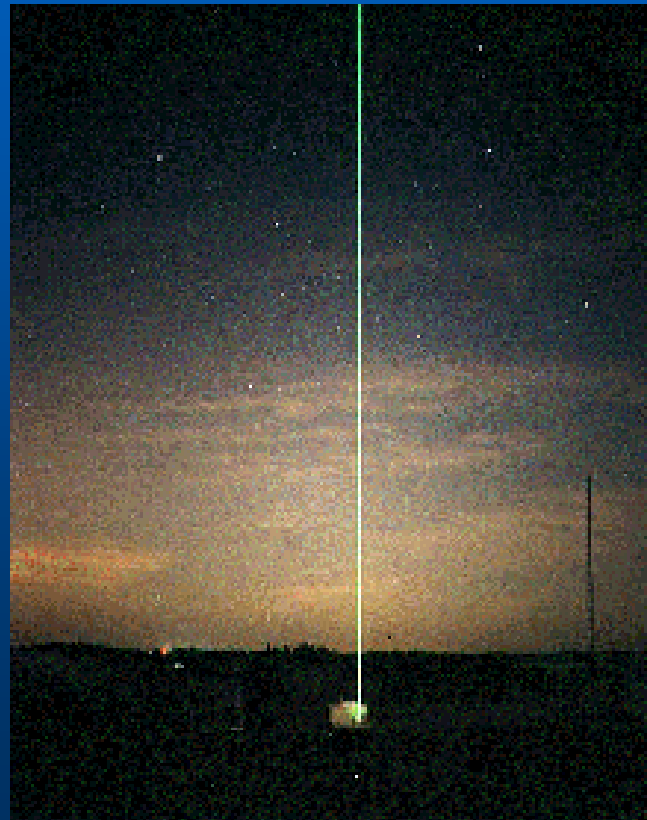


Senzori LIDAR

Prof. Dr. Valeria FLIP

Universitatea din Bucuresti,
Facultatea de Fizica

Monitorizarea calitatii aerului urban se poate face in mod clasic recoltand volume mici de aer in probe distincte luate de la nivelul strazii. Exista insa deja tehnici bazate pe laser



cu ajutorul carora se pot face monitorizari pe distante mult mai mari cu scopul de a evalua poluarea la nivel local, regional sau chiar global si la diferite altitudini deasupra solului.

Principiul LIDAR (1)

LIDAR este o tehnica de teledetectie bazata pe laser pentru monitorizarea poluantilor troposferici si stratosferici, pe distante variind intre cativa metri si sute de kilometri. LIDAR este un acronim de la '**light detection and ranging**', iar tehnica este **echivalentul radarului pentru domeniul luminii vizibile**.

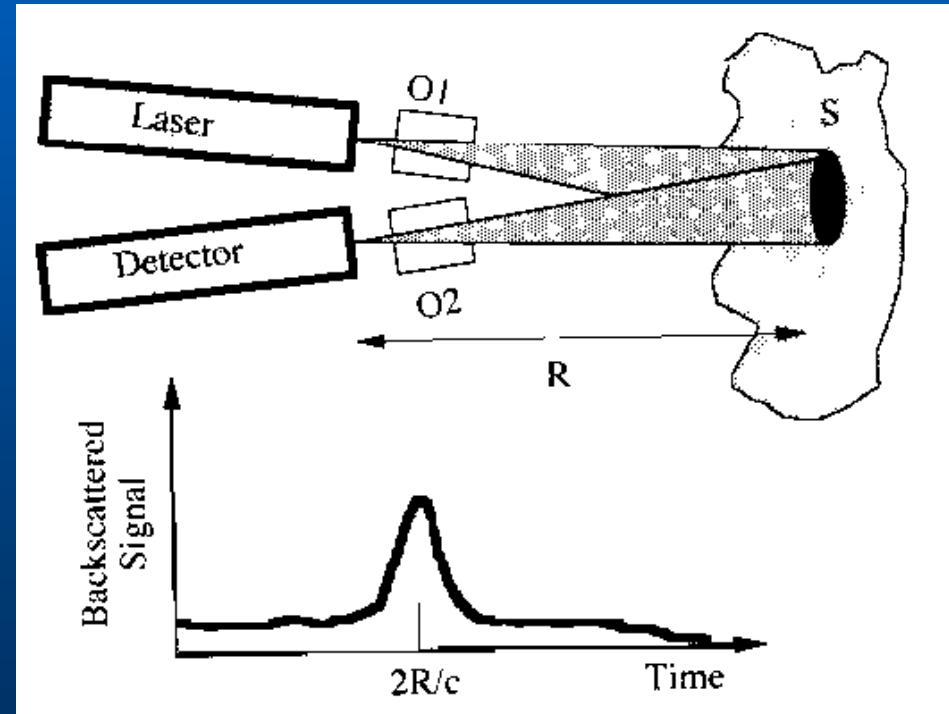
Sursele continue de lumina, cum ar fi lampile cu xenon, se folosesc extensiv in monitorizarea atmosferica pe distante de sute de metri. Sistemele moderne laser au insa **avantaje net competitive** fata de acest tip de surse:

- ❖ **puteri mari la lungimi de unda specifice sau variabile** de la UV pana la IR,
- ❖ **pulsuri scurte** de la micro pana la picosecunde,
- ❖ **divergenta mica a fascicolului** care permite astfel transportul energiei optice pe distante mari.

Principiul LIDAR (2)

Un sistem LIDAR tipic este aratat in figura alaturata. Un **laser pulsant** emite semnale scurte de lumina catre atmosfera, iar lumina reflectata este detectata, cu o anumita intarziere, intr-un **receptor plasat de obicei foarte aproape de laser si paralel cu acesta**.

Sistemele optice O1 si O2 contin componente optice sau unitati optice care corecteaza sau modifica fascicolul emis sau folosesc la receptie sau la analiza spectrala a semnalului receptionat.

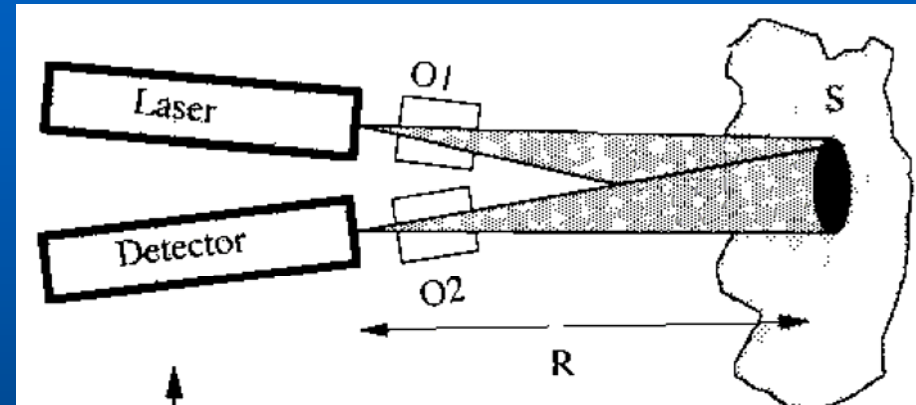


Performante elementare

Divergenta unui sistem laser

tipic este de 0.5 mR, dar, daca se doreste reducerea acestei divergente, atunci O1 poate fi un dispozitiv de largire a diametrului fascicolului emis si care deci produce o reducere a divergentei.

Sistemul optic O2 poate **contine o simpla lentila sau un telescop sofisticat cu apertura mare**, dupa cum distanta de masura este de sute de metri sau de ordinul kilometrilor. Cum viteza luminii este de aproximativ 300 m/ μ s si deci **pulsul este primit inapoi de la o**

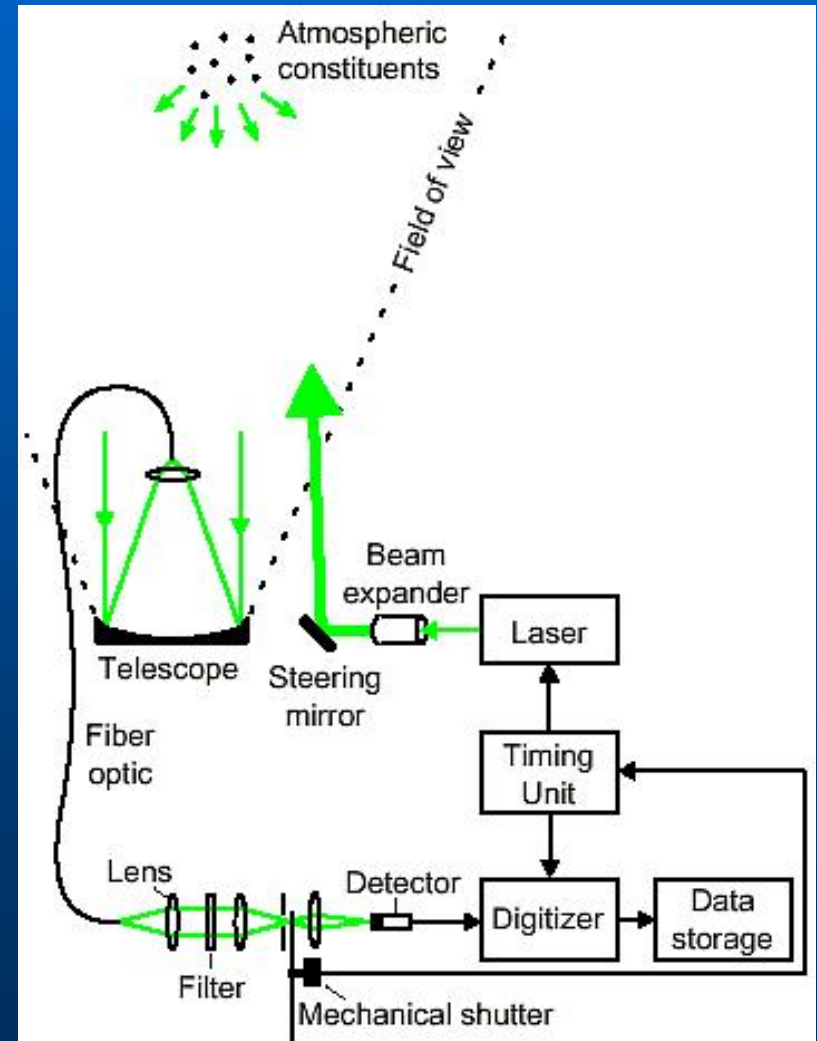


distanta de 150 m dupa 1 μ s de la emisie. Informatia obtinuta din analiza intarzierii este unul din punctele forte ale LIDAR, iar rezolutia spatiala $\Delta R = t_p c/2$ este definita de durata pulsului t_p . Rezulta deci ca **o durata a pulsului de 1 ns are o rezolutie spatiala de minimum 15 cm.**

Schema unui sistem LIDAR

Componentele principale sunt:

- **Sursa de lumina (laser in unda continua (cw) sau pulsata)**
- **Receptorul (telescop optic)**
- **Detectorul (tuburi fotomultiplicatoare extrem de sensibile)**



Informatii continute in fascicolul reflectat

Atunci cand un obiect, care poate fi un nor, emisiile unui cos etc., intercepteaza fascicolul laser, el genereaza un **fascicol reflectat**. Acesta poate fi un **semnal fara specificatie (semnatura) chimica**, cum este cazul in **imprastierea Rayleigh sau Mie de catre aerosoli in atmosfera**: lungimile de unda emise si reflectate sunt aceleasi (fenomene elastice).

Semnalul reflectat poate fi insa si **cu specificitate chimica**, asa cum este situatia **imprastierii Raman sau a fluorescentei induse prin iradiere laser**. In aceste cazuri, lungimea de unda reflectata este diferita (de obicei deplasata spre rosu) fata de cea a fascicolului emis.

Semnalul reflectat contine intotdeauna informatii despre obiectul imprastietor, permitand astfel analizarea fizica si chimica a obiectului de la distanta.

Ecuatia de principiu a LIDAR-ului

$$P_{det} = P_{las} \frac{C \beta(R) T(R)^2}{R^2}$$

unde P_{las} este puterea luminii laser emise, R este distanta pana la tinta (imprastietor), C este un factor de calibrare al instrumentului, care contine proprietatile de propagare ale radiatiei laser prin O1 si O2, $\beta(R)$ este coeficientul de retroimprastiere (care contine, intre altele, concentratia imprastietorilor la distanta R) iar $T(R)$ coeficientul de transmisie pe distanta R , de tipul Lambert-Beer:

$$T(R) = \exp\left(-\int_0^R \sigma_e(r) dr\right)$$

Unde $\sigma_e(r)$ este coeficientul de extinctie a luminii pe distanta R .

Eliminarea fondului

Una din problemele legate de LIDAR este modalitatea prin care se pot elimina fluxurile mari de fotoni solari care produc un **fond foarte intens in detector**.

Acest fond este in mod obisnuit **diminuat prin deschiderea detectorului pentru intervale de timp foarte scurte** (pe durata pulsului) si prin **marirea raportului semnal/zgomot in acest interval** prin filtrarea catre detector numai a lungimii de unda cerute (cea a laserului). Aceasta operatiune se realizeaza folosind filtre si monocromatoare.

Calibrare

O alta problema este modalitatea de a face determinarile LIDAR cantitative.

Nu se pot folosi proceduri de calibrare obisnuite, din cauza faptului ca tintele sunt departate, si deci **trebuie folositi parametri *interni* pentru a efectua masuratori cantitative**. Prin urmare, **pentru masuratori la distanta, sunt necesare raportul sau diferenta a doua semnale (unul din ele fiind semnalul de calibrare)**.

Standardul de calibrare poate fi de mai multe feluri:

- temporizarea precisa a pulsului laser sau a intervalului de timp dintre doua evenimente
- semnalul Raman cvasi-constant al apei (pentru determinari LIDAR acvatice)
- semnalul Raman al azotului (pentru masuratori LIDAR in atmosfera).

Imprastierea Mie

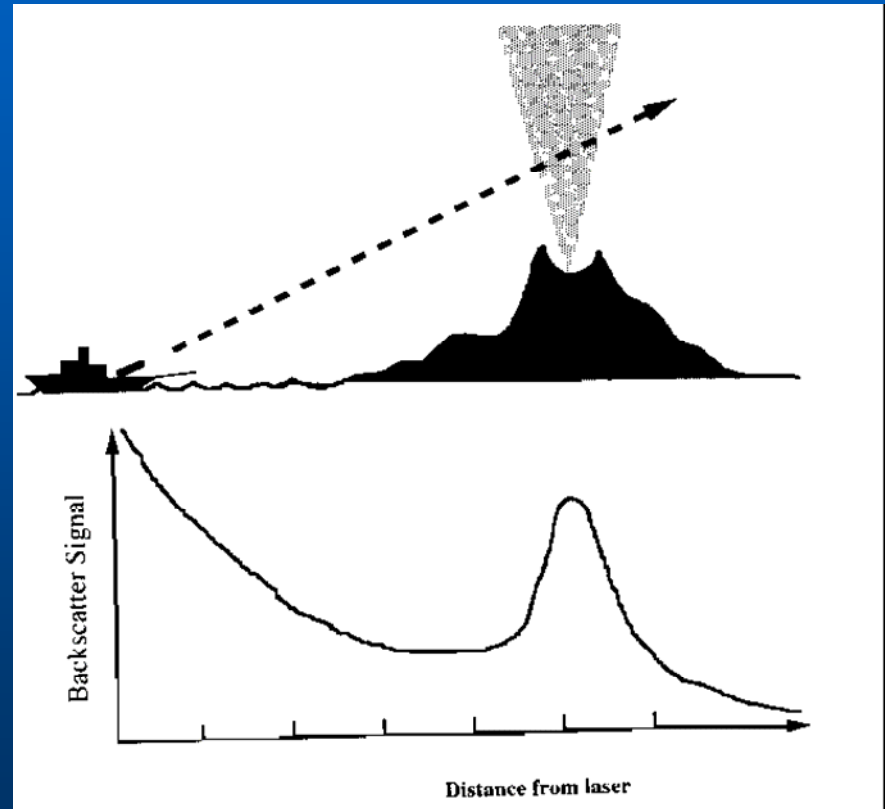
Aerosolii, cum ar fi particulele de poluanti, ca si vaporii de apa sau cristalele de gheata din nori pot fi detectati prin **imprastiere elastica Mie**, in care **semnalul imprastiat are aceeasi lungime de unda ca si cel emis** de laser (λ_{las}). Acest semnal este comparat cu semnalul Raman detectat pe azot (etalon) la o frecventa vecina (λ_N).

Concentratia aerosolului este proportionala cu $P_{det}(\lambda_{las})/P_{det}(\lambda_N)$.

Imprastierea Rayleigh este utilizata pentru detectia gazelor.

LIDAR cu imprastiere Mie (1)

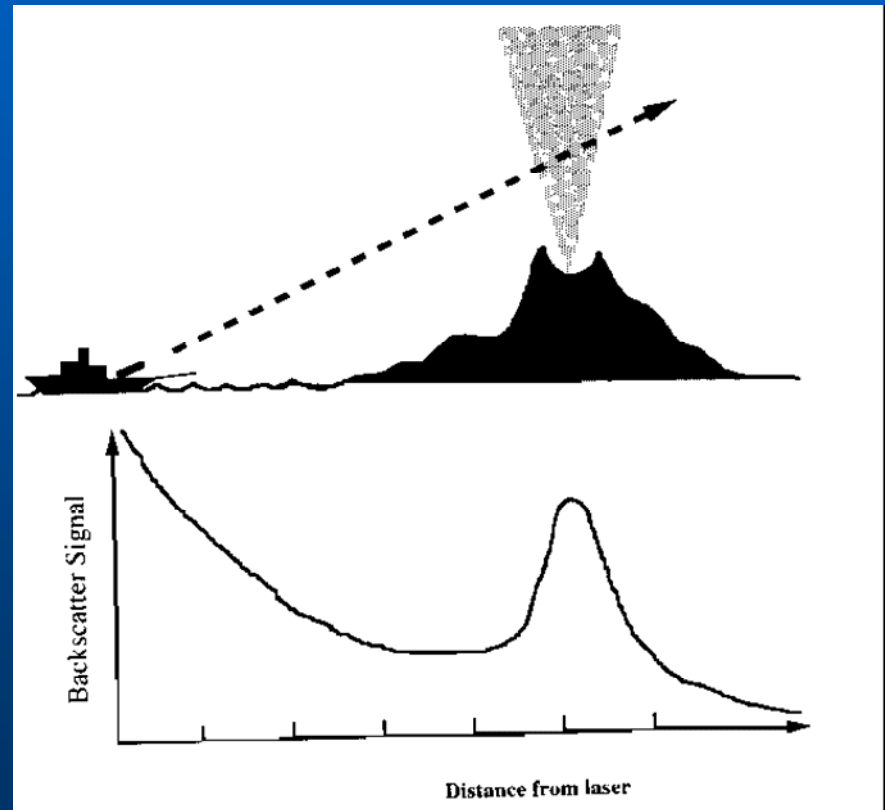
In figura alaturata este ilustrata un ansamblu de monitorizare LIDAR a particulelor de aerosoli generate de o **emisie vulcanica**. Fascicolul laser este trimis in atmosfera prin norul de emisie vulcanica, iar semnalul reflectat este reprezentat in graficul de jos. **Scaderea lenta ca $1/R^2$ a semnalului reflectat** se datoreaza **distributiei uniforme de particule de fond**.



LIDAR cu imprastiere Mie (2)

Prin traversarea penei de emisie a vulcanului, **intensitatea imprastiata creste dramatic**. Aceasta crestere de semnal **indica doar prezenta particulelor de aerosol**, fara sa ofere informatii asupra naturii lor chimice.

Masuratori Mie pure au fost facute la multe statii LIDAR din lume pentru **monitorizarea eruptiilor vulcanice care pompeaza cantitati enorme de aerosoli in troposfera si stratosfera**.



LIDAR cu imprastiere Raman (1)

Spre deosebire de imprasterea Mie, imprastierea Raman **inelastica** poate furniza **informatii despre natura chimica a imprastietorului**.

In efectul vibrational Raman, fotonul incident este absorbit de o molecula care trece intr-o **stare virtuala instabila**, urmand sa se dezexcite prin emisia unui foton caracteristic, deplasat spre rosu (deplasarea Stokes), intr-un nivel de vibratie fundamental.

Astfel, **fotonul imprastiat este deplasat cu o valoare caracteristica a gazului absorbant**. Concentratia ceruta a gazului este comparata cu semnalul Stokes al moleculelor de azot pentru calibrare interna. Aceste picuri Raman sunt de obicei foarte distincte.

LIDAR cu imprastiere Raman (2)

Dificultatea principala legata de efectul Raman este ca este in principiu foarte slab, **semnalul Raman fiind cu aproximativ trei ordine de marime mai putin intens** decat cel al imprastierii Rayleigh **pe aceeasi molecula**.

Prin urmare, LIDAR-ul Raman este util numai in situatiile in care sunt disponibile **lasere cu intensitate mare**, sau **cand se monitorizeaza constituinti majori in atmosfera**, cum ar fi apa, CO_2 , SO_2 sau O_3 .

LIDAR cu fluorescanta

In fluorescanta LIDAR laserul este acordat pe anumite absorbtii de tranzitie din speciile atmosferice, acvatice sau terestre. Lumina de fluorescanta este detectata in receptor si comparata (ca si in cazul LIDAR-ului Raman) cu semnalul Raman al azotului, putandu-se obtine astfel rezultate cantitative.

Multe molecule, in particular **un numar de molecule aromatice, prezinta florescanta eficienta dupa iradiere UV**. De aici si folosirea frecventa a acestei tehnici in detectia poluantilor petrochimici pe suprafete marine.

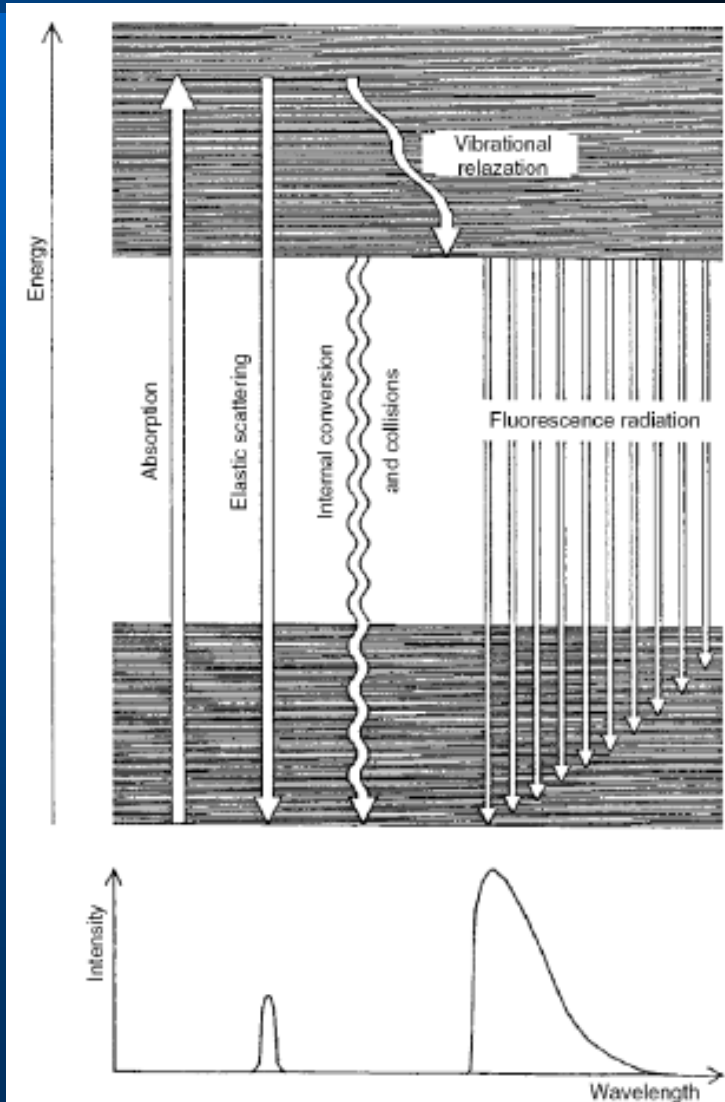
Folosind **un laser cu azot** (337 nm) intr-un sistem LIDAR, de exemplu pe o platforma aeriana, se poate diferentia clar semnalul de fluorescanta al petelor de petrol intre 400 nm si 500 nm, in contrast cu semnalul Raman al apei la aproximativ 380 nm. Intr-o anumita masura se pot distinge chiar diversele tipuri de petrol prin amprenta lor de florescanta si deci se poate identifica provenienta petrolului respectiv.

LIDAR cu fluorescanta (domeniul de lungimi de unda)

Radiatia incidenta este absorbita de electroni prin excitarea acestora pe nivele energetice superioare.

Dezexcitarea duce la emisia unei lungimi de unda similare (imprastiere elastica).

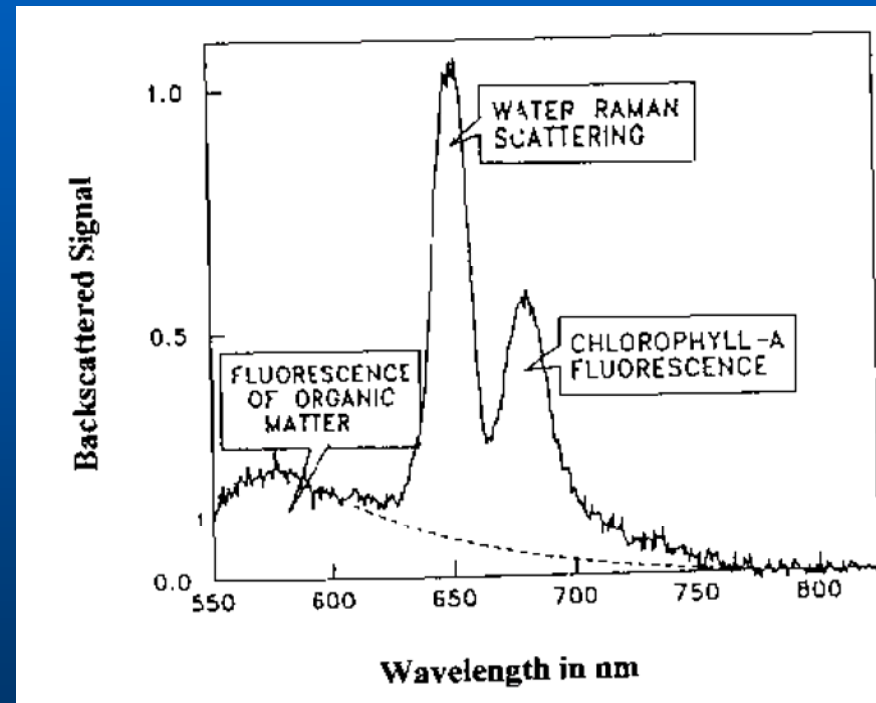
In afara de aceste procese, energia se poate disipa intre nivelele superioare si prin relaxare vibrationala. Dezexcitările ulterioare produc fotoni de lungime de unda mai mare si formeaza **radiatia de fluorescanta**.



Fluorescenta clorofilei a

In figura alaturata este aratat spectrul de retroimprastiere provenit din **apa oceanica**. Radiatia excitatoare a fost de la a doua armonica a unui laser Nd :YAG (532 nm).

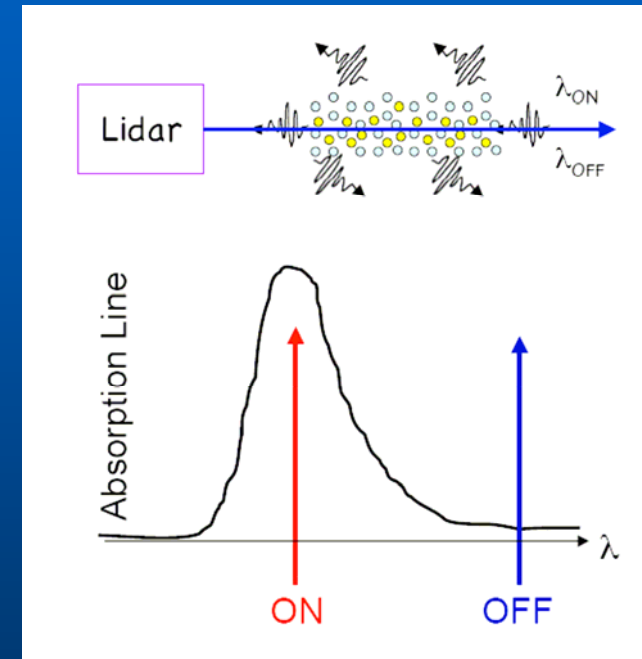
Picul de fluorescenta al clorofilei si de **imprastiere Raman al apei** se vad foarte clar. Din prelucrarea acestor picuri se poate calcula **concentratia continutului de clorofila** si deci **productivitatea biologica a apei**.



Principiul DIAL

Este o variatie a tehnicii LIDAR. Denumirea este un acronim al '**differential absorption LIDAR**'.

Este o exemplificare foarte buna a **principiului masuratorilor relative**: substanta este iradiata cu **doua lungimi de unda laser foarte apropiate**, una corespunzand unei benzi de **absorbție a substantei (λ_1)** si cealalta pozitionata imediat **in afara picului de absorbție (λ_2)**. Intrucat semnalele detectate dupa iradierea cu aceste lungimi de unda contin aceeasi dependenta de P_{las} , R , C si $T(R)$ in ecuatia LIDAR, **raportul celor doua semnale detectate [$P_{det}(\lambda_1)/P_{det}(\lambda_2)$]** contine numai dependenta de β_i care este **proporzionala cu concentratia substantei**.

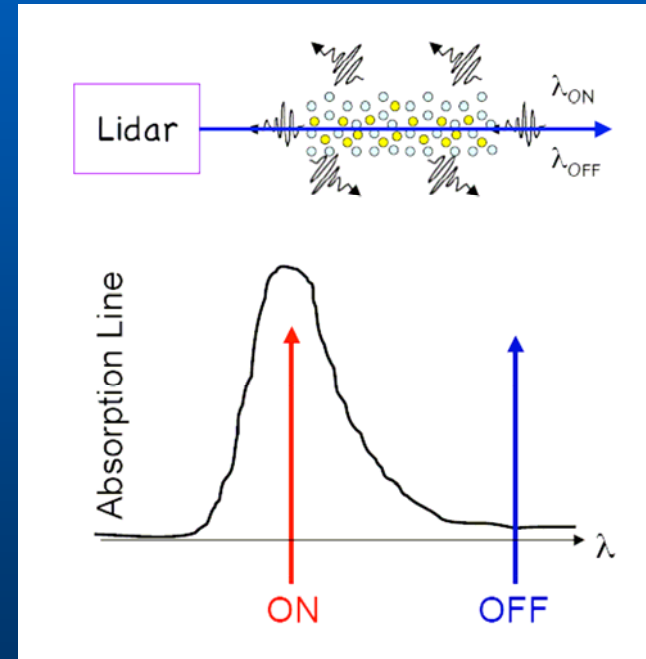


Laseri folositi in DIAL

Diferenta fundamentala dintre DIAL si tehnicile obisnuite de LIDAR este ca **se folosesc doua lungimi de unda diferite** in masuratori si ca, din aceasta cauza, sunt necesari **laseri acordabili** (fata de cei cu frecventa fixa folositi de obicei in LIDAR). Laserii acordabili in partea optica a spectrului sunt de obicei **laseri cu coloranti** (pompati cu laseri cu YAG sau cu excimeri), sau **laseri cu cristale solide** cum ar fi alexandritul sau Ti-safir. In domeniul lungimilor de unda mari, catre IR, sunt obisnuite laserele cu CO₂ sau cu diode.

Functionarea DIAL (1)

Daca se masoara un **efluent gazos**, lumina laser este transmisa alternativ la o **lungime de unda λ_{on}** , la care **poluantul absoarbe puternic**, si la o **lungime de unda vecina, λ_{off}** , care **este in afara rezonantei**. Semnalul 'on' este atenuat prin trecerea prin nor, in timp ce semnalul 'off' nu este atenuat. Semnalul 'off' va suferi dependenta obisnuita de tip $1/R^2$, ca si semnalul 'on', numai ca acesta va suferi pierderi suplimentare cand este intalnit poluantul.



Functionarea DIAL (2)

Cele doua spectre sunt impartite unul la celalalt. Raportul DIAL normal nu este 1, ci prezinta variatii cu distanta, din care se pot calcula concentratiile locale ale poluantului.

Din astfel de masuratori s-au obtinut profiluri sofisticate de ozon la diferite altitudini intre 10 m si 10 km deasupra nivelului marii, in dreptul Anrtarcticii, care **au demonstrat formarea gaurilor de ozon stratosferic.**

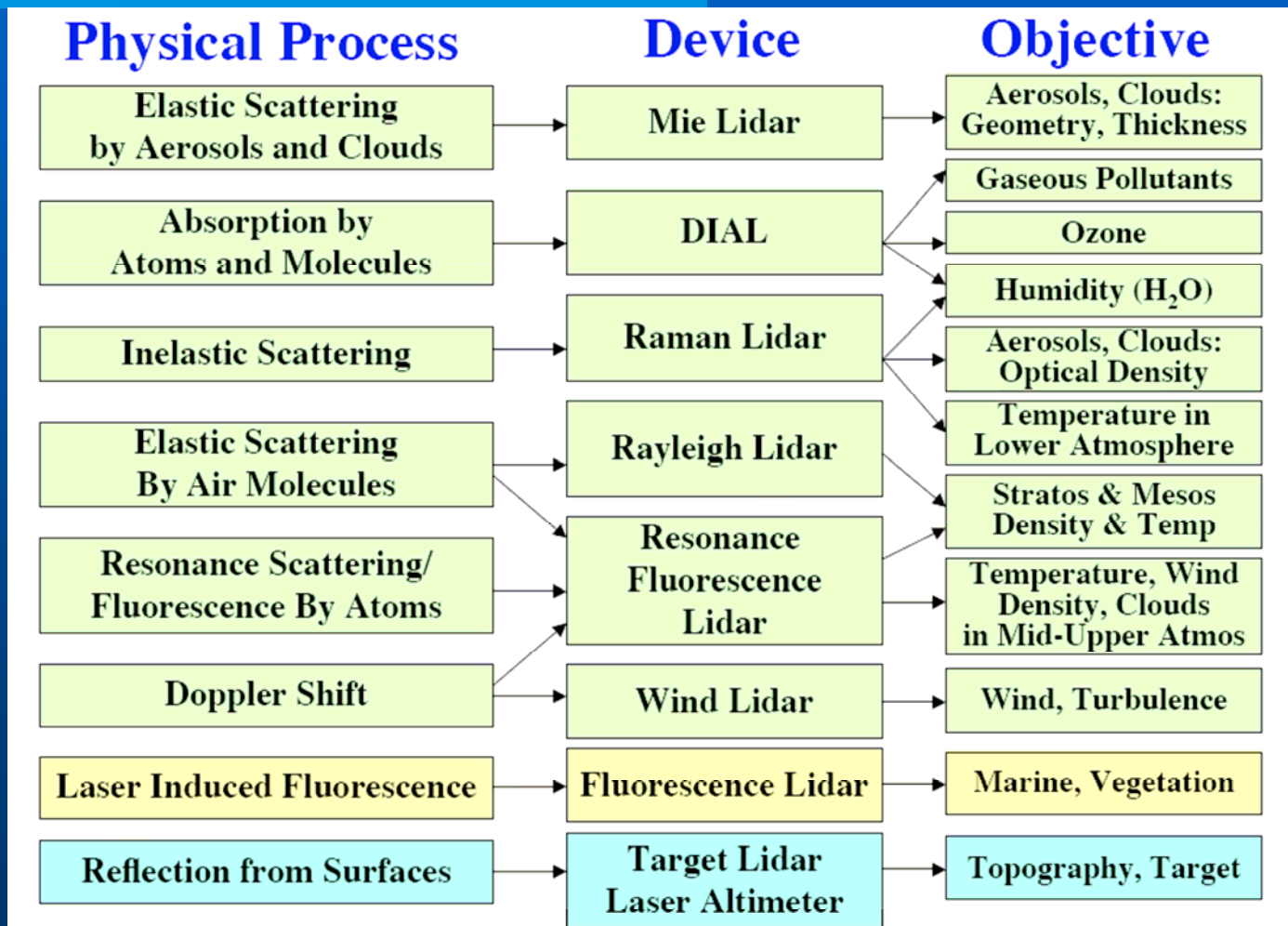


LIDAR mobil realizat pentru determinări de poluanți operat de National Physical Laboratory, Londra, UK

Comparatie intre sectiunile eficace de retroimprastiere

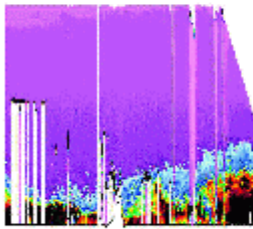
Physical Process	Backscatter Cross-Section	Mechanism
Mie (Aerosol) Scattering	$10^{-8} - 10^{-10} \text{ cm}^2\text{sr}^{-1}$	Two-photon process Elastic scattering, instantaneous
Resonance Fluorescence	$10^{-13} \text{ cm}^2\text{sr}^{-1}$	Two single-photon process (absorption and spontaneous emission) Delayed (radiative lifetime)
Molecular Absorption	$10^{-19} \text{ cm}^2\text{sr}^{-1}$	Single-photon process
Fluorescence from molecule, liquid, solid	$10^{-19} \text{ cm}^2\text{sr}^{-1}$	Two single-photon process Inelastic scattering, delayed (lifetime)
Rayleigh Scattering	$10^{-27} \text{ cm}^2\text{sr}^{-1}$	Two-photon process Elastic scattering, instantaneous
Raman Scattering	$10^{-30} \text{ cm}^2\text{sr}^{-1}$	Two-photon process Inelastic scattering, instantaneous

Tipuri de LIDAR (sinteza)

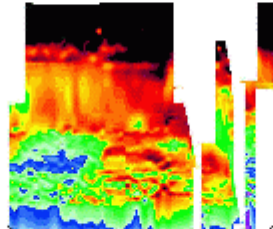


Imagini LIDAR (1)

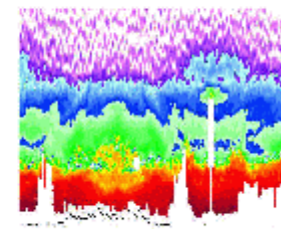
Aerosol Example



Ozone Example

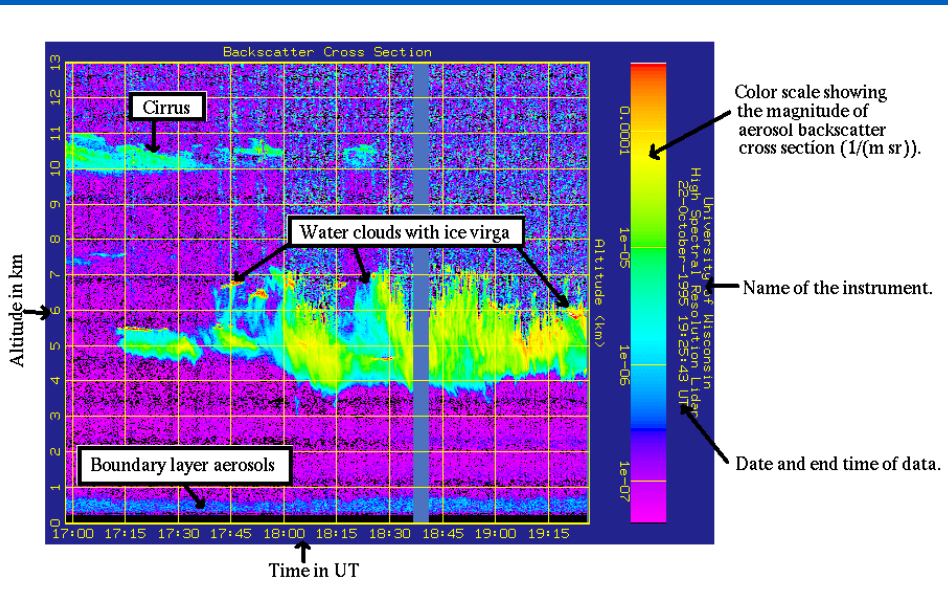


Water Vapor Example



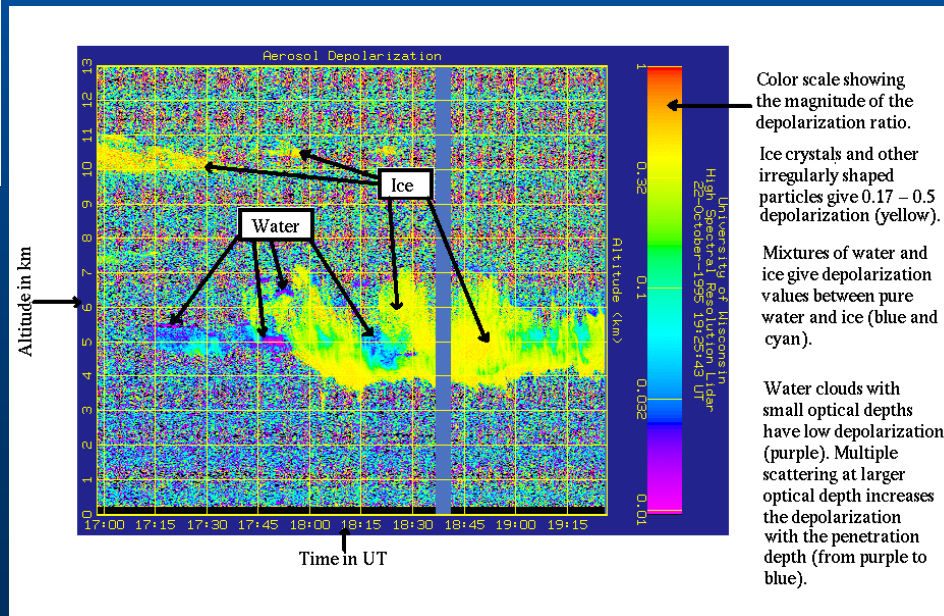
Datele LIDAR sunt frecvent reprezentate prin "harti" de altitudine colorate dupa intensitatea semnalului (adica dupa densitatea si natura "tintelor". Abscisa este axa timpului, ordonata este axa altitudinii, iar intensitatea semnalului reflectat este reprezentata prin culori, conform unei legende anexate imaginii.

Imagini LIDAR (2)

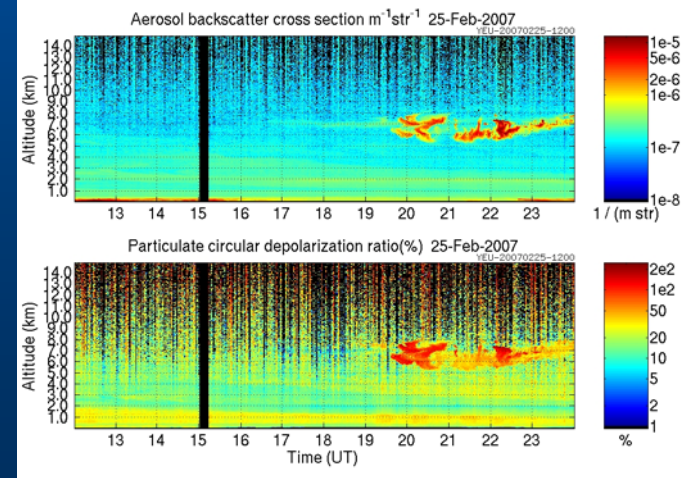
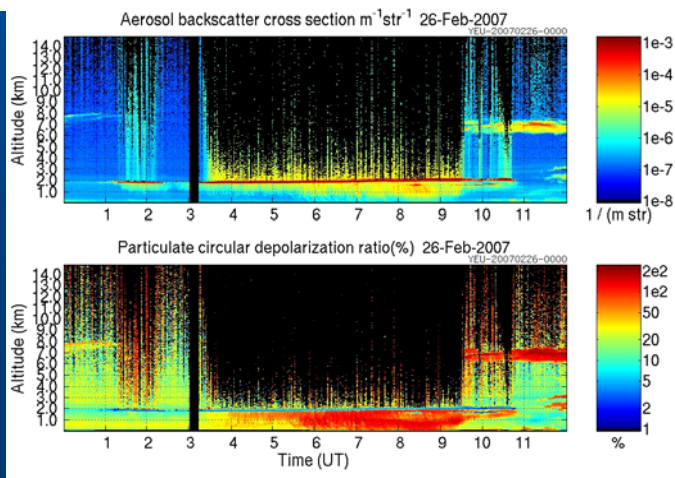
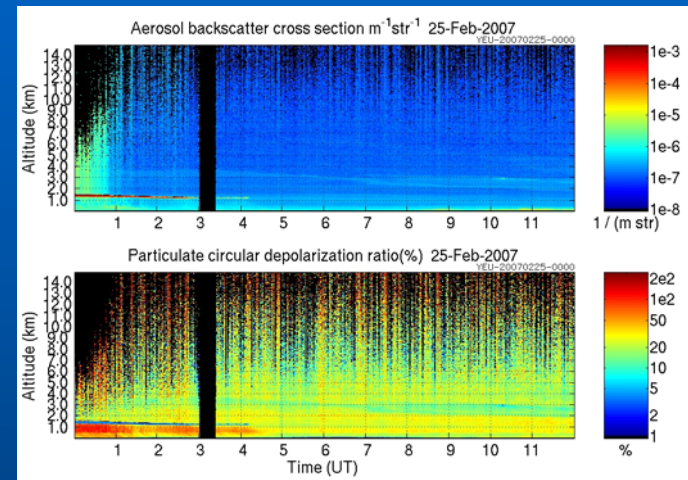
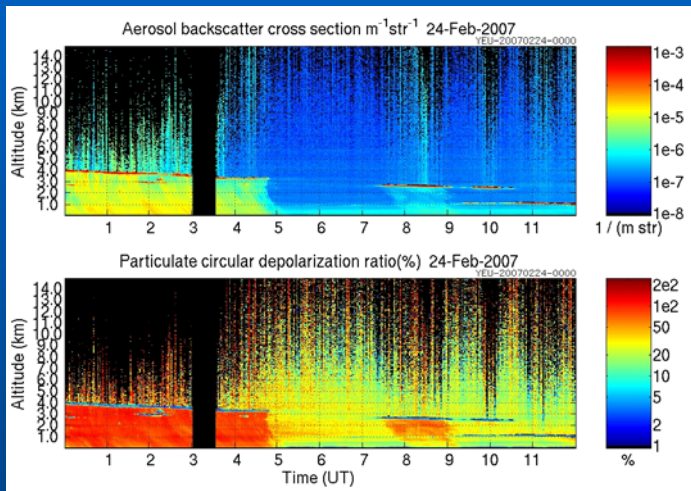


Imagine LIDAR de retroimprastiere. Sunt vizibili aerosoli in stratul limita, nori de apa lichida cu zone inghetate in tranzitie si nori Cirrus cu cristale de gheata.

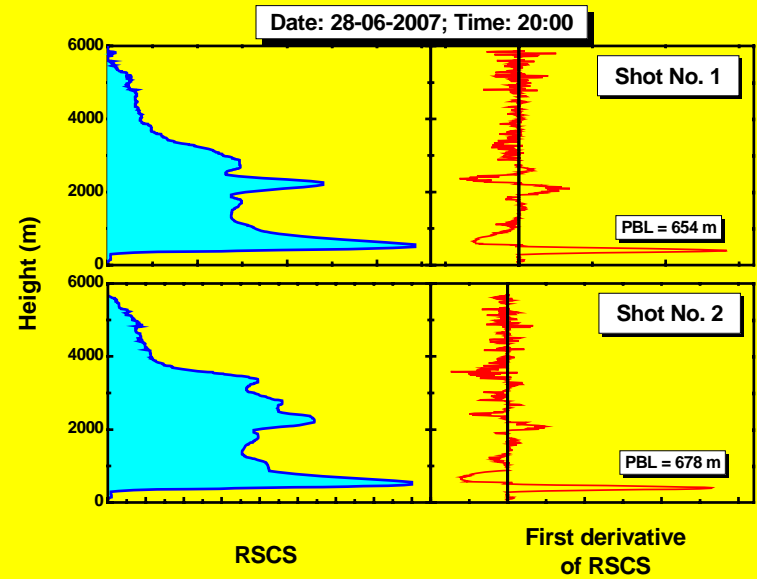
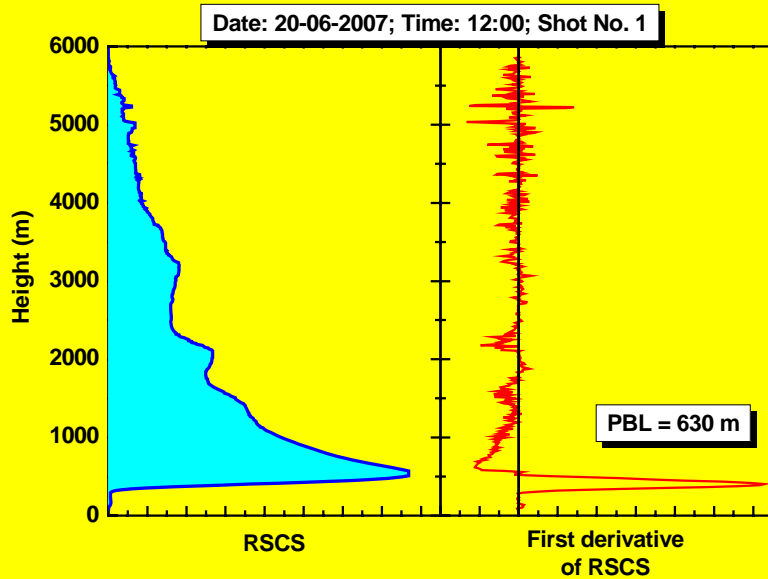
Aceasi imagine in functie de factorul de depolarizare al luminii reflectate. Gheata si alte particule de forma neregulata produc un factor de depolarizare cuprins intre 0.17 si 0.5 (galben). Amestecul de apa cu gheata produce o depolarizare mai redusa (albastru si turcoaz), iar cea mai joasa depolarizare o produce apa lichida (violet).



Imagini LIDAR (3)

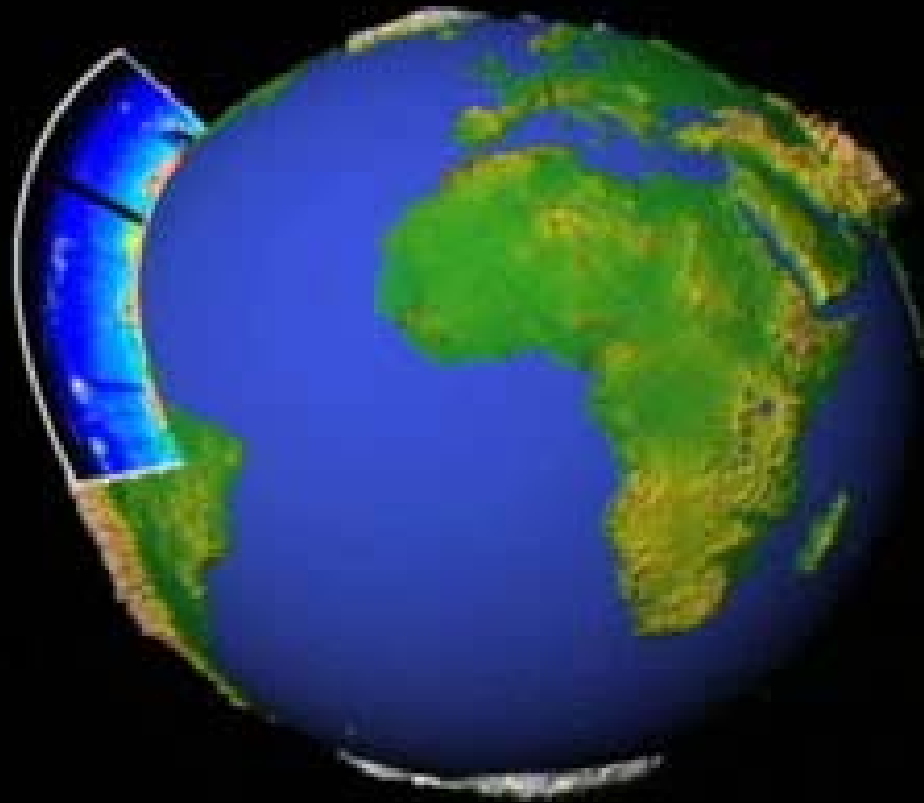


Imagini LIDAR (4)



O modalitate practica de reprezentare a datelor LIDAR este ca intensitate a semnalului in functie de inaltime. Maximele de semnal indica formatiuni noroase sau pozitia stratului limita. Analiza cantitativa a semnalului se poate face examinand derivata semnalului netezit in raport cu altitudinea. Pozitiile unde apar minime negative ale derivatei corespund limitelor dintre diferite structuri atmosferice.

Imagini LIDAR (Experimental LITE)



Aplicatii in geologie si seismologie

Un instrument important in geologie si seismologie pentru detectarea faliilor si a deplasarilor tectonice este o **combinatie de lidar si GPS**. Combinatia acestor doua tehnologii poate produce modele de elevatie extrem de precise. Un rezultat renumit al acestei metode este **descoperirea faliei Seattle din USA**. Se foloseste de asemenea la **masurarea miscarilor tectonice ale muntelui St. Helens**.

Sisteme lidar pe platforme aeriene sunt folosite pentru **monitorizarea ghetarilor** si pot detecta cresterile si descresterile acestora in cantitati foarte mici (ex. sistemul ICES al NASA).

Aplicatii industriale

Sistemele lidar au gasit multe aplicatii si in **studiile forestiere**. Se pot determina **inaltimea cupolei forestiere, biomasa si aria foliara** prin sisteme lidar pe platforme aeriene.

In mod asemanator, lidarul este folosit in multe industrii (ex. energetica sau cai ferate si transporturi) ca un **mijloc rapid de supraveghere**.

Aplicatii astronomice

O retea internationala de observatoare foloseste lidare pentru a masura distanta pana la reflectoare plasate pe luna, determinand astfel **pozitia lunii cu precizie milimetrica** si permitand **efectuarea de teste ale teoriei relativitatii generale**.

Instrumentul MOLA care este un **altimetru orbital cu laser plasat in jurul planetei Marte**, foloseste un instrument lidar pentru a produce o **supraveghere topografica** spectaculos de precisa a acestei planete (sistemul Mars Global Surveyor al NASA).

Aplicatii atmosferice si oceanografice (1)

In fizica atmosferei, lidarul este folosit ca un **instrument de teledetectie pentru masurarea densitatii** anumitor constituinti ai atmosferei medii si inalte cum ar fi sodiul, potasiul, oxigenul molecular sau azotul molecular. Aceste masuratori pot fi **folosite pentru a calcula temperaturi locale**. Lidarul se poate folosi de asemenea si **pentru a masura viteza vantului** si pentru a capata **informatii asupra particulelor de aerosol**.

In oceanografie, lidarele sunt folosite pentru **estimarea fluorescentei fitoplanctonului si in general a biomasei** din straturile de suprafata ale oceanului. O alta aplicatie este studiul zonelor de mare prea putin adanci pentru studiul direct cu ambarcatiuni hidrografice.

Aplicatii atmosferice si oceanografice (2)

PCL (Purple Crow Lidar): Sistemul european de lidar atmosferic.

- Masoara temperatura, valurile si vaporii de apa.

Temperatura se masoara prin doua procedee:

Unul este prin folosirea imprastierii de **fluorescenta rezonanta a sodiului**.

Celalalt este folosind imprastierea Rayleigh de catre moleculele de aer (imprastierea Rayleigh este raspunzatoare de **culoarea albastra a cerului**).

Ecuatia LIDAR leaga numarul de fotoni receptionati de densitatea atmosferei:

$$P_{det} = P_{las} \frac{C \beta(R) T(R)^2}{R^2}$$

Cunoscand profilul de densitate, temperatura se poate determina folosind ipoteza echilibrului hidrostatic si ecuatia de stare a gazului perfect.

Aplicatii atmosferice si oceanografice (3)

- LITE (lidar technology experiment) a fost imbarcat in misiunea spatiala STS-64, in septembrie 1964. **A fost prima demonstratie reusita a operarii unui lidar din spatiu.**
- LITE a fost **proiectat sa masoare nori si aerosoli folosind imprastierea elastica** (fara schimbare de frecventa) a luminii pe aerosoli si picaturi.
- Folosirea lidarului din spatiu **permite investigarea rapida a unor largi zone ale atmosferei.**

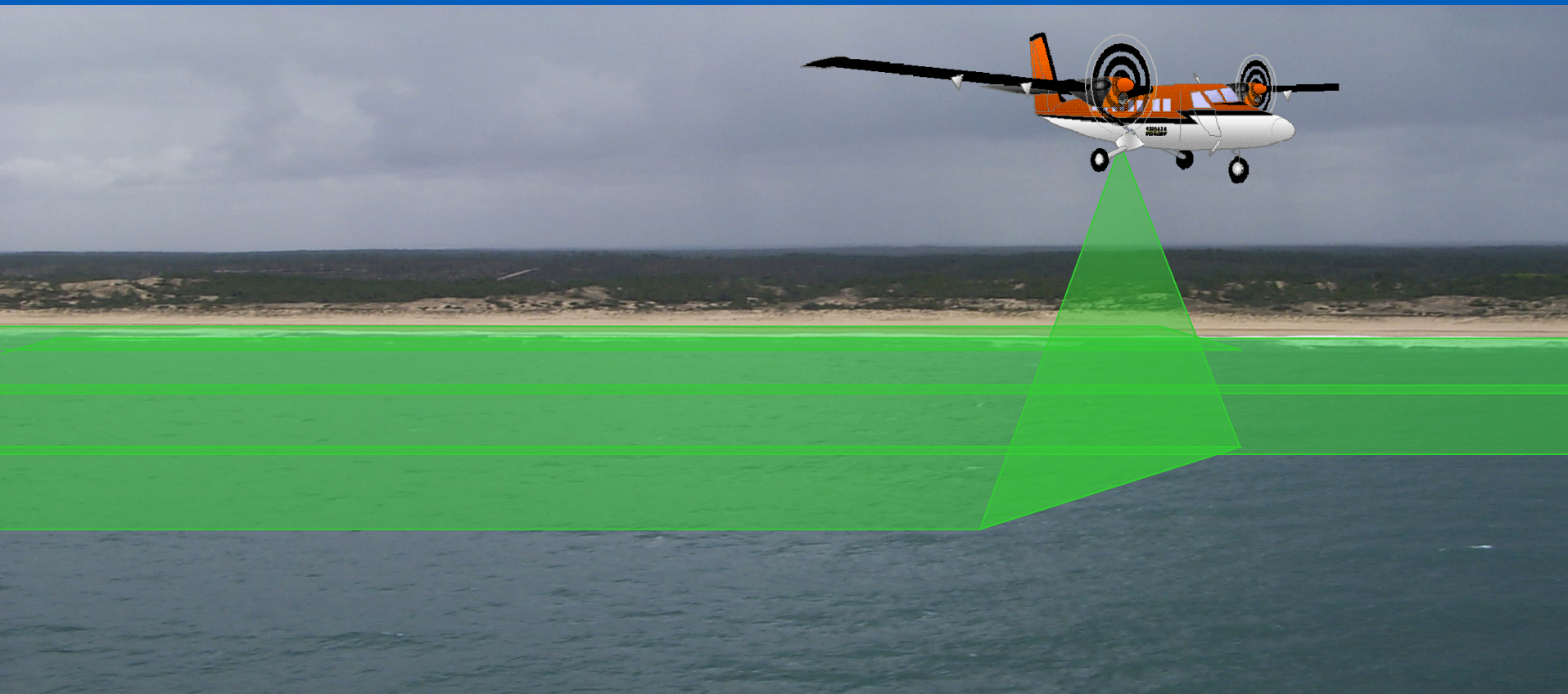


Aplicatii atmosferice si oceanografice (4)

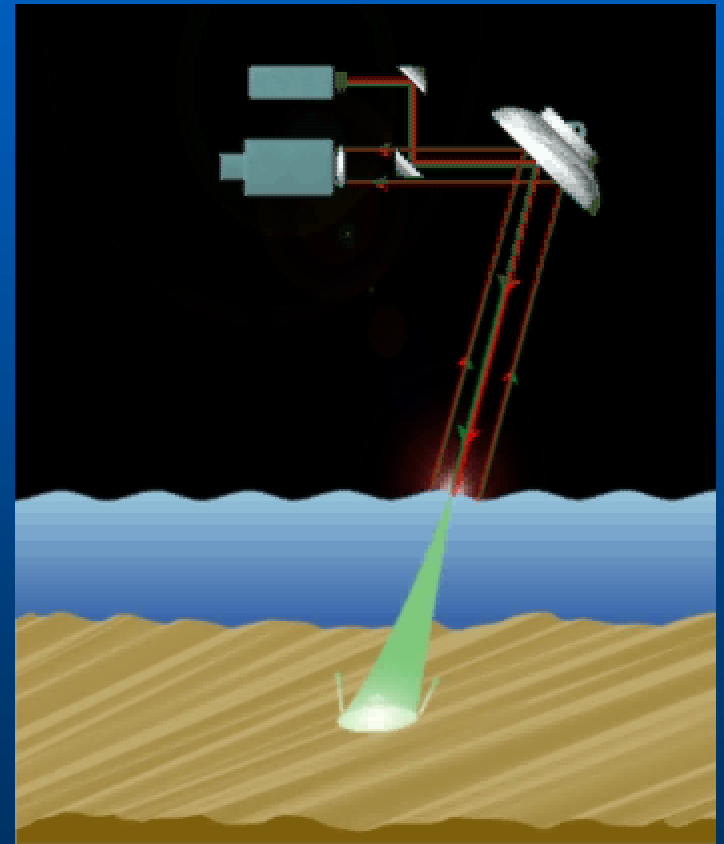
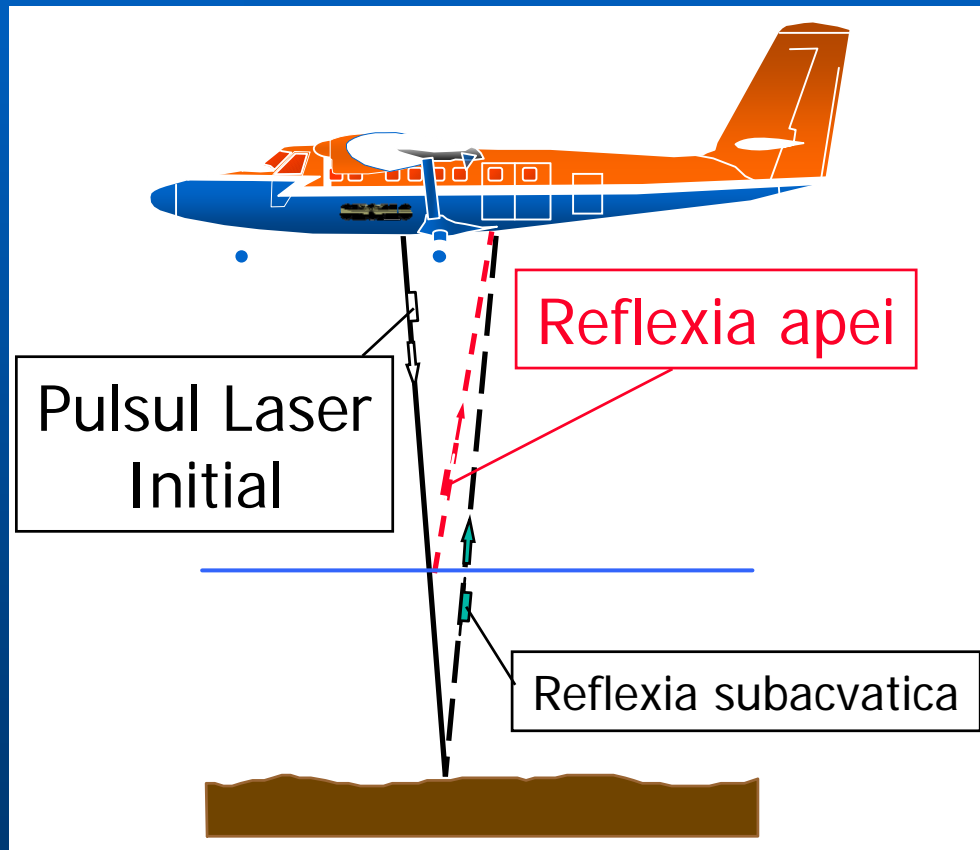
Sistemul PCL foloseste un tip unic de receptor numit **telescop cu oglinda lichida (LMT)**.

- LMT foloseste un metal lichid la temperatura camerei, cum ar fi mercurul sau galiul.
- Metalul se afla intr-o cuva si este pus in miscare de rotatie, de ex. cu 6 rot/minut, astfel incat suprafata sa libera devine parabolica, ideala pentru masuratori lidar.
- Cu aceasta tehnologie putem obtine o oglinda de diametru mai mare decat cea de pe telescopul spatial Hubble, ceea ce **permite masurarea modificarilor de temperatura datorate valurilor in timpi de ordinul minutelor.**

Topometrie subacvatica Lidar

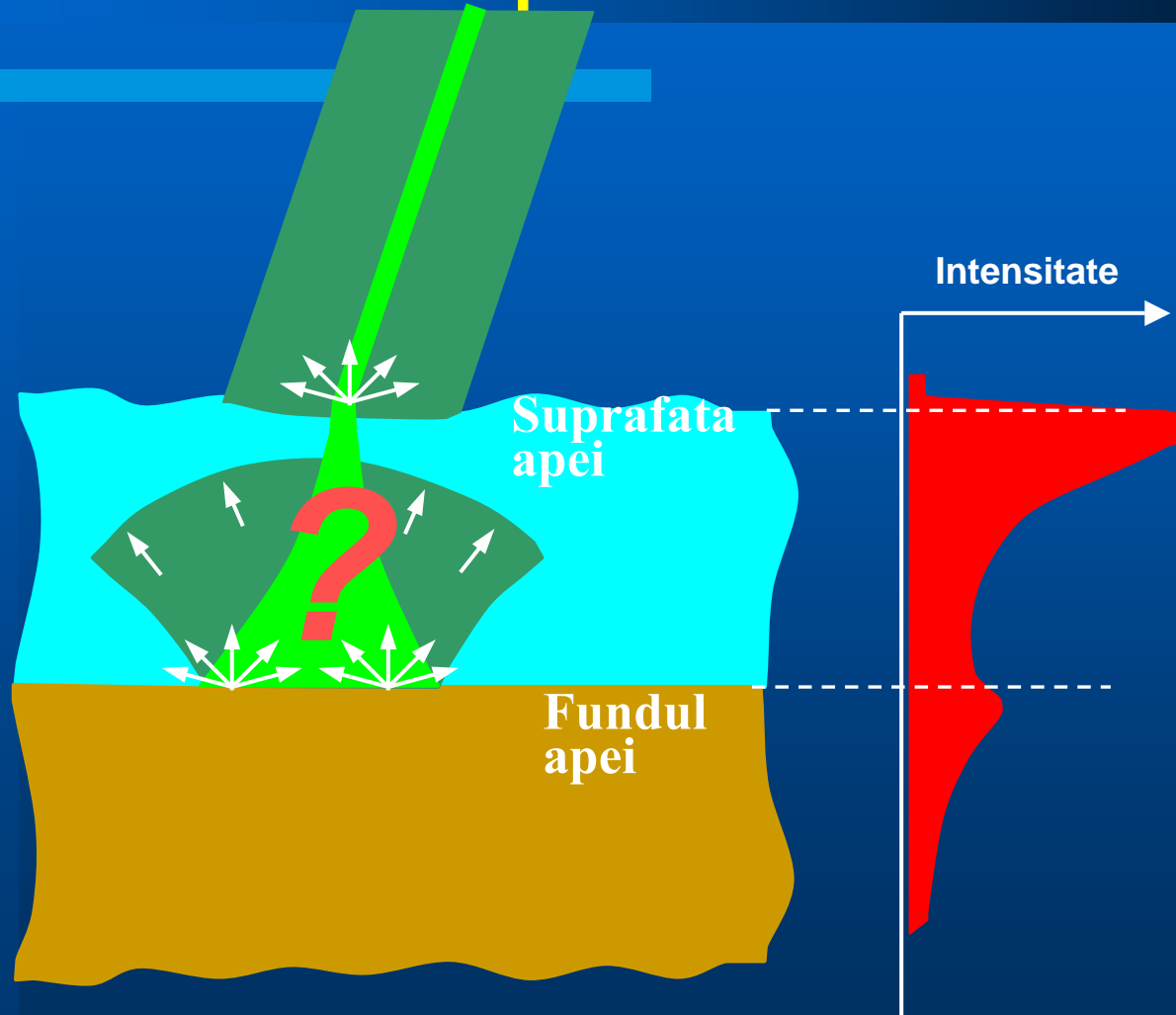


Topometrie subacvatica Lidar



Geometria pulsului laser : 532 nm

Suprafata marina, fundul apei si coloana de apa



Aplicatii civile

O situatie in care lidarul are o importanta aplicatie nestiintifica este in **supravegherea legalitatii traficului rutier**, pentru masurarea vitezei vehiculelor rutiere, ca o alternativa la tunurile radar.

Spre deosebire de radarul Doppler, care masoara viteza cu prin deplasarile Doppler, radarele folosite de politie calculeaza viteza din timpul dus-intors al trenului de unde radar. Astfel de sisteme sunt deseori incapabile sa izoleze un anumit vehicol din fluxul traficului si sunt in general prea voluminoase pentru a fi purtate de un agent.

Tehnologia LIDAR pentru o asemenea aplicatie este **suficient de miniaturizata pentru a fi montata intr-un "pistol" cu videocamera** si permite determinarea vitezei unui anumit vehicol aflat in fluxul rutier.

Aplicatii militare

- Din cat se cunoaste, pana in prezent aplicatiile militare nu sunt operationale sau sunt clasificate, dar se desfasoara un effort de cercetare foarte sustinut pentru **folosirea lidarului in imagerie**. Rezolutia marita a lidarelor le face extrem de atractive pentru observarea de detalii pentru identificarea tintelor (ex. blindate). In astfel de aplicatii, denumirea de **LADAR** este mai obisnuita.
- Cinci unitati lidar produse de compania germana Sick AG au fost folosite pentru **detectia apropiata a automobilului autonom Stanley**, care a castigat editia din 2005 a competitiei DARPA.