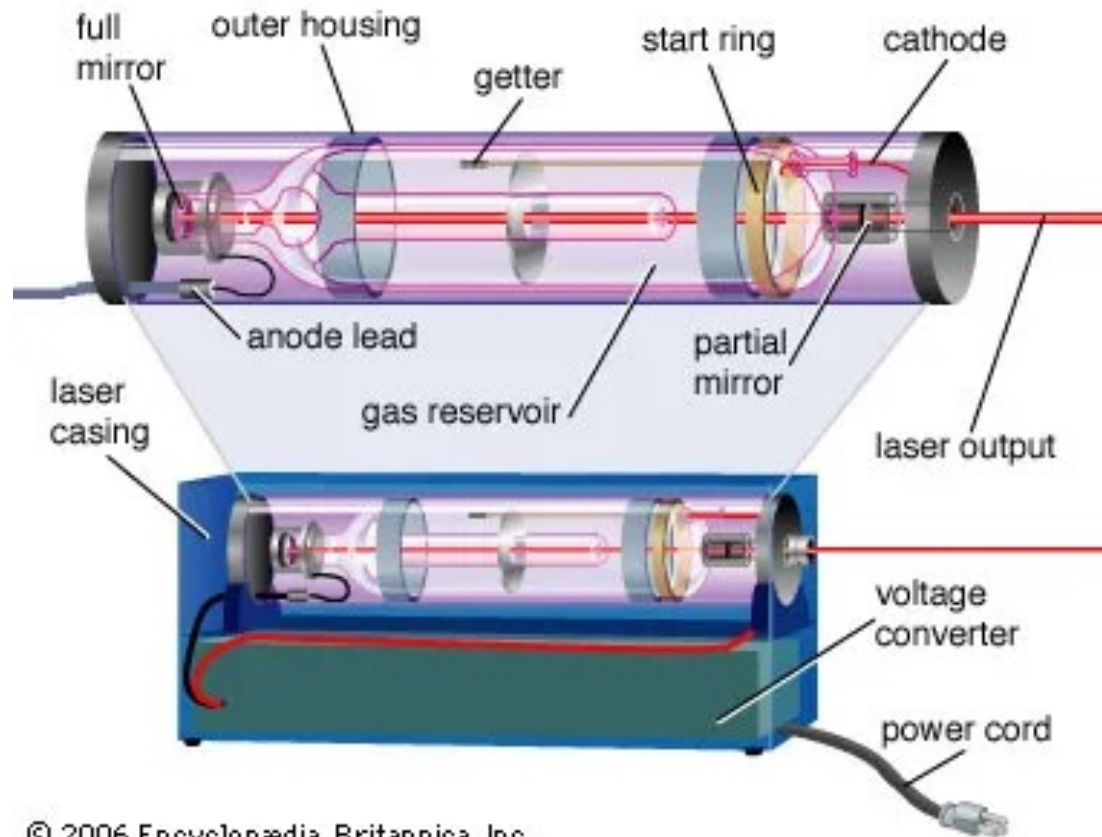
Laser a stato solido: Rubino



(a)

Come funziona un Laser

Laser a gas: He Ne



© 2006 Encyclopædia Britannica, Inc.

Classificazione dei laser

- ▶ Secondo il materiale
 - ▶ Laser a stato solido: pompaggio ottico
 - ▶ Laser a gas: pompaggio ottico, a scarica elettrica, a scarica a radio frequenza
 - ▶ Laser a coloranti: pompaggio ottico
 - ▶ Laser a semiconduttore: pompaggio elettrico

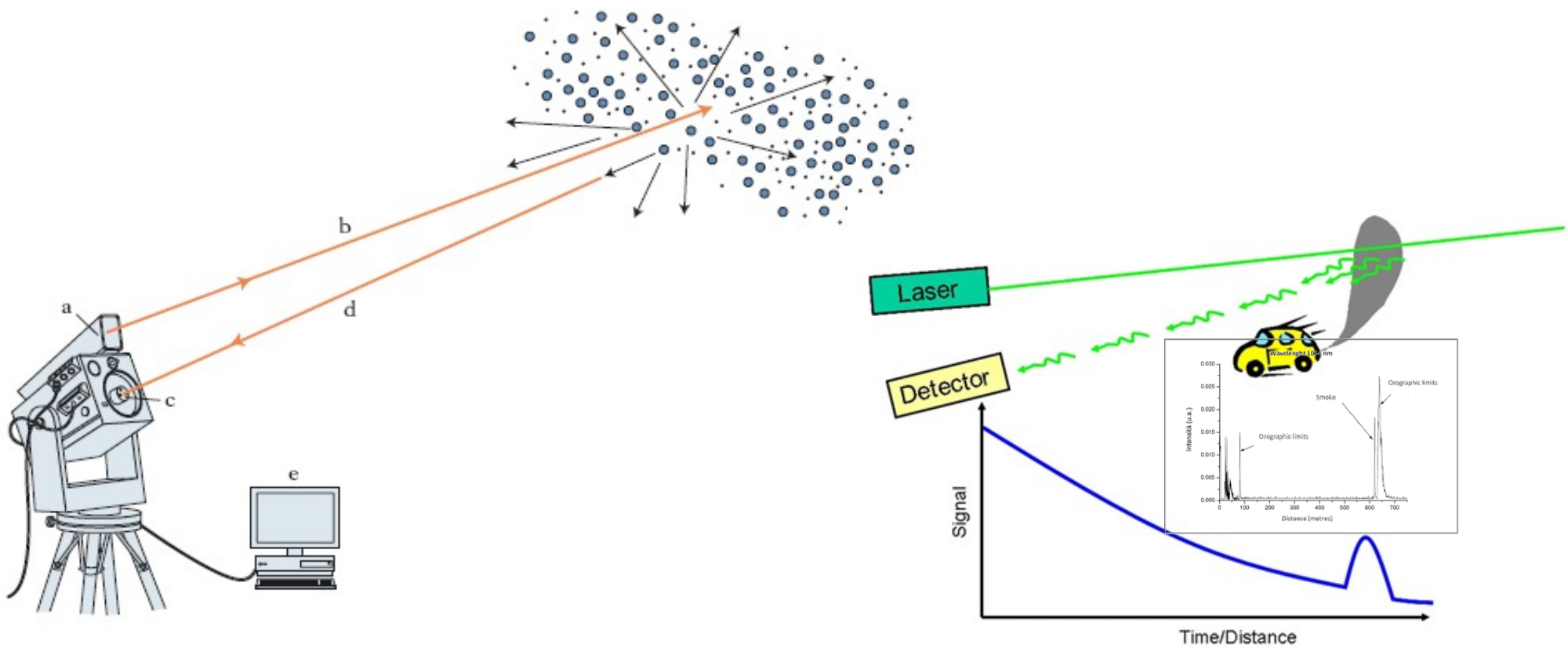
- ▶ Altri metodi di classificazione
 - ▶ Potenza emessa (microW – KW in continuo – Onda impulsata (GW - TW)
 - ▶ Lunghezza d'onda (IR, VIS, UV)
 - ▶ Durata dell'emissione (fs, ns, ms, CW)
 - ▶ Applicazioni (industriali telecomunicazioni, medicali, ecc)



TOR VERGATA
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA

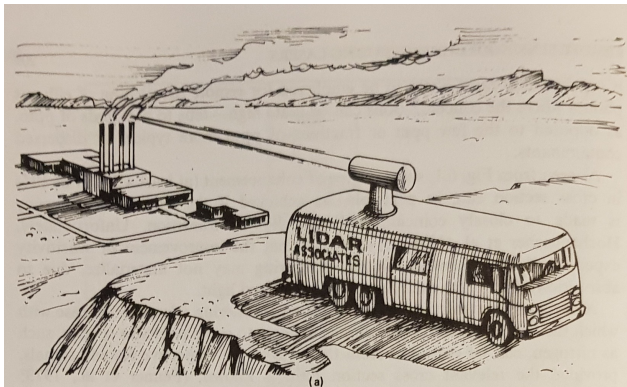
L'uso dei Laser nel monitoraggio ambientale: La tecnica Lidar (Light detection and ranging)

La tecnica Lidar: principio di funzionamento

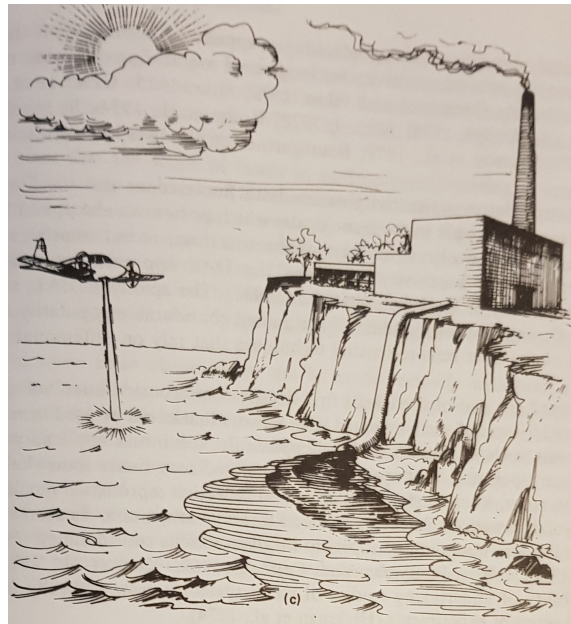


La tecnica Lidar: esempi di applicazione

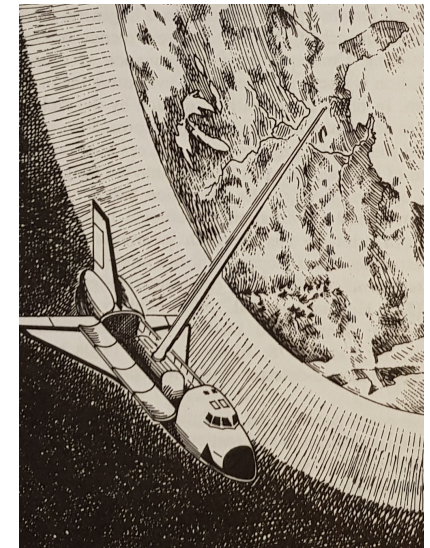
Monitoraggio di aree industriali e inquinanti atmosferici



Monitoraggio mediante l'uso di sistemi montati su aereo

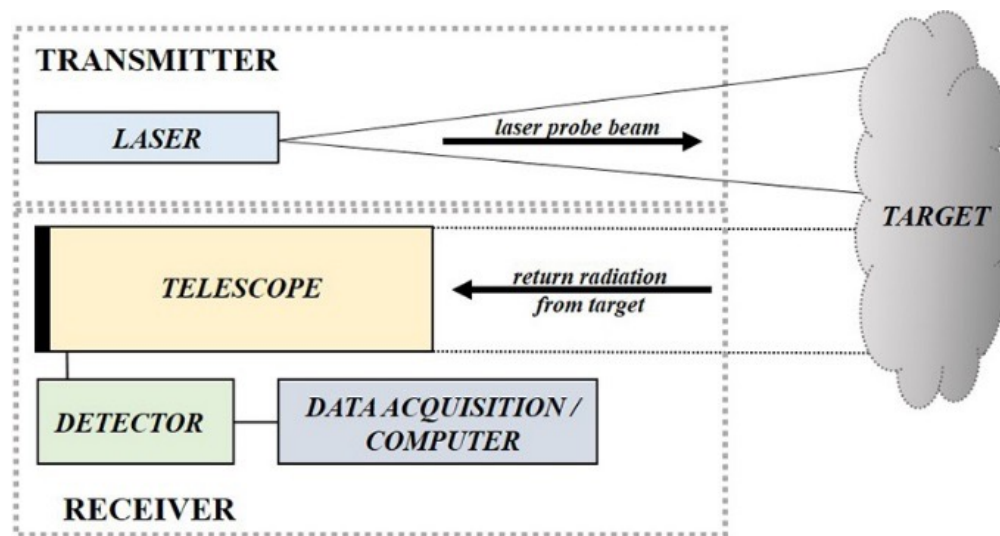


Laser Remote Sensing di strati superiori di atmosfera



La tecnica Lidar: elementi essenziali

Lidar: schema ed elementi essenziali che costituiscono il sistema



La tecnica Lidar: Principi Fisici e meccanismi d'interazione

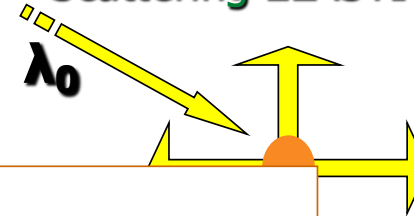
Interazione Radiazione Materia: Meccanismi principali

- Rayleigh Scattering

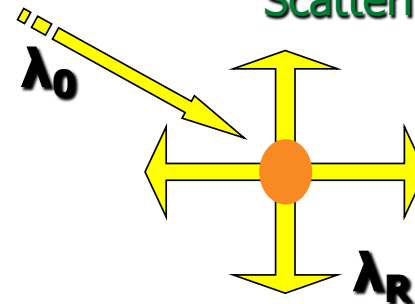
- Mie Scattering

$$k_{at}(\lambda) = \sum_{i=1}^n \left(k_{Ry}^i(\lambda) + k_{Ra}^i(\lambda) + k_{ass}^i(\lambda) \right) + k_M(\lambda)$$

Scattering ELASTICO



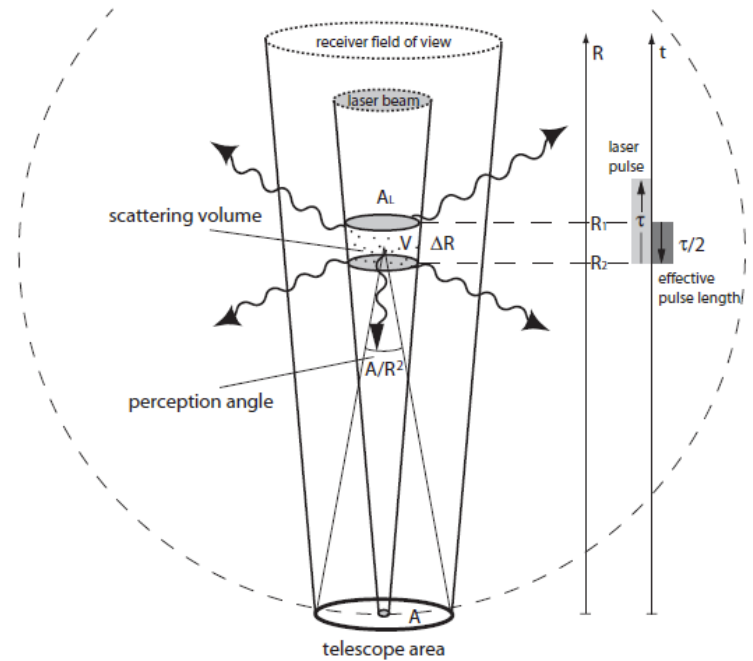
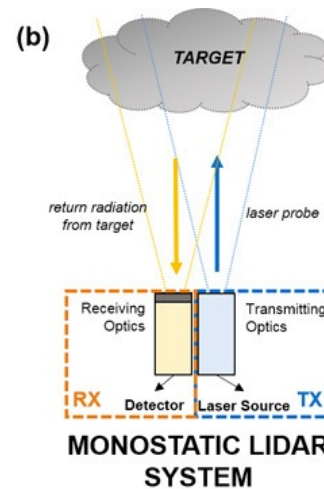
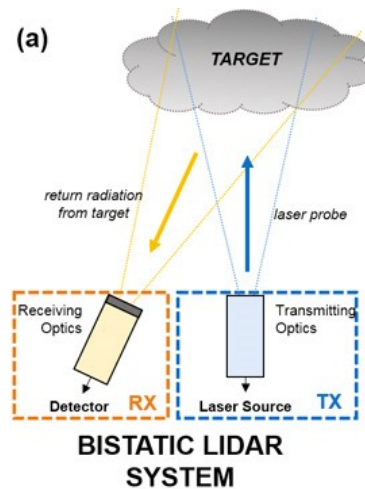
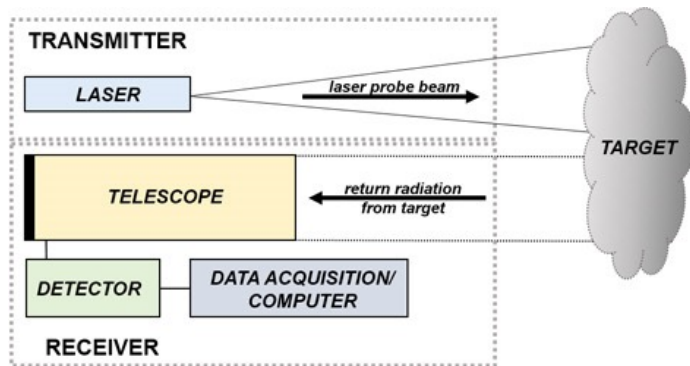
Scattering ANELASTICO



- Attenuazione: Beer Lambert Law

$$\frac{d}{dx} I(\lambda) = -k_{at} I(\lambda)$$

La tecnica Lidar: Principi Fisici e layout dei sistemi



La tecnica Lidar: l'equazione

► Equazione Lidar

► Scattering elastico

$$P_{\lambda_0}(z) = P_0 \frac{O(z)}{z^2} [\beta_{\lambda_0}^{aer} + \beta_{\lambda_0}^{mol}] \times \exp \left\{ -2 \int_0^z [\alpha_{\lambda_0}^{aer}(\zeta) + \alpha_{\lambda_0}^{mol}(\zeta)] d\zeta \right\}$$

► ed anelastico

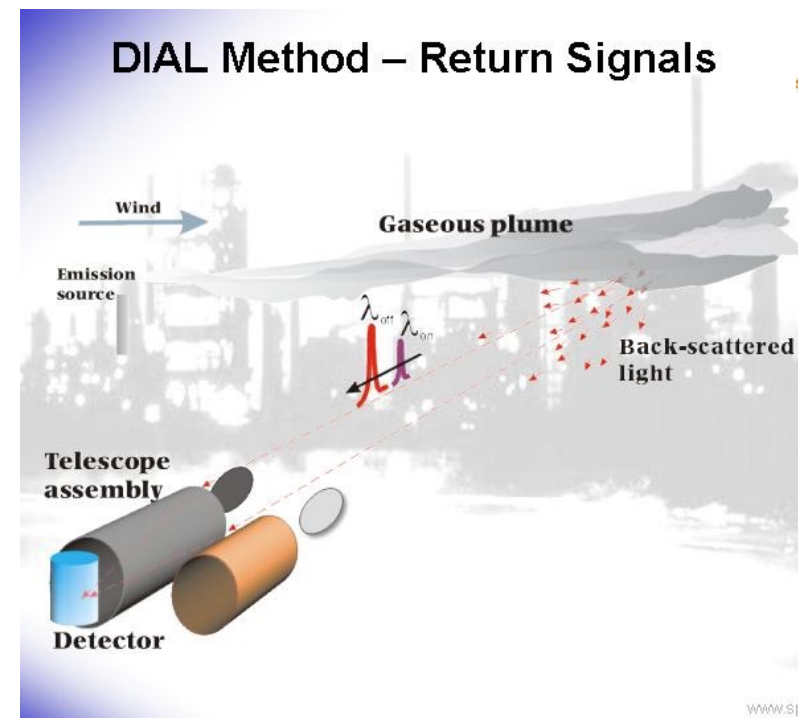
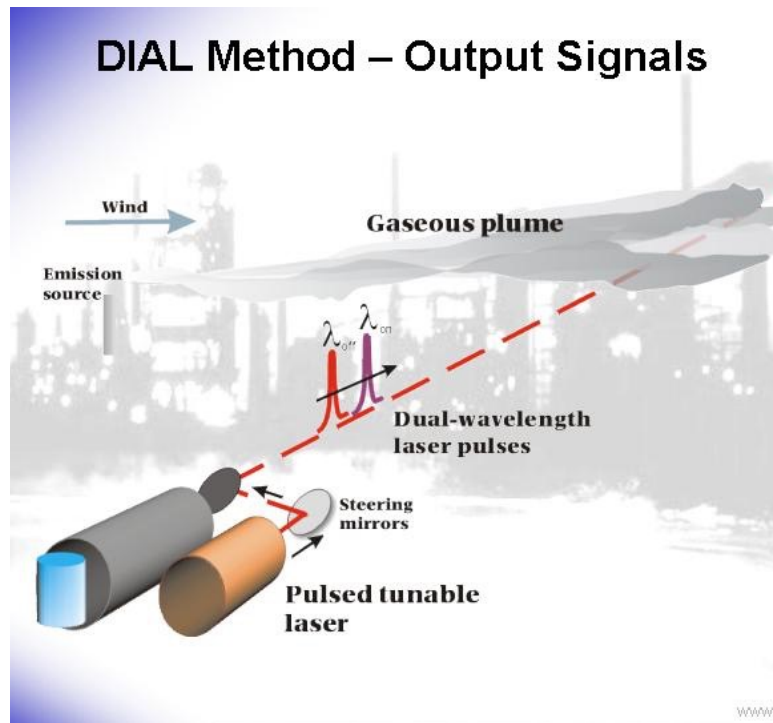
$$P_{\lambda_R}(z) = P_0 \frac{O(z)}{z^2} N_R(z) \frac{d\sigma_{\lambda_R}(\pi)}{d\Omega} \times \exp \left\{ - \int_0^z [\alpha_{\lambda_0}^{aer}(\zeta) + \alpha_{\lambda_0}^{mol}(\zeta) + \alpha_{\lambda_R}^{aer}(\zeta) + \alpha_{\lambda_R}^{mol}(\zeta)] d\zeta \right\}$$



TOR VERGATA
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA

La tecnica Dial (Differential absorption lidar)

La tecnica Dial: principio di funzionamento

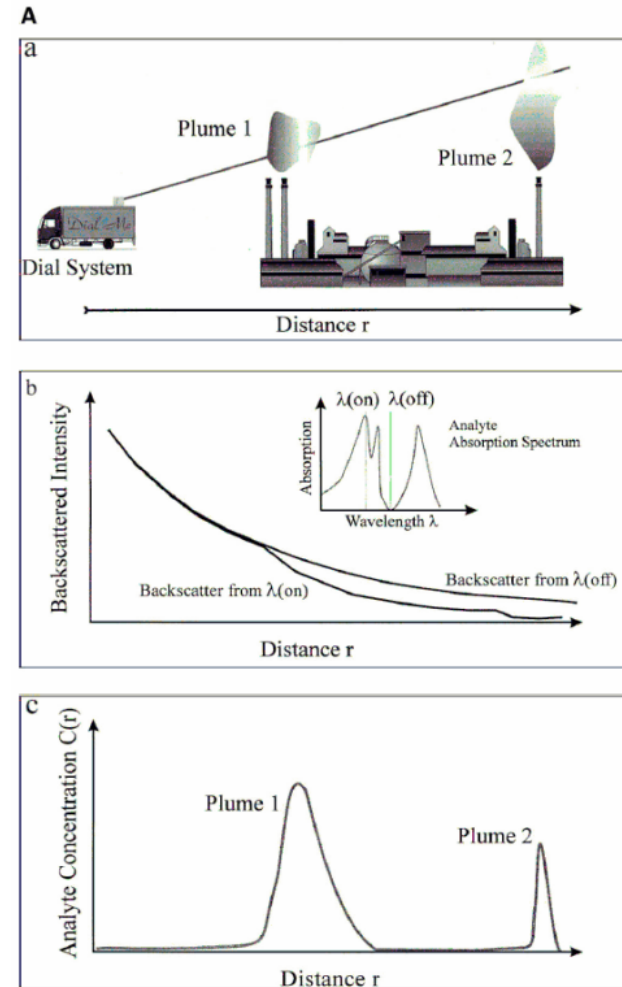


La tecnica Dial: l'equazione

$$\frac{P_{\lambda_{off}}(z)}{P_{on}(z)} \cong \frac{\exp \left\{ -2 \int_0^z \left[\alpha_{\lambda_{off}}^{aer}(\zeta) + \alpha_{\lambda_{off}}^{mol}(\zeta) \right] d\zeta \right\}}{\exp \left\{ -2 \int_0^z \left[\alpha_{\lambda_{on}}^{aer}(\zeta) + \alpha_{\lambda_{on}}^{mol}(\zeta) \right] d\zeta \right\}}$$

$$N(R) = \frac{1}{2\Delta\alpha(\lambda_{on}, \lambda_{off})} \times \frac{d}{dR} \ln \left(\frac{P_{\lambda_{on}}(z)}{P_{off}(z)} \right)$$

$$\Delta\alpha(\lambda_{on}, \lambda_{off}) = \alpha_{on}(\lambda_{on}) - \alpha_{off}(\lambda_{off})$$





TOR VERGATA
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA

Esempi ed applicazioni alla Fisica dell'atmosfera e supporto alla meteorologia

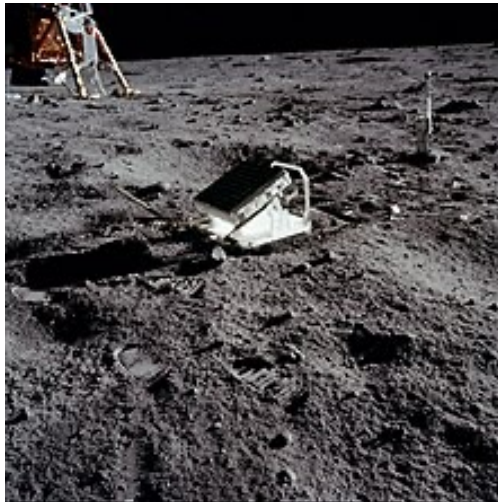


TOR VERGATA
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA

Il Lidar come “Sistema di misura delle distanze”

Le prime applicazioni - Lunar Laser Ranging

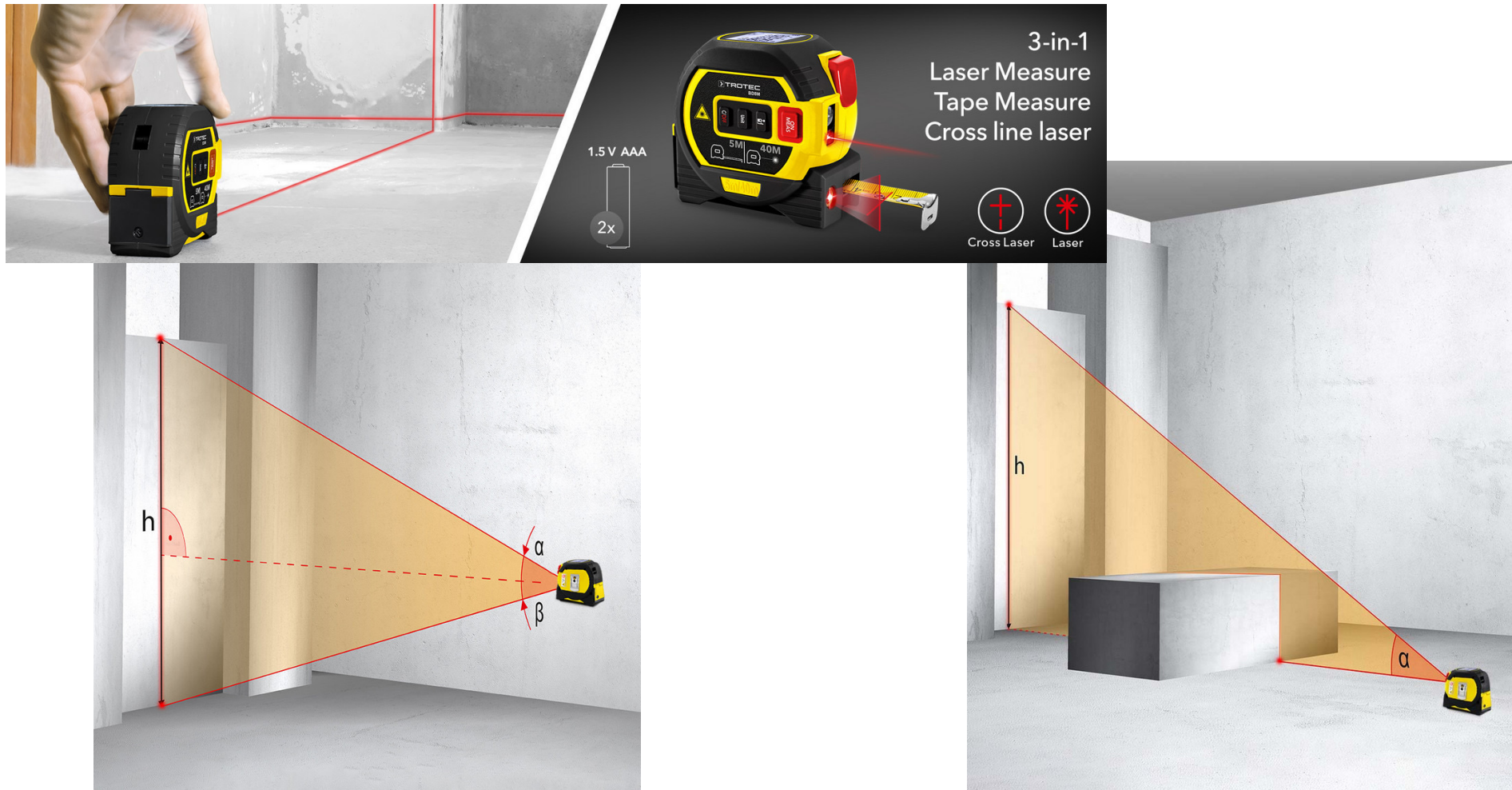
- ▶ Tra le prime applicazioni di una sorgente laser emerge la misura della distanza Terra – Luna
- ▶ Nel 1962 le prime misurazioni poco accurate
- ▶ 1969 “Apollo 11” installa un catarifrangente sulla superficie lunare



$$Distanza = v \cdot t$$



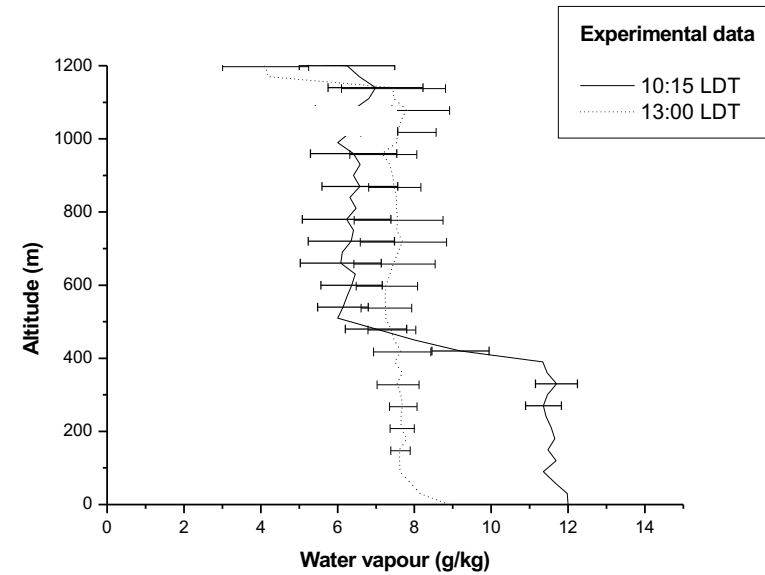
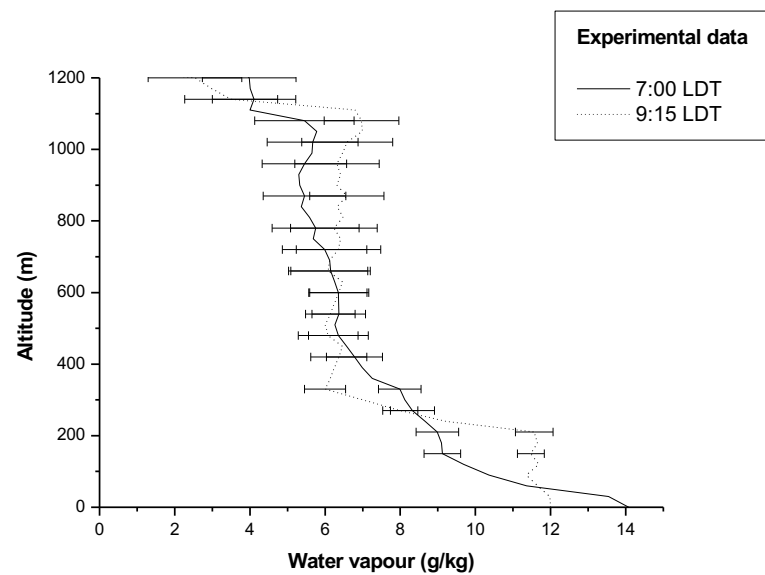
Le ultime applicazioni in termini di distanza



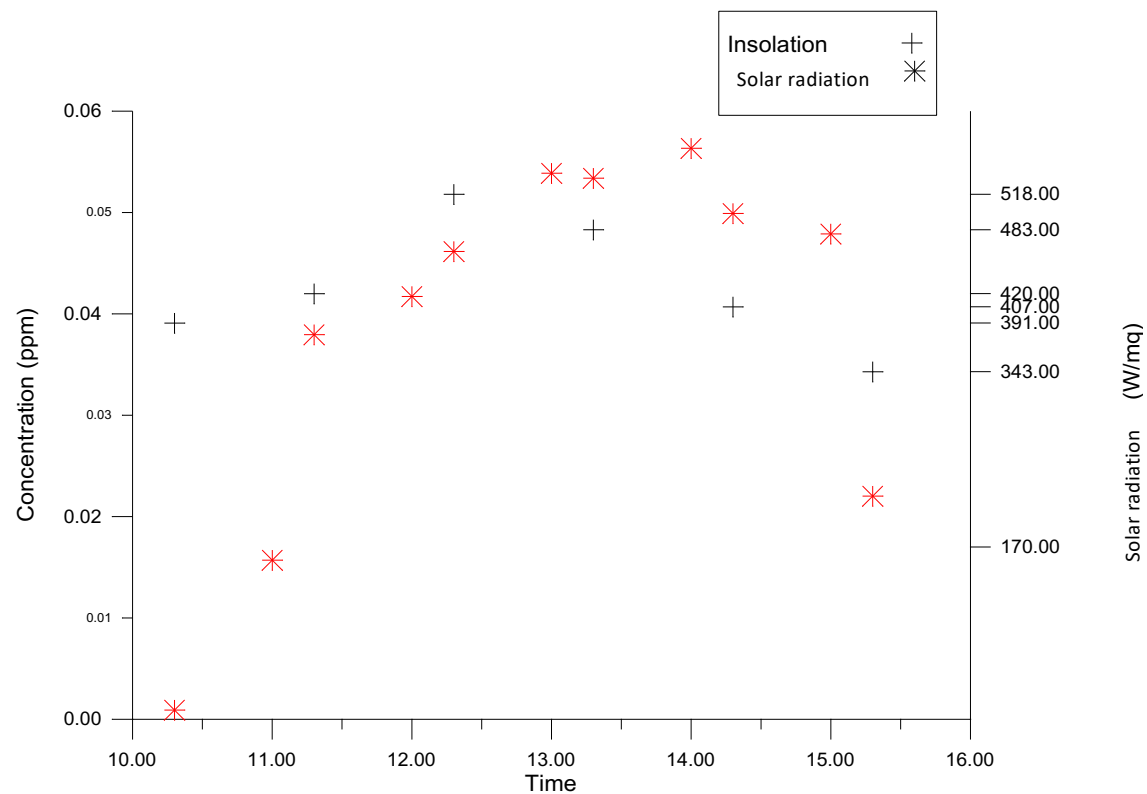
Applicazioni Laser al monitoraggio «ambientale»

- ▶ Misure di grandezze di interesse della Fisica dell'Atmosfera
 - ▶ Misure di profili di Vapor d'Acqua e ozono troposferico
 - ▶ Misure di Particolato atmosferico (di origine antropica e non)
 - ▶ Misura di profili di temperature
 - ▶ Misura di profili di densità
- ▶ Monitoraggio ambientale
 - ▶ Misura di presenza d'incendi boschivi
 - ▶ Controllo del traffico urbano
 - ▶ Misura d'inquinanti atmosferici
- ▶ Applicazioni alla Safety and Security in campo CBRNe
 - ▶ “Detection” e “Identification” di agenti chimici aggressivi

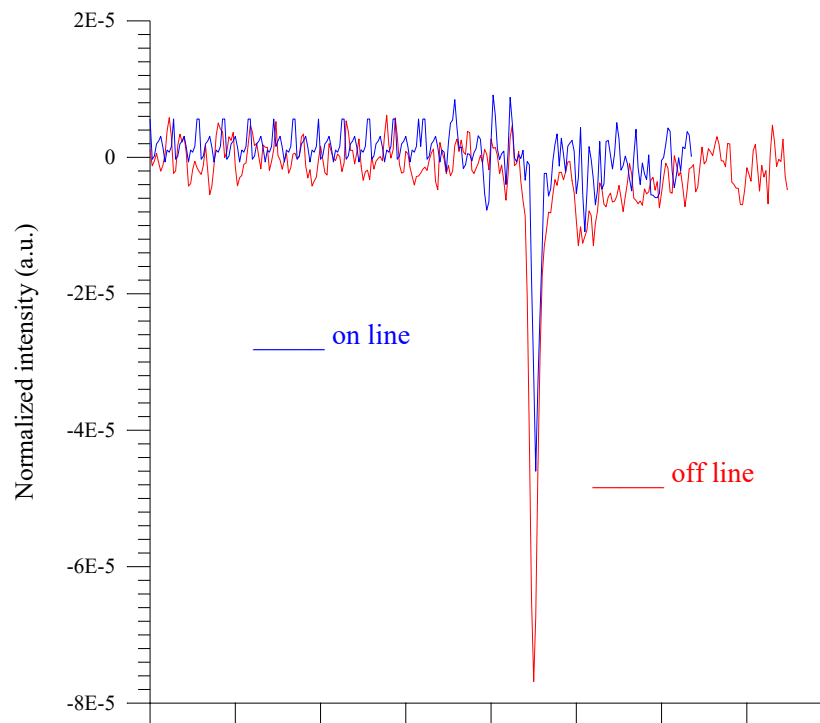
Fisica dell'atmosfera: misure di vapor d'acqua troposferico



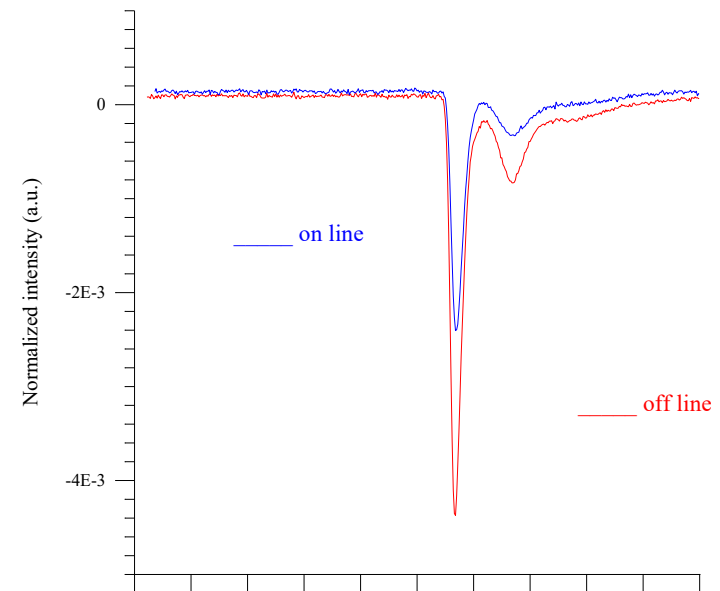
Fisica dell'atmosfera: misure di ozono troposferico



Fisica dell'atmosfera: misure di ozono troposferico

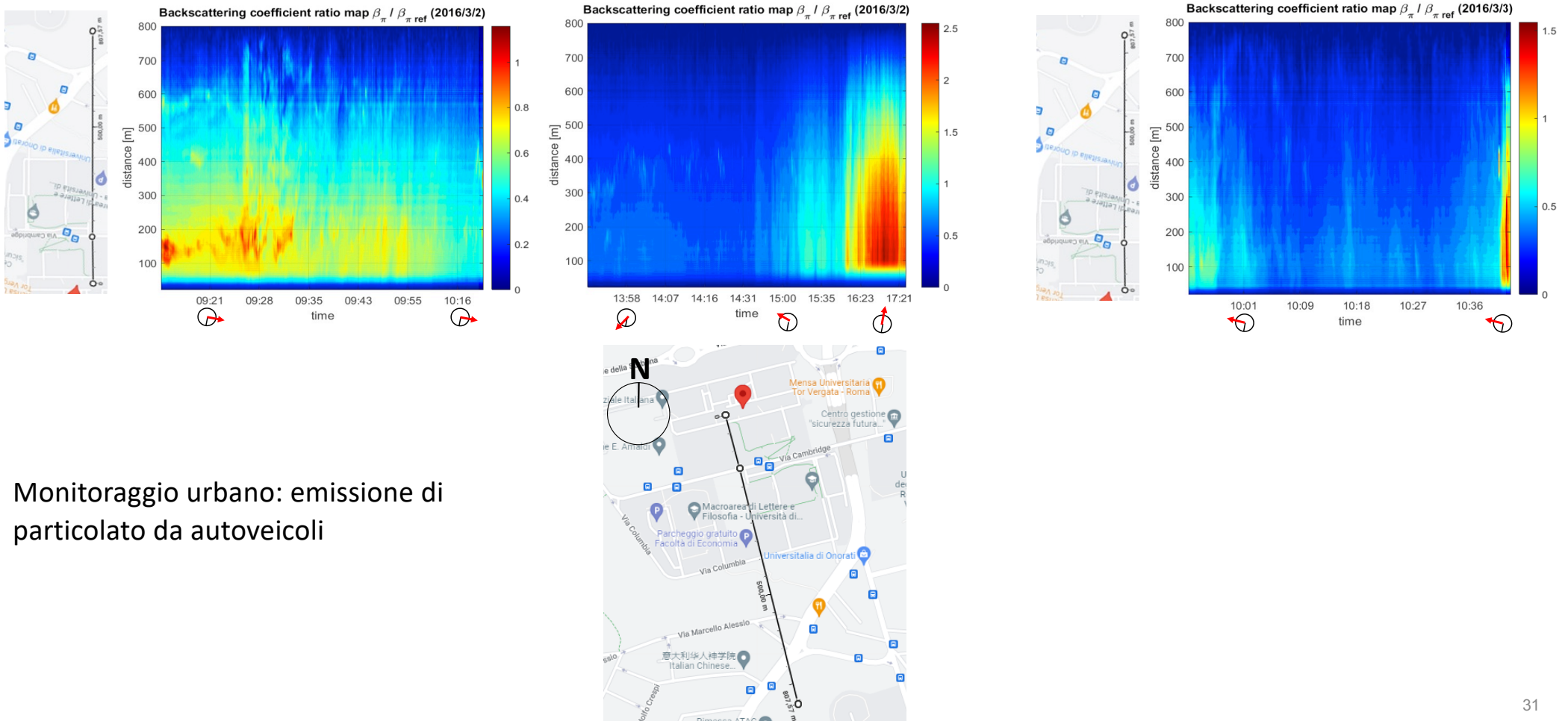


Ozone concentration
 $C = 49 \pm 14$ ppb
 $\Delta R = 5.4$ km ;



Ozone concentration
 $C = 51 \pm 17$ ppb
 $\Delta R = 3.2$ km ;

Fisica dell'atmosfera: misure di particolato troposferico



Monitoraggio urbano: emissione di particolato da autoveicoli

Fisica dell'atmosfera: misure di particolato stratosferico

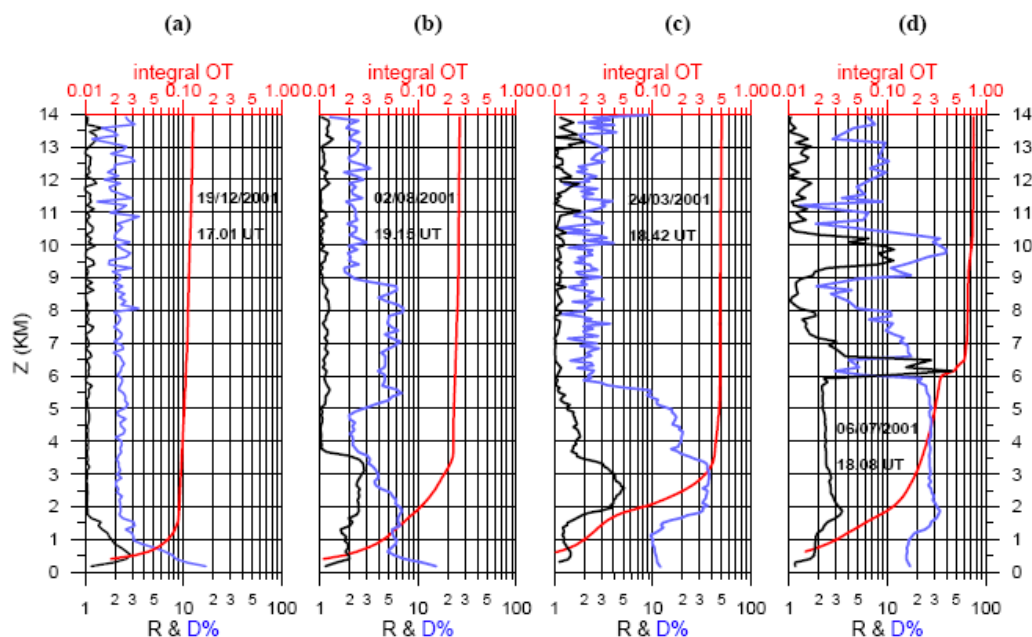


Fig. 1. Typical lidar profiles (at 532 nm) representative of: (a) clear winter conditions; (b) summer PBL aerosol and pre-dust conditions; (c) spring dust conditions, and (d) summer dust, liquid cloud and cirrus cloud conditions. The three curves reported in each plot represent vertical profiles of backscatter ratio R (black line), depolarization ratio $D(\%)$ (blue line), and (red line) the integral (from ground) of the extinction coefficient, i.e. $OT(z)$, respectively.



TOR VERGATA
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA

Esempi di applicazioni al monitoraggio ambientale e alla misura degli inquinanti atmosferici

Il Laser per il monitoraggio ambientale

Incendi boschivi



Perdite su impianti



Il Laser per il monitoraggio ambientale



Il Laser per il monitoraggio ambientale

Tecniche laser per misurare anomalie: «detection technologies»



Il Laser per il monitoraggio ambientale



Rilevare un'anomalia:
cosa significa?



Qualcosa sta accadendo in
un punto topografico
specifico = **ALLARME**

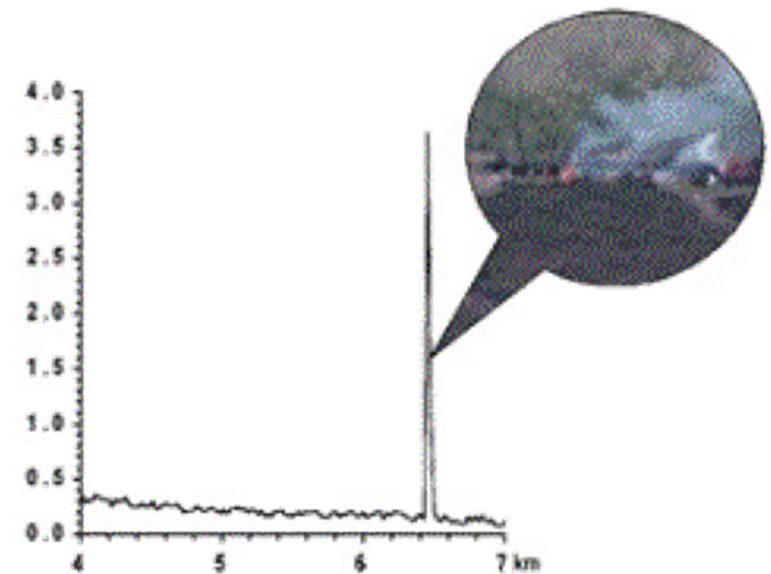
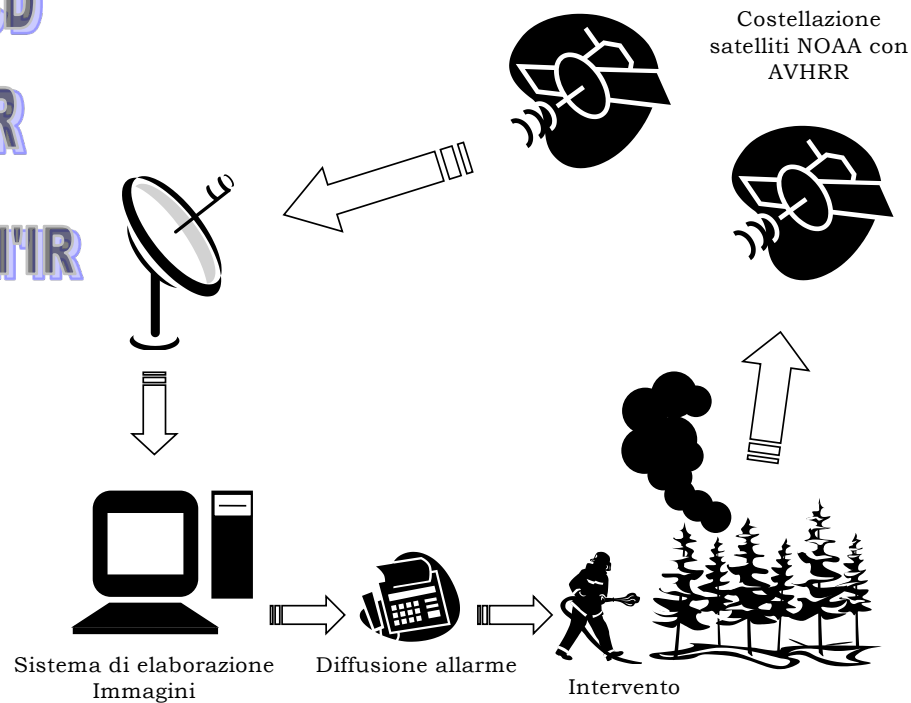
Tecnica Lidar: Rivelazione di Incendi Boschivi

Telecamere CCD

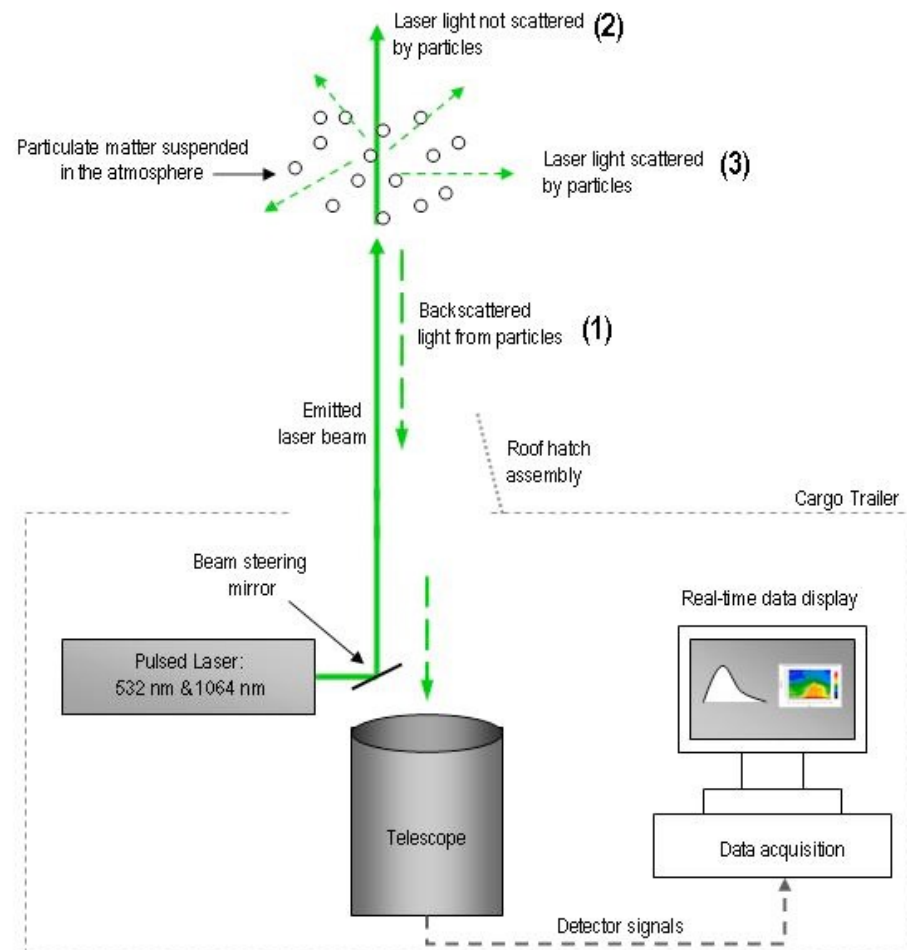
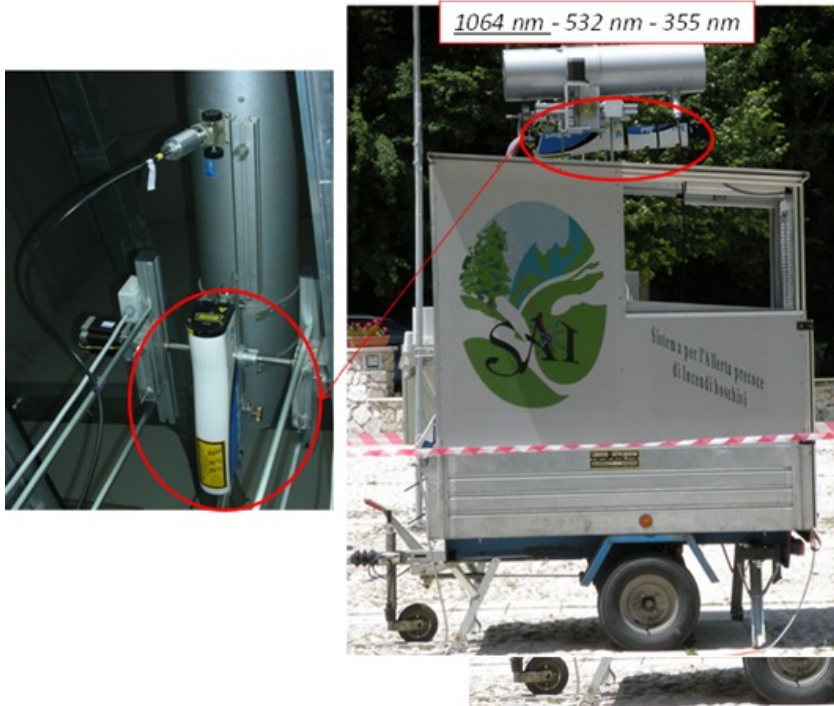
Radiometri all'IR

Spettrometri all'IR

Lidar



Tecnica Lidar: il sistema

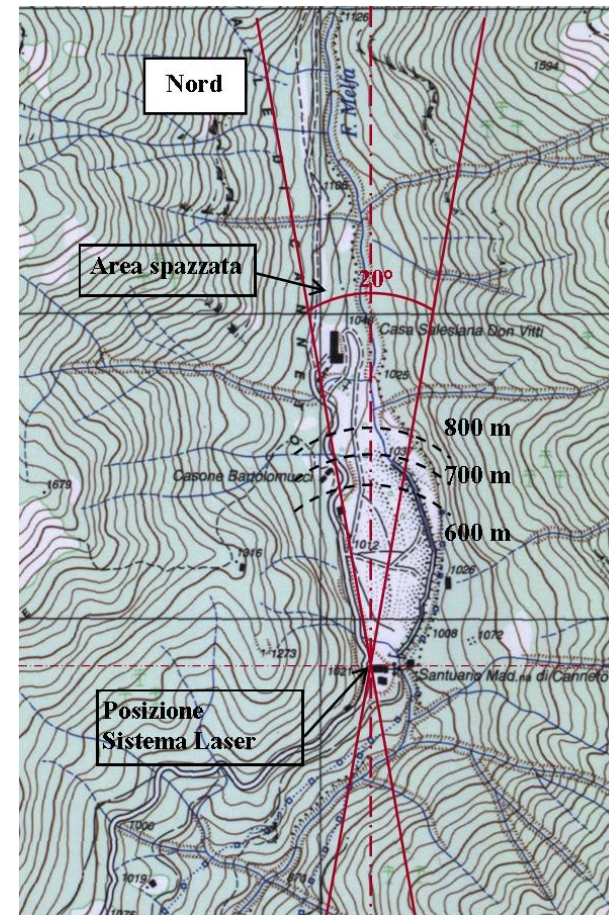


Tecnica Lidar: la calibrazione e i test

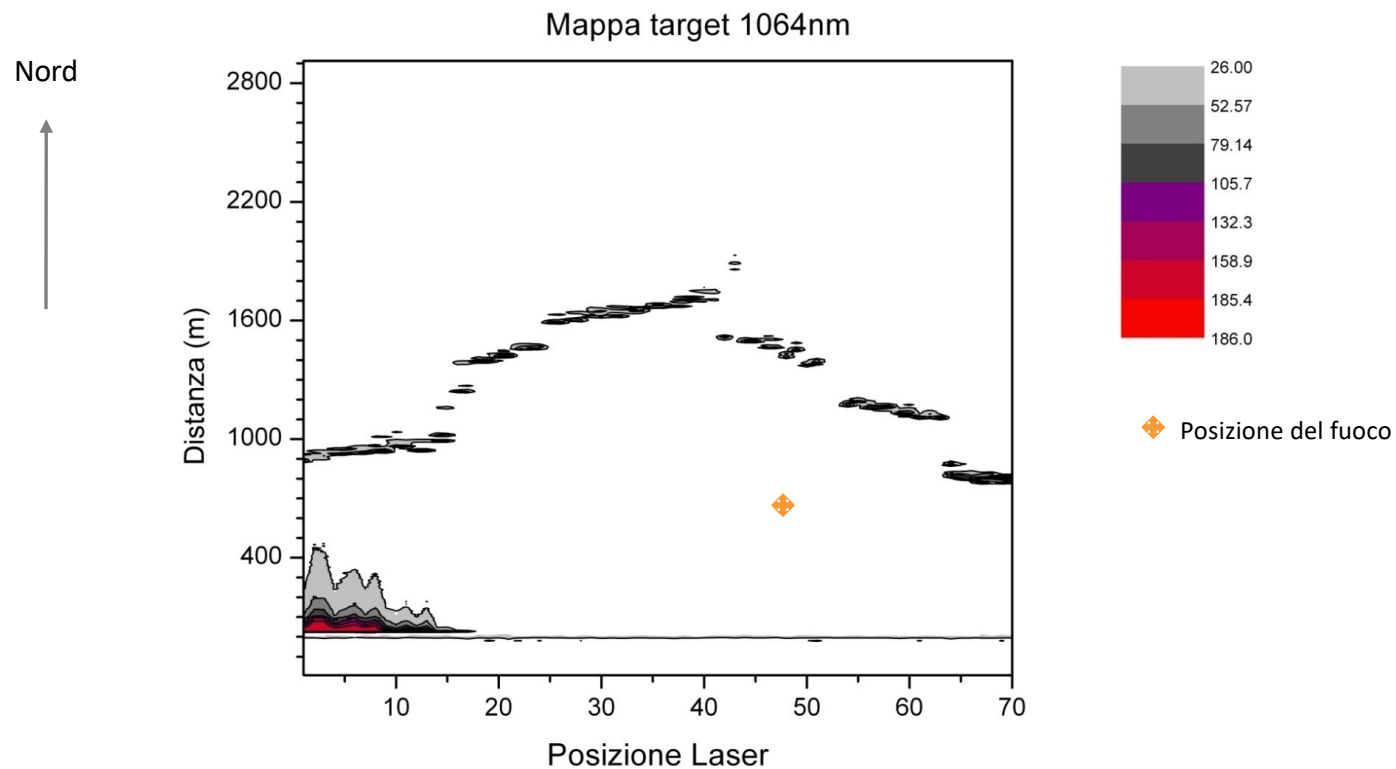


Tecnica Lidar: la calibrazione e i test

- Determinazione del sito di misura
- Integrazione mappe orografiche
- Costruzione mappe orografiche da dati sperimentali
“Mappa bianca”

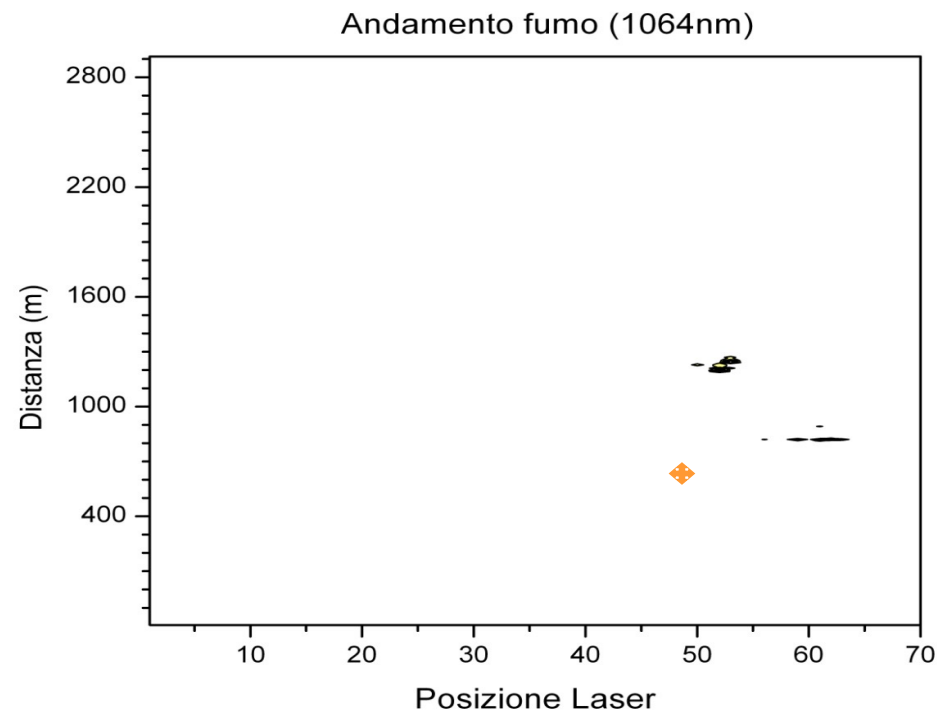


Tecnica Lidar: la calibrazione e i test



Tecnica Lidar: la calibrazione e i test

Nord
↑

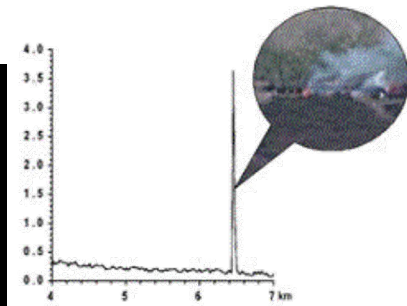
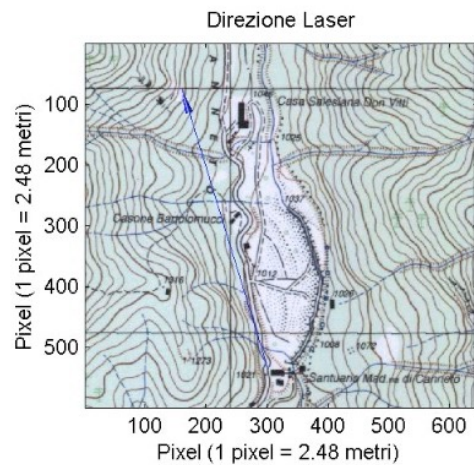


◆ Posizione del fuoco

Tecnica Lidar: la misura

SAI: Elev. 1009 m 41° 40' 44.9" N

13° 54' 30.3" E



Tecnica Lidar: la misura

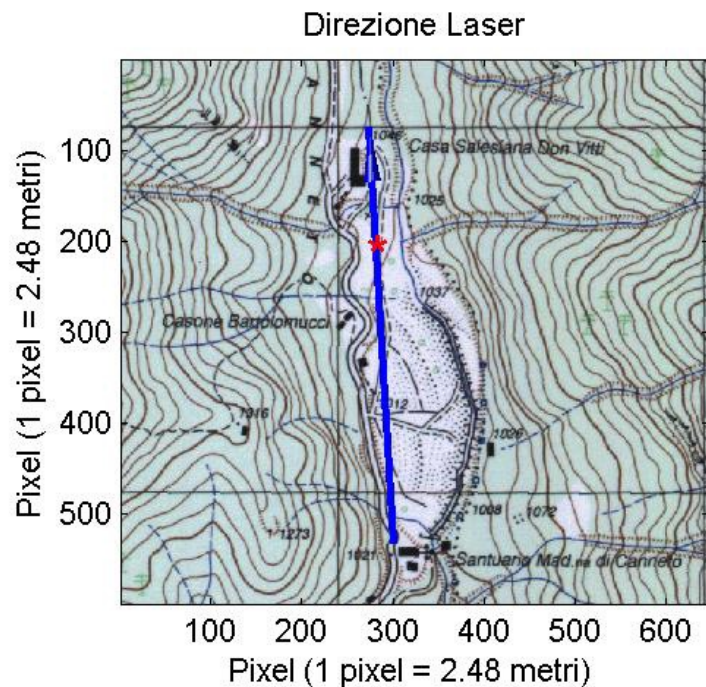
SAI: Elev. 1009 m 41° 40' 44.9" N

13° 54' 30.3" E

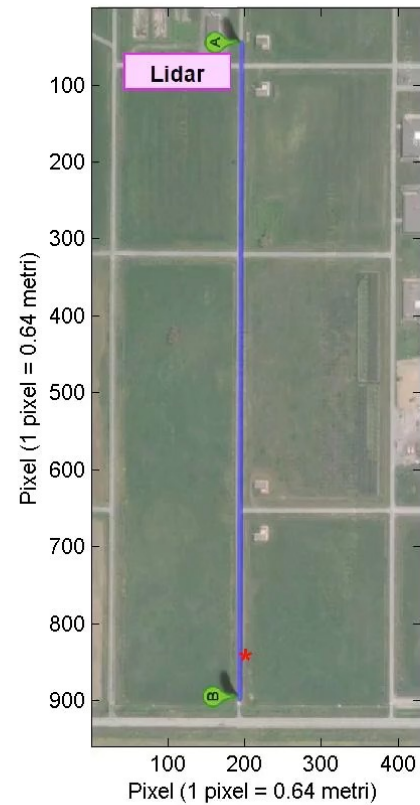
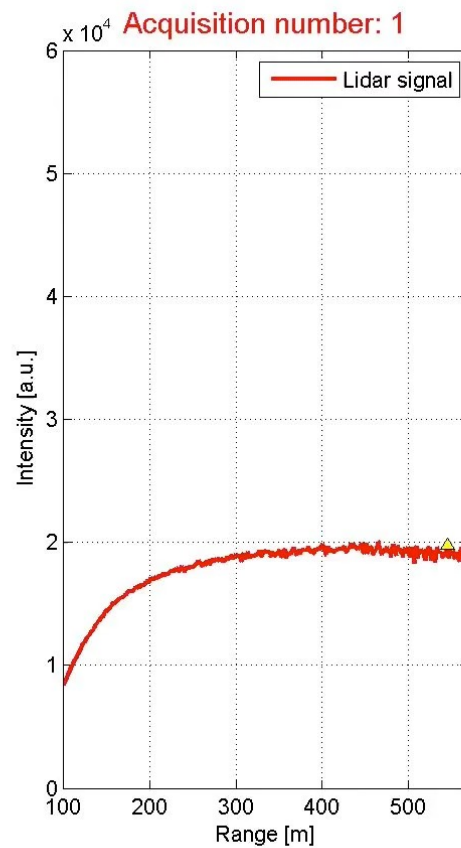
ALLARME

Direzione : 3° 26' 22" NORD

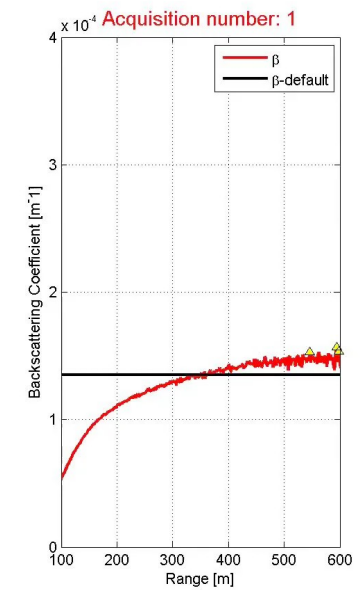
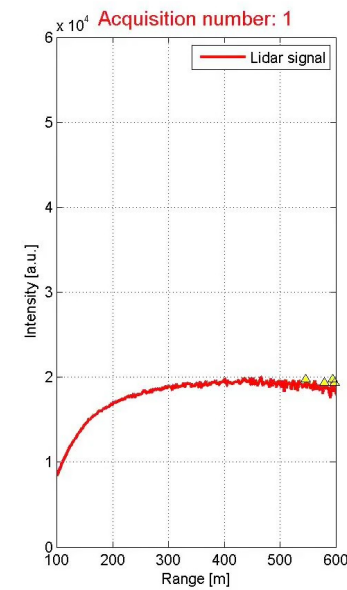
Distanza FUMO = 811 m



Tecnica Lidar: rivelazione sorgenti di emissione



Tecnica Lidar: rivelazione sorgenti di emissione



Sistema Lidar Compatto (COLI)

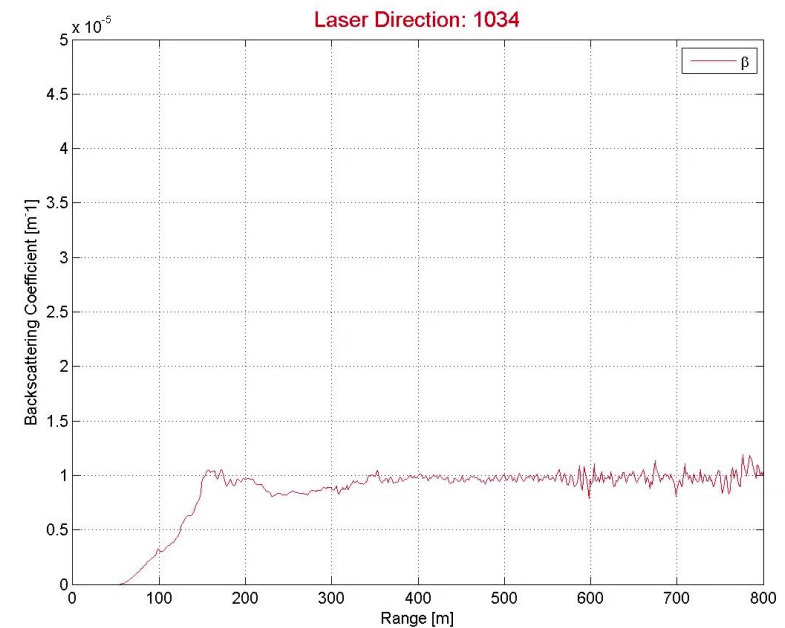
COLI system

Mini-Lidar unit (operating at 1064 nm).



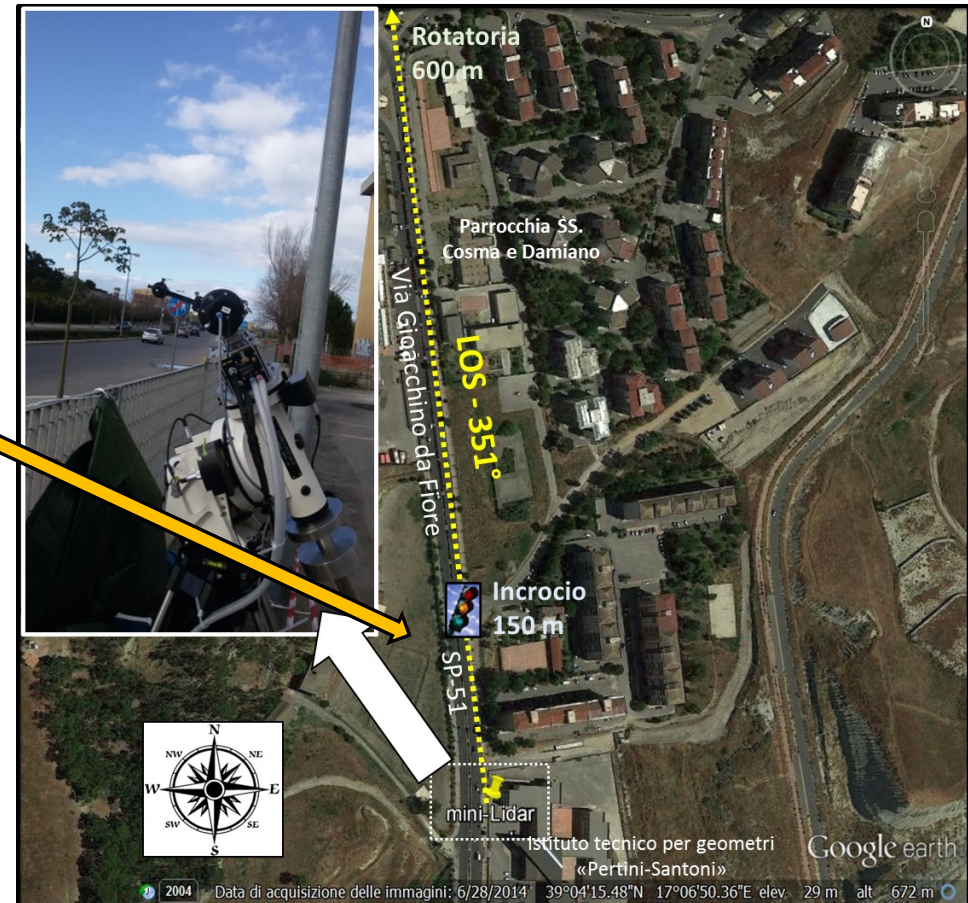
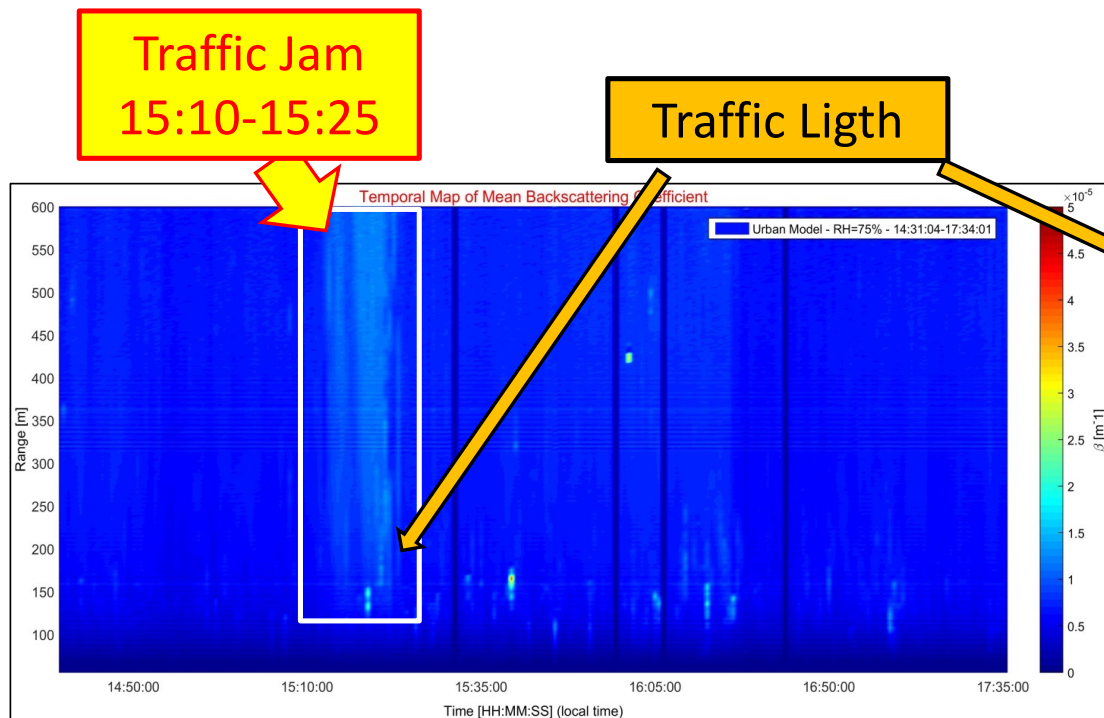
Sistema Lidar Compatto (COLI)

- COLI system – particulate detection in urban area



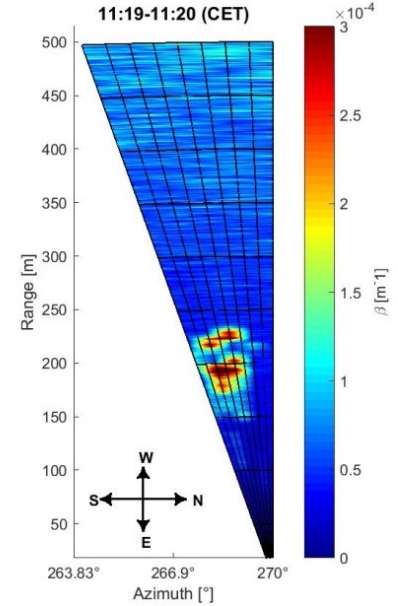
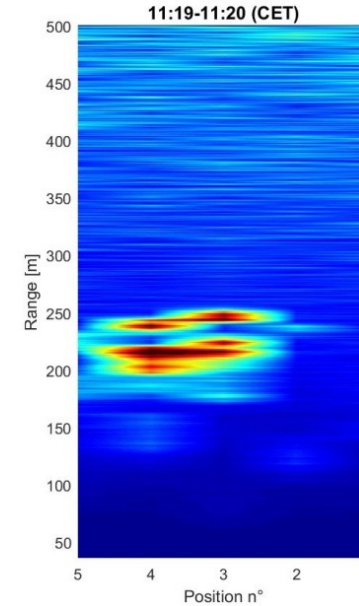
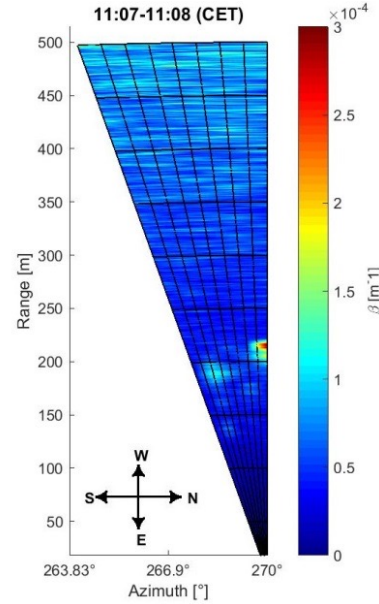
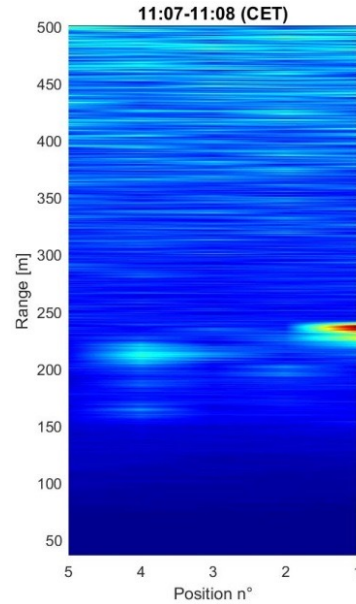
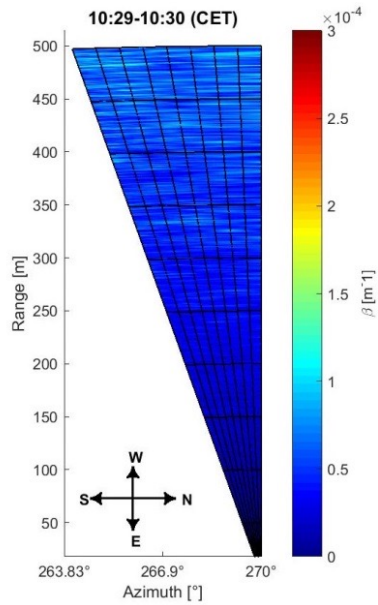
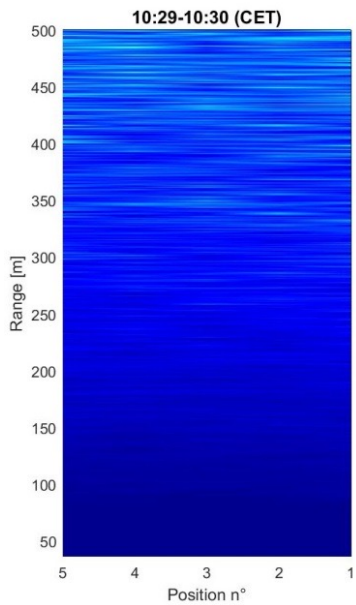
Sistema Lidar Compatto (COLI)

- COLI system – particulate detection in urban area

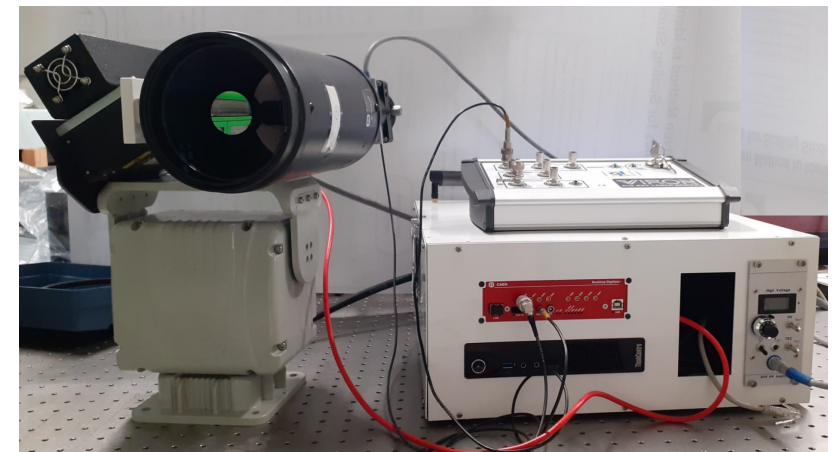
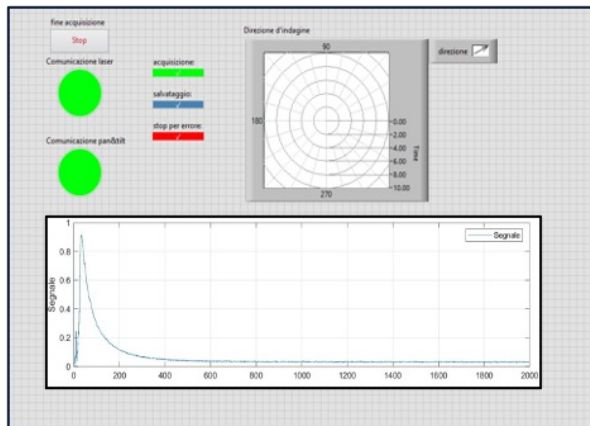


Sistema Lidar Compatto (COLI)

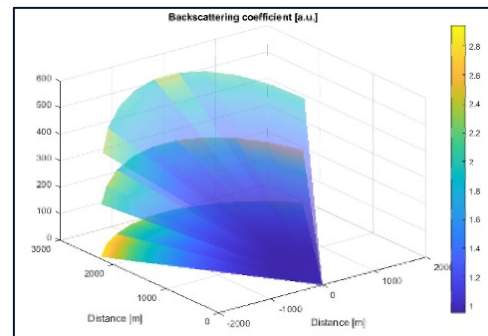
- Rivelazione automatica di sorgenti di inquinanti in area industriale



Sistema Lidar Ultra Compatto (UCOLI)

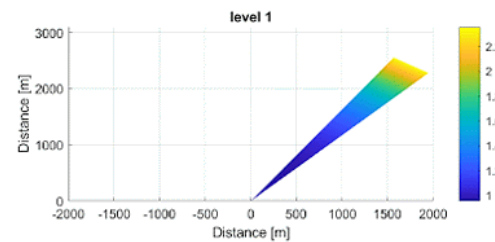


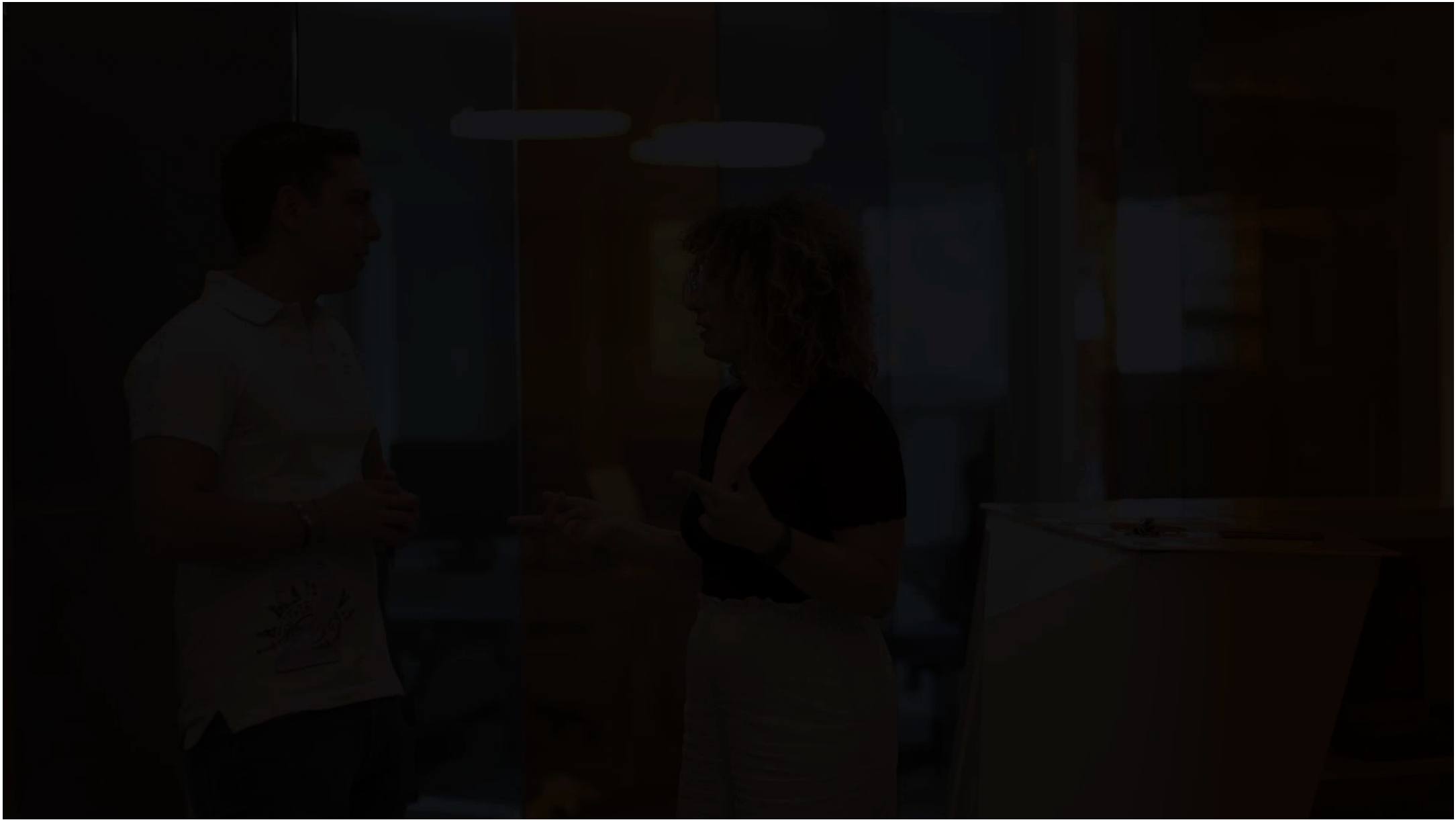
Funded by TAAL s.r.l. into
the Project - PIA SENSOR
(code 7LZ5BJ7 - CUP
B91B21006390007).



Sistema Lidar Ultra Compatto (UCOLI)

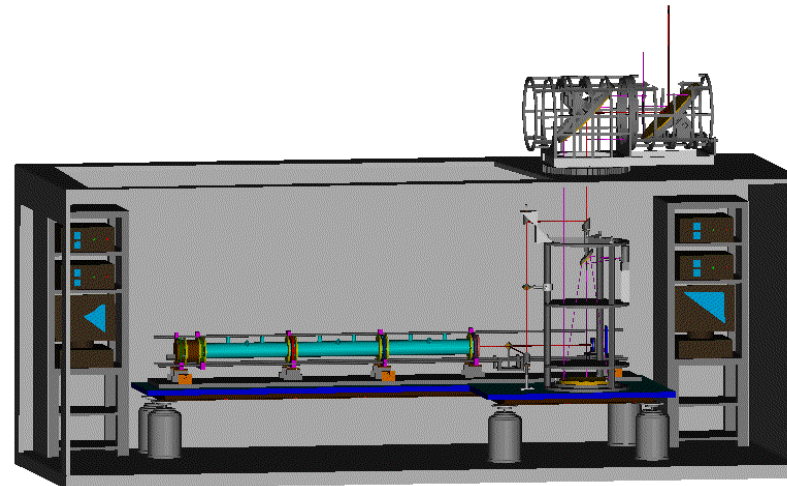
Come UCOLI lavora





Sistema Dial – Identificazione delle sostanze

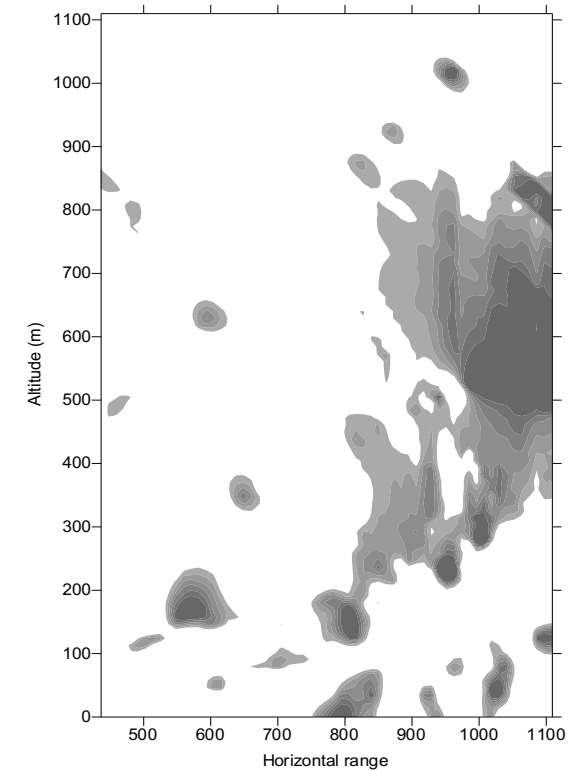
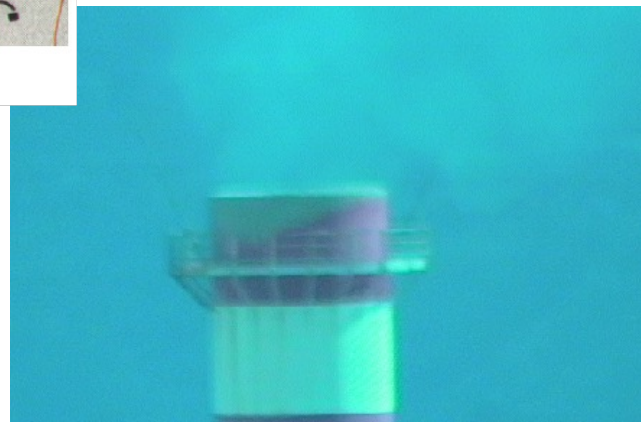
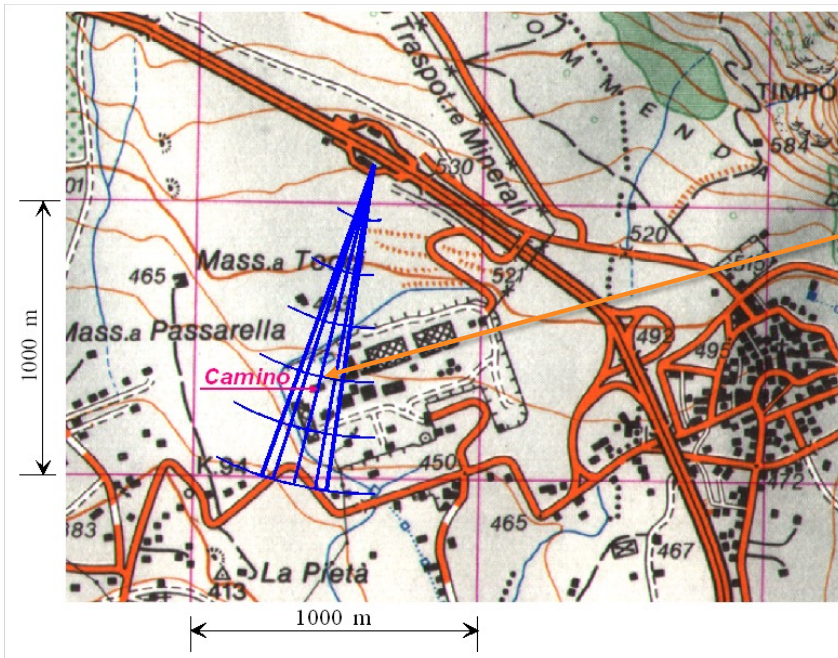
Il Sistema



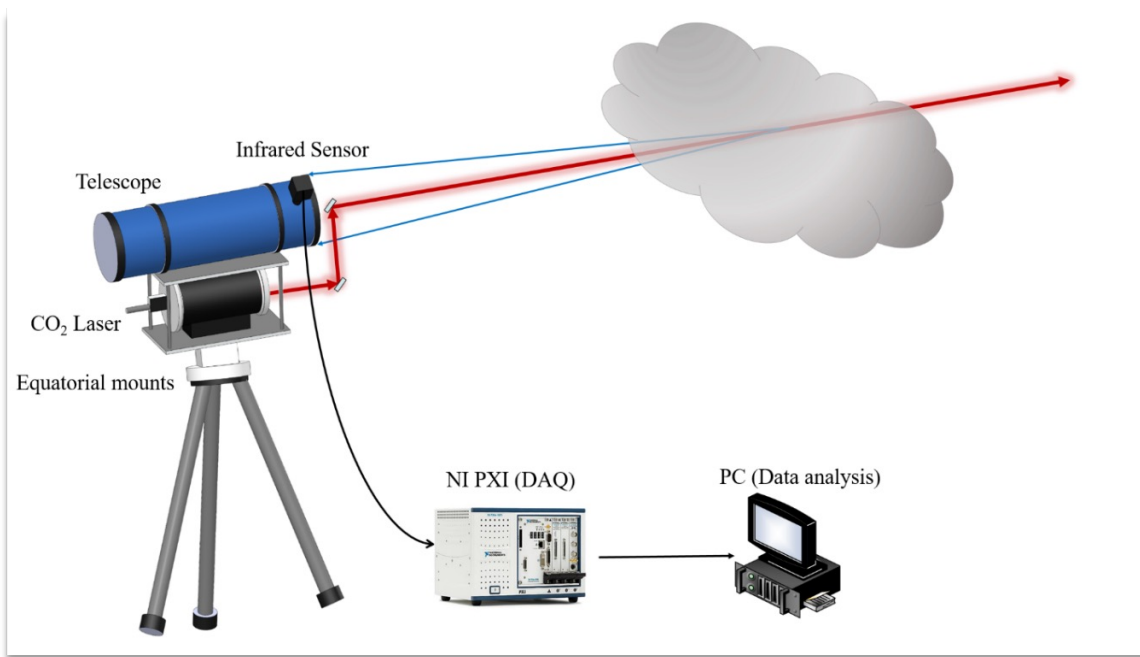
Sistema Dial – Identificazione delle sostanze

SOSTANZE	Riga (on)	Riga (off)	$\Delta\alpha$	Sensibilità per 5,4 km SNR=1,5
Ammoniaca (NH ₃)	9R8	9R10	25.5	18 ppb
Ozono (O ₃)	9P14	9P24	12	39 ppb
vapore acqueo (H ₂ O)	10R20	10R18	7.7E-4	614 ppm
Diossido di zolfo (SO ₂)	9R26	9R28	0.013	36 ppm
Etilene (C ₂ H ₄)	10P14	10P16	29.3	16 ppb
Freon 11 (CFCl ₃)	9R22	9P18	29.1	16 ppb
Freon 12 (CFCl ₂)	10P32	10P12	35.6	13 ppb
Hidrazina (N ₂ H ₄)	10P22	10P28	2.71	174 ppb
Etilmercaptano (C ₂ H ₂ SH)	10R26	10P20	0.38	1218 ppb
Vinilcloride (C ₂ H ₃ Cl)	10P22	9R18	8.75	53 ppb
Tricloroetilene (C ₂ HCl ₃)	10P20	10R20	12.56	37 ppb
Etil Chloride (C ₂ H ₅ Cl)	10R16	10P20	3.24	142 ppb
Etilene Chloride (C ₂ H ₄ Cl ₂)	10P20	10R16	0.51	907 ppb
Cloroprene (C ₄ H ₅ Cl)	10R18	9P22	9.05	51 ppb
Percloroethylene (C ₂ Cl ₄)	10P34	10R24	4.8	96 ppb
UDMH (CH ₃) ₂ N ₂ H ₂)	10P320	10R10	2.04	226 ppb

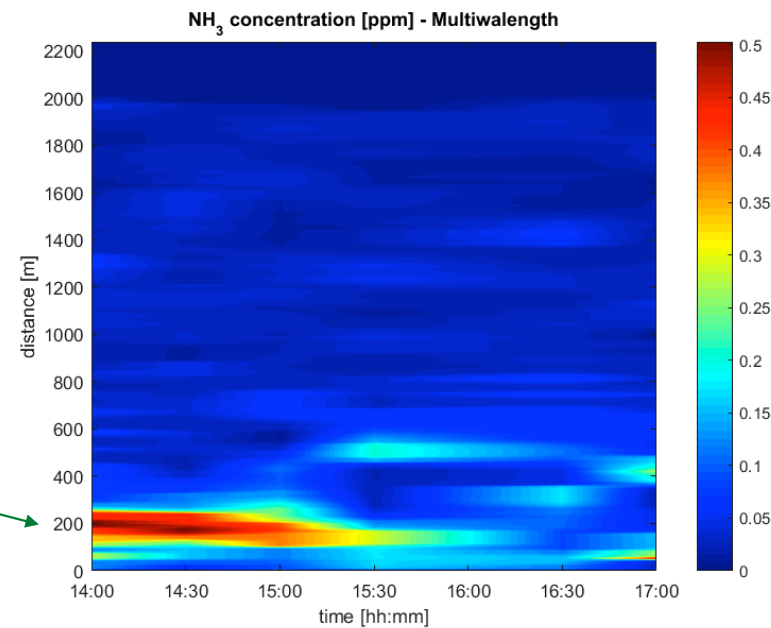
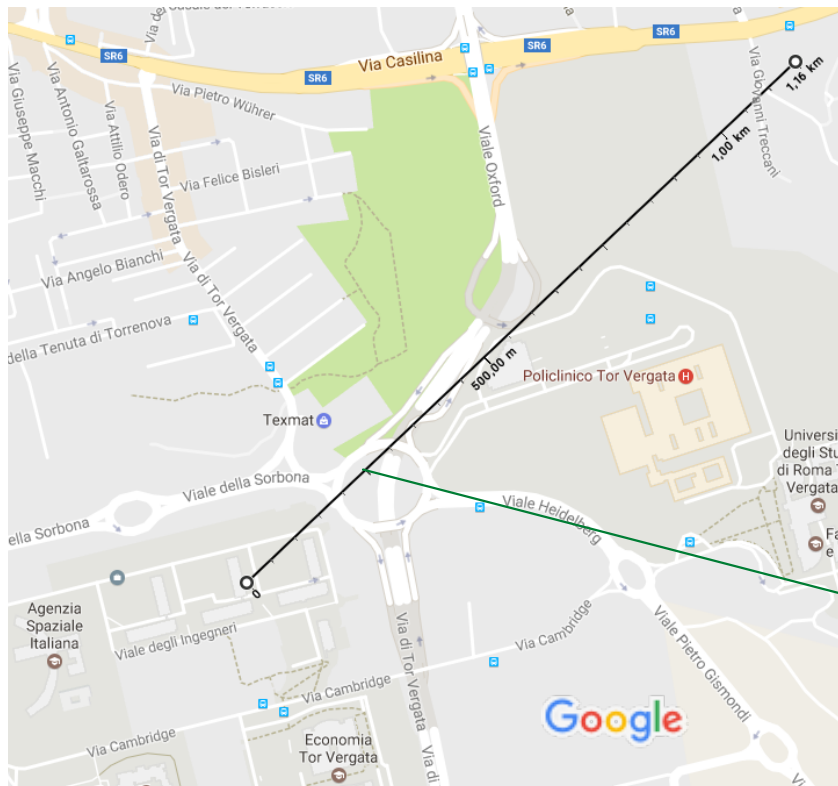
Sistema Dial – Identificazione delle sostanze



Sistema Dial compatto – Identificazione delle sostanze



Sistema Dial – Identificazione delle sostanze





TOR VERGATA
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA

Applicazioni alla “Safety and Security” in ambito civile e militare (prevenzione rischio CBRN)

Il Laser per il monitoraggio ambientale

Eventi **C**BRN

Chemical event:

Natural or incident
event



Viareggio (2009)

War



Terrorism



Sistema Dial – Identificazione delle sostanze



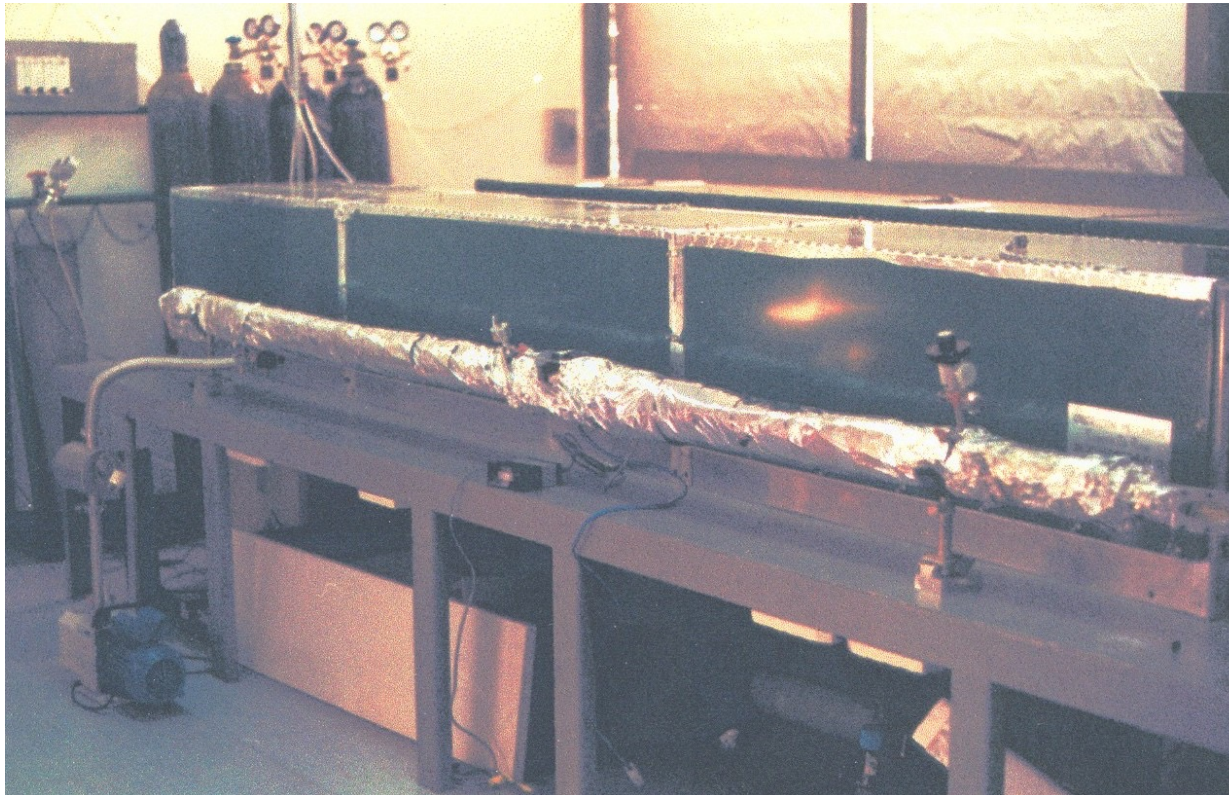
Download from
Dreamstime.com
This watermarked comp image is for previewing purposes only.

ID 34260590
Viada Grechko | Dreamstime.com

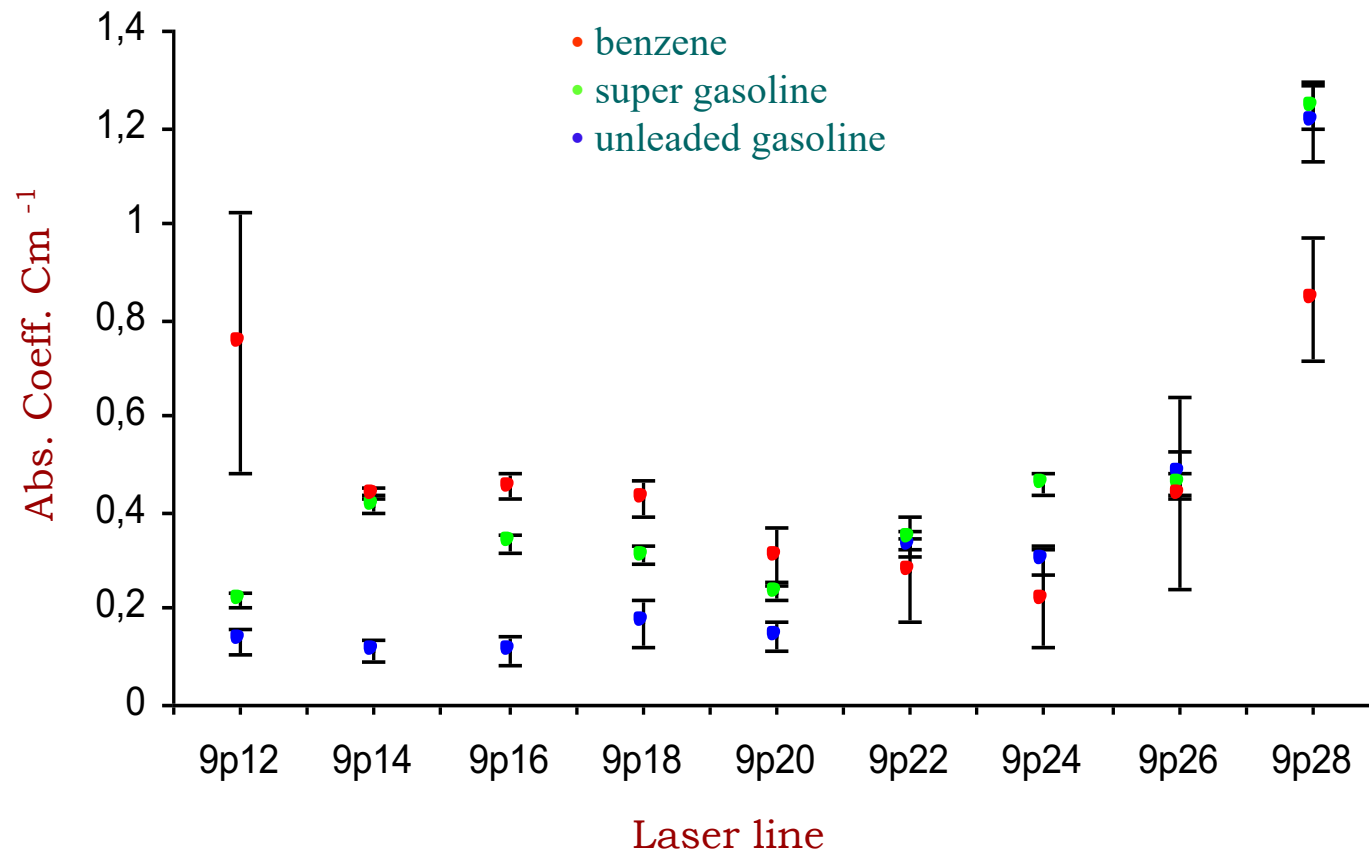


Determinare
l'impronta della
sostanza e **identificarla**

Misure di assorbimento in cella di gas in traccia e determinazione dei fingerprints



Misure in cella di assorbimento: un esempio



Misure in cella di sostanze aggressive

- **Misure di assorbimento in cella di componenti chimicamente aggressivi (CWA)**

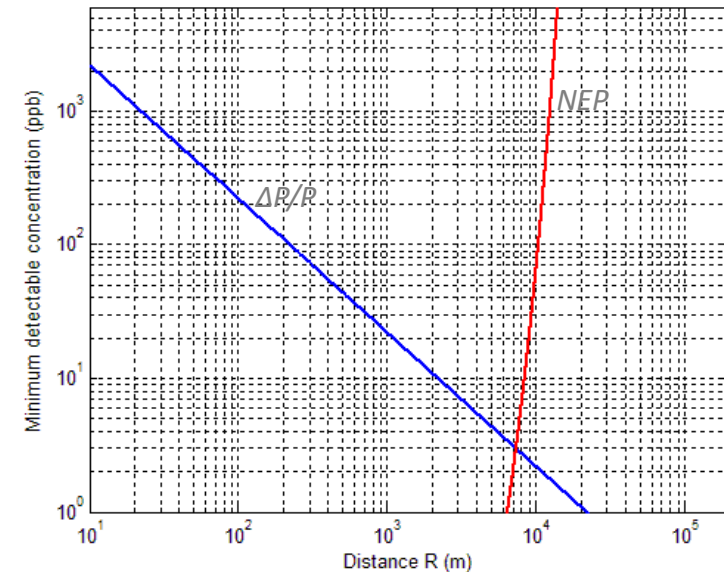
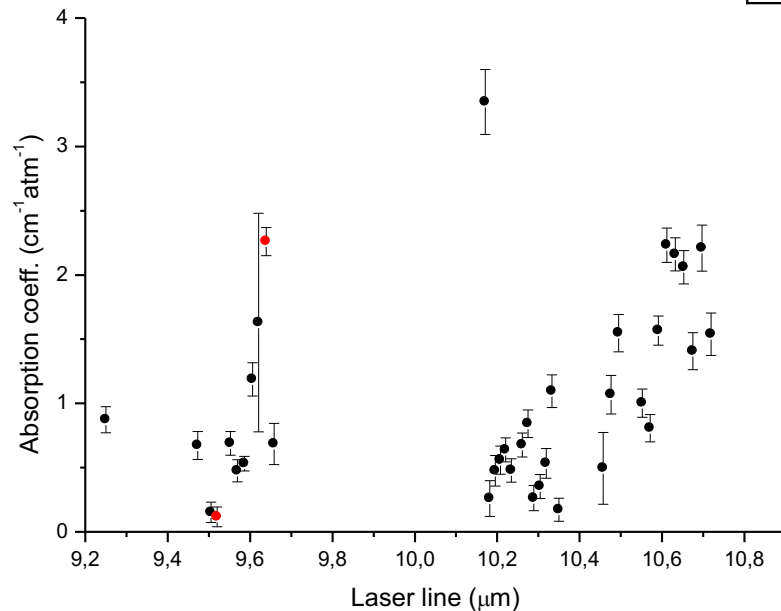
Centro Tecnico
Logistico NBC
“Santa Lucia”



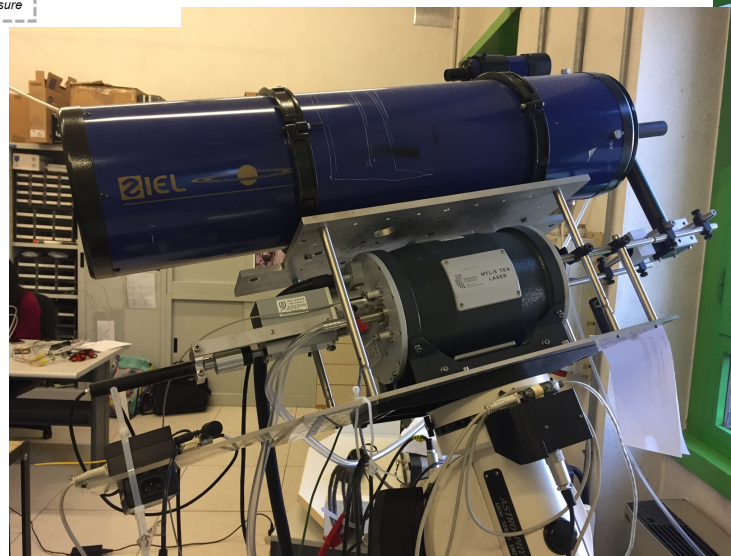
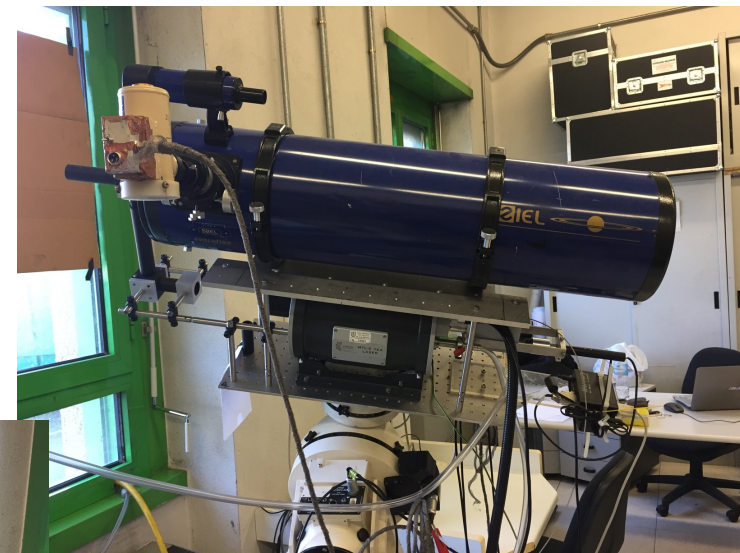
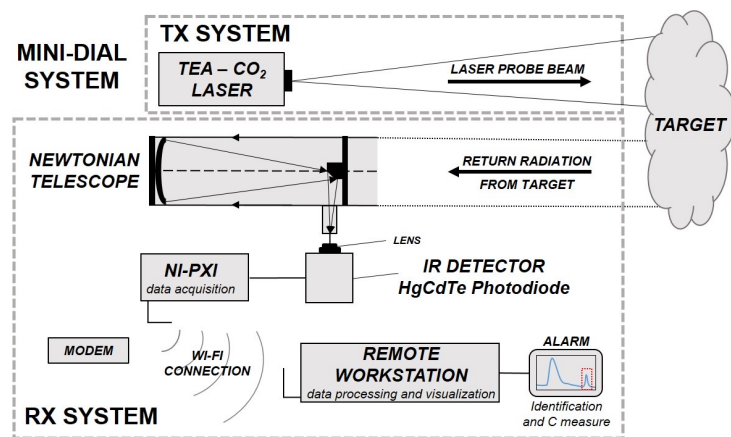
Misure in cella di assorbimento: un esempio

Misure di Assorbimento di Yprite e valutazione della sensibilità

	Laser line	Laser line (cm-1)	Absorption coeff. (cm-1*atm-1)	Error
λ_{OFF}	9P16	1050,42	0,12	8%
λ_{ON}	9P30	1037,45	2,26	11%



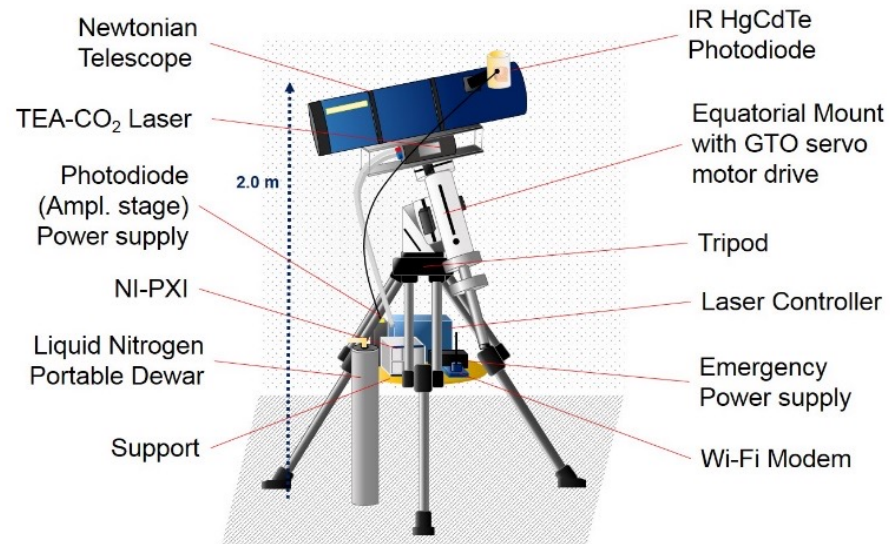
TELEMACO (TELErivelamento e Monitoraggio Automatizzato Composti Organici aggressivi)



TELEMACO (TELErivelamento e Monitoraggio Automatizzato Composti Organici aggressivi)

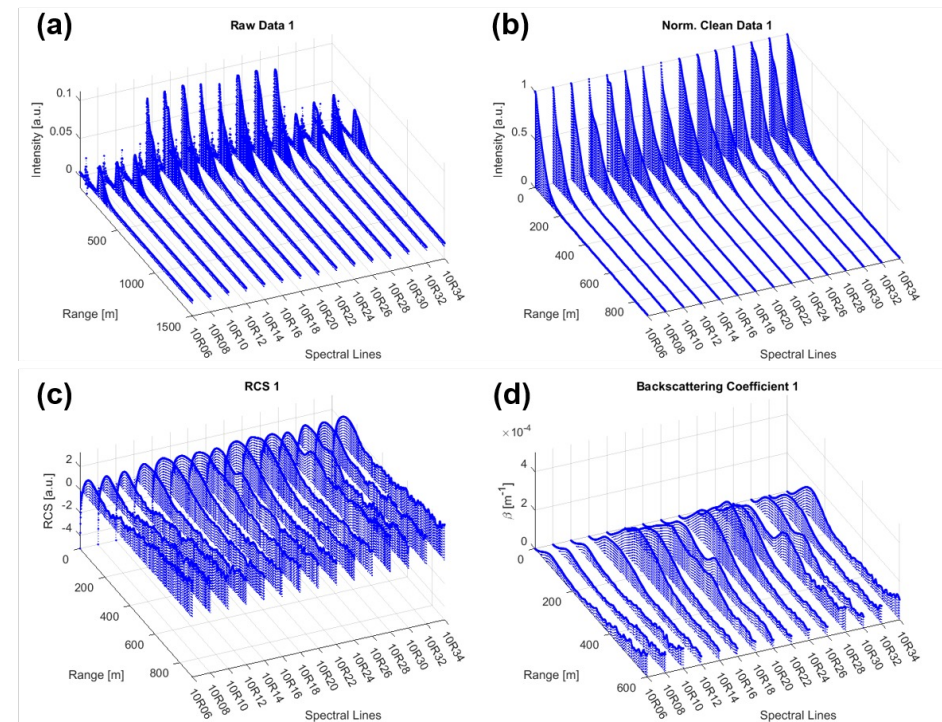
Chemical compound	Chemical formula	9R			10R			10P		
		ON(id)	OFF(id)	$\Delta\sigma$ [cm ⁻¹]	ON(id)	OFF(id)	$\Delta\sigma$ [cm ⁻¹]	ON(id)	OFF(id)	$\Delta\sigma$ [cm ⁻¹]
Water	H ₂ O	30(13)	28(12)	0.1434·10 ⁻³ [c]	20(8)	18(7)	7.7·10 ⁻⁴ [a-e]	n.a.	n.a.	n.a.
Allyl Alcohol	C ₃ H ₆ O	6(1)	12(3)	1.1525	32(14)	14(5)	0.5105	30(3)	32(2)	1.0635
Benzene	C ₆ H ₆	6(1)	8(2)	0.0735	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Chlorobenzene	C ₆ H ₅ Cl	22(9)	24(10)	0.76	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Methanol	CH ₃ OH	20(8)	22(9)	0.923	32(14)	34(15)	0.339	n.a.	n.a.	n.a.
Piperidine	C ₅ H ₁₁ N	16(6)	22(9)	0.397	30(13)	28(12)	0.186	n.a.	n.a.	n.a.
Xylene	C ₈ H ₁₀	30(13)	32(14)	8.58413	12(4)	20(8)	0.2494	18(9)	20(8)	0.3107
Tetrachloroethylene	C ₂ Cl ₄	28(12)	30(13)	0.47486	n.a.	n.a.	n.a.	30(3)	32(2)	0.6524
Ammonia	NH ₃	8(2)	10(3)	25.5 [e]	8(2)	10(3)	0.0956 25.5 [d]	30(3)	34(1)	0.1596
		30(13)	28(12)	55.8 [c]						
				91.8 [a,b]						
Cyclohexane	C ₆ H ₁₂	n.a.	n.a.	n.a.	6(1)	8(2)	0.40637	36(0)	34(1)	0.2721
Hexane	C ₆ H ₁₄	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	30(3)	28(4)	0.001
Nitrous Oxide	N ₂ O	10(3)	12(4)	2.134·10 ⁻⁴ [f]	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Nitrogen Oxide	NO	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Nitrogen Dioxide	NO ₂	n.a.	n.a.	n.a.	8(2)	10(3)	7.397·10 ⁻⁴ [f]	30(3)	28(4)	0.0068 [f]
Sulfur Dioxide	SO ₂	26(11)	28(12)	0.013 [e] 0.0114 [f]	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Carbon Monoxide	CO	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Carbon Dioxide	CO ₂	16(6)	18(7)	4.31·10 ⁻⁵ [g]	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Polycyclic Aromatic Hydrocarbons	PAH	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Ethane	C ₂ H ₆	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	26(5)	12(12)	4.603·10 ⁻⁵ [f]
Ethylene	C ₂ H ₄	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	14(11)	16(10)	27.57 [f]
										29.3 [e]
										30.345 [d]
										34.17 [a,b] 35 [c]
Acetylene	C ₂ H ₂	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Particulate Matter	PM _{2.5}	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
	PM ₁₀	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Methane	CH ₄	10(3)	12(4)	3.218·10 ⁻⁴ [f]	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Ozone	O ₃	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
References [a] Hinkley, 1976 [b] Measures, 1992 [c] Ben-David, 1999 [d] Fujii, 2005 [e] Bellecci, Gaudio, 2007 [f] HITRAN Database, 2017 NB) If not otherwise stated – results relative to in-cell measurements, 2016										

TELEMACO (TELErivelamento e Monitoraggio Automatizzato Composti Organici aggressivi)

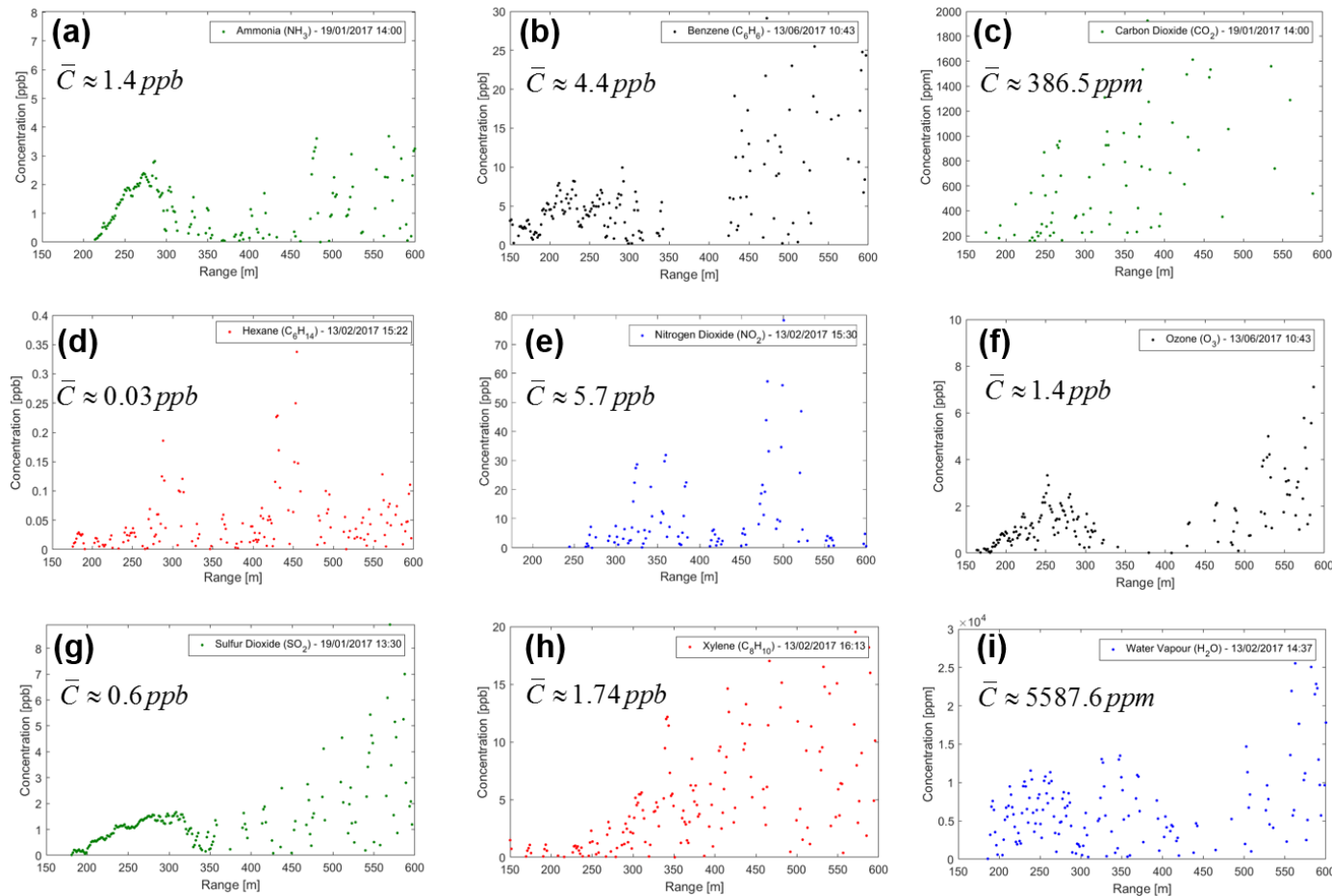


Misure di concentrazione con tecnica multiwavelength

BANDE SCANSIONATE	SOSTANZE ESAMINATE
9R	Vapore Acqueo (H_2O); Anidride Carbonica (CO_2); Ammoniaca (NH_3); Diossido di Zolfo (SO_2); Xilene (C_8H_{10}); Metanolo* (CH_3OH); Clorobenzene* (C_6H_5Cl); Piperidina* ($C_5H_{11}N$); Tetracloroetilene* (C_2Cl_4).
10R	Vapore Acqueo (H_2O).
10R	Vapore acqueo (H_2O); Diossido di Azoto (NO_2); Ammoniaca (NH_3); Xilene (C_8H_{10}); Piperidina* ($C_5H_{11}N$).
10P	Diossido di Azoto (NO_2); Xilene (C_8H_{10}); Esano (C_6H_{14}).
9P	Ozono (O_3); Benzene (C_6H_6).
10R	Vapore Acqueo (H_2O); Ammoniaca (NH_3);



Misure di concentrazione con tecnica multiwavelength



Misure di concentrazione con tecnica multiwavelength

		Sensibilità mini-DIAL		Incertezza di misura mini- DIAL	Sensibilità sistemi di misura convenzionali	Incertezza di misura sistemi convenzionali
Sostanza	Formula	N _{min} (R=250 m)	N _{min} (R=600 m)	U [%]	N _{min} [ppb]	U [%]
Vapore Acqueo	H ₂ O	≈ 26 ppm	≈ 12 ppm	27%	< 0.003 ppt	< 1.5%
Anidride Carbonica	CO ₂	≈ 19 ppm	≈ 7.5 ppm	30%	< 0.15 ppm	< 1%
Diossido di Zolfo	SO ₂	≈ 60 ppt	≈ 30 ppt	30%	≈ 0.4 ppb	0.5%
Diossido di Azoto	NO ₂	≈ 30 ppt	≈ 12 ppt	28%	≈ 0.04 ppb	0.5%
Ammoniac	NH ₃	≈ 15 ppt	≈ 5 ppt	30%	≈ 2.85 ppb	15%
Ozono	O ₃	≈ 6.5 ppt	≈ 2.8 ppt	30%	≈ 0.6 ppb	0.5%
Benzene	C ₆ H ₆	≈ 4 ppt	≈ 2 ppt	30%	≈ 12 ppt	0.3%
Xilene	C ₈ H ₁₀	≈ 3 ppt	≈ 1.5 ppt	28%	≈ 2.3 ppt	5%
Esano	C ₆ H ₁₄	≈ 2 ppt	≈ 0.7 ppt	28%	≈ 2.8 ppt	5%

References:

Authors	Title	Year	Volum e	Issue	Art. No.	Page start	Page end	Page count	DOI	Abbreviated Source Title
Puleio A., Rossi R., Gaudio P.	Calibration of spectra in presence of non-stationary background using unsupervised physics-informed deep learning	2023	13	1	2156				10.1038/s41598-023-29371-9	Sci. Rep.
Rutigliano N., Martellucci L., Puleio A., Rossi R., Wyss I., Gaudio P.	Detection of warning signal of particulate emission on the basis of fixed threshold in real-time using a lidar system	2023	18		C0500 56				10.1088/1748-0221/18/05/C05006	J. Instrum.
Puleio A., Martellucci L., Rossi R., Rutigliano N., Wyss I., Gaudio P.	An alternative SNR-based weighted-LSM algorithm to classify and measure the concentration of Biological Agents from Laser-Induced Fluorescence	2023	18		C0500 54				10.1088/1748-0221/18/05/C05004	J. Instrum.
Gabbarini V., Puleio A., Rossi R., Malizia A., Gaudio P.	A Weighted-LSM Method to Improve Classification and Concentration Evaluation from Laser-Induced Fluorescence Spectra	2022	22	20	7721				10.3390/s22207721	Sensors (Basel)
Fellner L., Kraus M., Walter A., Duschek F., Bocklitz T., Gabbarini V., Rossi R., Puleio A., Malizia A., Gaudio P.	Determination of composition of mixed biological samples using laser-induced fluorescence and combined classification/regression models	2021	136	11	1122				10.1140/epjp/s13360-021-02019-1	Eur. Phys. J. Plus

Fumian F., Chierici A., Bianchelli M., Martellucci L., Rossi R., Malizia A., Gaudio P., d'Errico F., Di Giovanni D.	Development and performance testing of a miniaturized multi-sensor system combining MOX and PID for potential UAV application in TIC, VOC and CWA dispersion scenarios	2021	136	9	913				10.1140/epjp/s13360-021-01858-2	Eur. Phys. J. Plus
Marturano F., Martellucci L., Chierici A., Malizia A., Di Giovanni D., D'errico F., Gaudio P., Ciparisse J.-F.	Numerical fluid dynamics simulation for drones' chemical detection	2021	5	3	69				10.3390/drones5030069	Drones
Martellucci L., Chierici A., Di Giovanni D., Fumian F., Malizia A., Gaudio P.	Drones and sensors ecosystem to maximise the "storm effects" in case of cbrne dispersion in large geographic areas	2021	11	4		377	386		10.18280/ijssse.110411	Int. J. Safety Secu Eng.
Di Giovanni D., Fumian F., Chierici A., Bianchelli M., Martellucci L., Carminati G., Malizia A., d'Errico F., Gaudio P.	Design of miniaturized sensors for a mission-oriented uav application: A new pathway for early warning	2021	11	4		435	444		10.18280/ijssse.110417	Int. J. Safety Secu Eng.
Anselmi M., Carestia M., Divizia A., Divizia M., Di Giovanni D., Gaudio P., Malizia A., Martellucci L., Palombi L., Rossi R.	On the use of laser-induced fluorescence for biological agent detection	2021	44	04-mag	150				10.1393/ncc/i2021-21150-2	Nuovo Cimento S Ital. Fis. C
Chierici A., Malizia A., di Giovanni D., Fumian F., Martellucci L., Gaudio P., d'Errico F.	A low-cost radiation detection system to monitor radioactive environments by unmanned vehicles	2021	136	3	314				10.1140/epjp/s13360-021-01276-4	Eur. Phys. J. Plus
Rossi R., Gelfusa M., Malizia A., Gaudio P.	Adaptive quasi-unsupervised detection of smoke plume by lidar	2020	20	22	6602	1	11		10.3390/s20226602	Sensors

Fumian F., Di Giovanni D., Martellucci L., Rossi R., Gaudio P.	Application of miniaturized sensors to unmanned aerial systems, a new pathway for the survey of polluted areas: Preliminary results	2020	11	5	471				10.3390/ATMOS11050471	Atmosphere
Rossi R., Giovanni D.D., Malizia A., Gaudio P.	Measurements of vehicle pollutants in a high-traffic urban area by a multiwavelength dial approach: Correlation between two different motor vehicle pollutants	2020	11	4	383				10.3390/ATMOS11040383	Atmosphere
Gabbarini V., Rossi R., Ciparisse J.-F., Malizia A., Divizia A., De Filippis P., Anselmi M., Carestia M., Palombi L., Divizia M., Gaudio P.	Laser-induced fluorescence (LIF) as a smart method for fast environmental virological analyses: validation on Picornaviruses	2019	9	1	12598				10.1038/s41598-019-49005-3	Sci. Rep.
Gabbarini V., Rossi R., Ciparisse J.-F., Puleio A., Malizia A., Gaudio P.	An UltraViolet Laser-Induced Fluorescence (UV-LIF) system to detect, identify and measure the concentration of biological agents in the environment: A preliminary study	2019	14		C070079				10.1088/1748-0221/14/07/C07009	J. Instrum.
Rossi R., Ciparisse J.-F., Gelfusa M., Malizia A., Gaudio P.	The project TELEMACO: Detection, identification and concentration measurements of hazardous chemical agents	2019	14		C030034				10.1088/1748-0221/14/03/C03004	J. Instrum.
Rossi R., Ciparisse J.-F., Malizia A., Gelfusa M., Gaudio P.	Multiwavelength differential absorption lidar to improve measurement accuracy: test with ammonia over a traffic area	2018	124	7	148				10.1007/s00340-018-7018-6	Appl Phys B

Rossi R., Ciparisse J.-F., Malizia A., Gelfusa M., Gaudio P.	Detecting the influence of water vapour on the measurements of minor chemical gases with the differential absorption LIDAR technique	2018	2018CP748						IET Conf Publ
Gaudio P., Malizia A., Gelfusa M., Murari A., Parracino S., Poggi L.A., Lungaroni M., Ciparisse J.F., Giovanni D.D., Cenciarelli O., Carestia M., Peluso E., Gabbarini V., Talebzadeh S., Bellecci C.	Lidar and Dial application for detection and identification: A proposal to improve safety and security	2017	12		C010514			10.1088/1748-0221/12/01/C01054	J. Instrum.
Gaudio P., Malizia A., Gelfusa M., Martinelli E., Di Natale C., Poggi L.A., Bellecci C.	Mini-DIAL system measurements coupled with multivariate data analysis to identify TIC and TIM simulants: Preliminary absorption database analysis.	2017	778		1 12004			10.1088/1742-6596/778/1/012004	J. Phys. Conf. Ser.
Parracino S., Gelfusa M., Lungaroni M., Murari A., Peluso E., Ciparisse J.F., Malizia A., Rossi R., Ventura P., Gaudio P.	First tests of a multi-wavelength mini-DIAL system for the automatic detection of greenhouse gases	2017	10424		1042406			10.1117/12.2278585	Proc SPIE Int Soc Opt Eng
Parracino S., Richetta M., Gelfusa M., Malizia A., Bellecci C., De Leo L., Perrimezzi C., Fin A., Forin M., Giappiccucci F., Grion M., Marchese G., Gaudio P.	Real-time vehicle emissions monitoring using a compact LiDAR system and conventional instruments: First results of an experimental campaign in a suburban area in southern Italy	2016	55		103107			10.1117/1.OE.55.10.103107	Opt Eng
D'Ambrogio A., Gaudio P., Gelfusa M., Luglio M., Malizia A., Roseti C., Zampognaro F., Giglio A., Pieroni A., Marsella S.	Use of integrated technologies for fire monitoring and first alert	2016			7991707			10.1109/ICAICT.2016.7991707	Appl. Inf. Commun. Technol., AICT - Conf. Proc.

Gelfusa M., Murari A., Lungaroni M., Malizia A., Parracino S., Peluso E., Vega J., De Leo L., Perrimezzi C., Gaudio P.	On the determination of the backscattering profile with Lidar in presence of widespread smoke	2016	2016	CP704							IET Conf Publ
Gaudio P., Gelfusa M., Malizia A., Parracino S., Richetta M., De Leo L., Perrimezzi C., Bellecci C.	Detection and monitoring of pollutant sources with Lidar/Dial techniques	2015	658		1	12004				10.1088/1742-6596/658/1/012004	J. Phys. Conf. Ser.
Carestia M., Pizzoferrato R., Gelfusa M., Cenciarelli O., Ludovici G.M., Gabriele J., Malizia A., Murari A., Vega J., Gaudio P.	Development of a rapid method for the automatic classification of biological agents' fluorescence spectral signatures	2015	54		11	114105				10.1117/1.OE.54.11.114105	Opt Eng
Gelfusa M., Murari A., Malizia A., Lungaroni M., Peluso E., Parracino S., Talebzadeh S., Vega J., Gaudio P.	Advanced signal processing based on support vector regression for lidar applications	2015	9643			96430E				10.1117/12.2194501	Proc SPIE Int Soc Opt Eng
Gaudio P., Gelfusa M., Malizia A., Parracino S., Richetta M., Murari A., Vega J.	Automatic localization of backscattering events due to particulate in urban areas	2014	9244			924413				10.1117/12.2066670	Proc SPIE Int Soc Opt Eng
Gelfusa M., Gaudio P., Malizia A., Murari A., Vega J., Richetta M., Gonzalez S.	UMEL: A new regression tool to identify measurement peaks in LIDAR/DIAL systems for environmental physics applications	2014	85		6	63112				10.1063/1.4883184	Rev. Sci. Instrum.
Gaudio P., Gelfusa M., Lupelli I., Malizia A., Moretti A., Richetta M., Serafini C., Bellecci C.	First open field measurements with a portable CO2 lidar/ dial system for early forest fires detection	2011	8182			818213				10.1117/12.898082	Proc SPIE Int Soc Opt Eng
Bellecci C., Gaudio P., Gelfusa M., Lo Feudo T., Murari A., Richetta M., De Leo L.	In-cell measurements of smoke backscattering coefficients using a CO 2 laser system for application to lidar-dial forest fire detection	2010	49		12	124302				10.1117/1.3526331	Opt Eng
Bellecci C., De Leo L., Gaudio P., Gelfusa M., Lo Feudo T., Martellucci S., Richetta M.	Reduction of false alarms in forest fire surveillance using water vapour concentration measurements	2009	41		4		374	379		10.1016/j.optlastec.2008.09.005	Opt Laser Technol

Contatti:



Pasquale Gaudio

gaudio@ing.uniroma2.it

+39 0672597209

www.mastercbrn.com

www.cbrngate.com

<http://qepresearch.it/>



TOR VERGATA
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA