

ELEMENTE DE RADIOMETRIE SOLARA

Prof. Dr. Valeriu FILIP

Universitatea din Bucuresti,
Facultatea de Fizica

IRADIANTA SOLARA

Cantitatea masurata cu fotometrul solar este *iradianța solară directă*.

Iradianța este cantitatea de lumina (putere luminoasă) *difuza* care cade pe o suprafață sau este emisă de o suprafață sub o direcție specificată ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$):

$$I = \frac{d\Phi}{dA \cos \vartheta}$$

unde:

Φ este fluxul radiant, sau puterea luminoasă (W); A este aria sursei (m^2); ϑ este unghiul dintre direcția specificată și normala la suprafață.

Correspondentul iradianței pentru ochiul omenesc este *iluminanța*.

Iradianța solară pe un plan perpendicular pe distanța Pământ-Soare, la o distanță față de Soare egală cu o unitate astronomică (adică distanța medie dintre pământ și soare) se numește **constantă solară**, $I_0 = 1367 \text{ W/m}^2$

IRADIANTA SPECTRALA

Iradianta caracterizeaza emisia sau reflexia totala, pentru tot spectrul disponibil.

Iradianta spectrala este iradianta pe unitatea de frecventa (I_ν) sau pe unitatea de lungime de unda (I_λ). Unitatile de masura sunt $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{Hz}^{-1}$ sau $\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$; mai obisnuita este unitatea $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{nm}^{-1}$. Iradianta este deci suma (integrala) iradiantelor spectrale emise pe toate lungimile de unda disponibile. Iradianta caracterizeaza emisia sau reflexia totala, in timp ce iradianta spectrala caracterizeaza din acest punct de vedere numai o anumita lungime de unda sau frecventa.

Iradianta este utila intrucat indica fractiunea din puterea luminoasa emisa sau reflectata de o suprafata care va fi receptionata de un sistem optic ce vizeaza suprafata sub un anumit unghi.

PIRHELIOMETRE

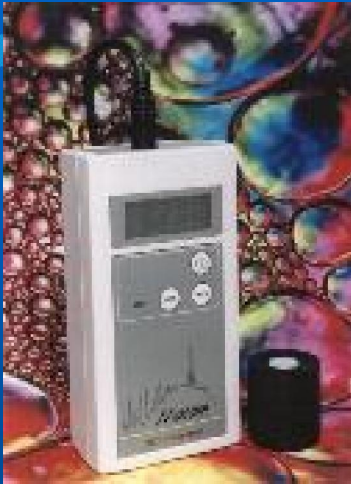
Sunt instrumente pentru masurarea radiantei solare directe.

Lumina patrunde printr-o fereastră a instrumentului și este directionată pe o baterie de termocuple (**bolometru**), unde este transformată în semnal electric.

Un pirheliometru este de obicei folosit în conjuncție cu un **piranometru** (instrument similar, care însă măsoară radiația difuză a soarelui)



FOTOMETRE (1)



Fotometrul
L201 produs
de compania
Macam



Fotometru de
flux luminos

In sens larg, fotometrul este un aparat care masoara *iluminarea* sau *iradianța*.

In termeni industriali, un fotometru este orice dispozitiv folosit pentru masurarea uneia din urmatoarele marimi:

- Intensitatea luminii imprastiate

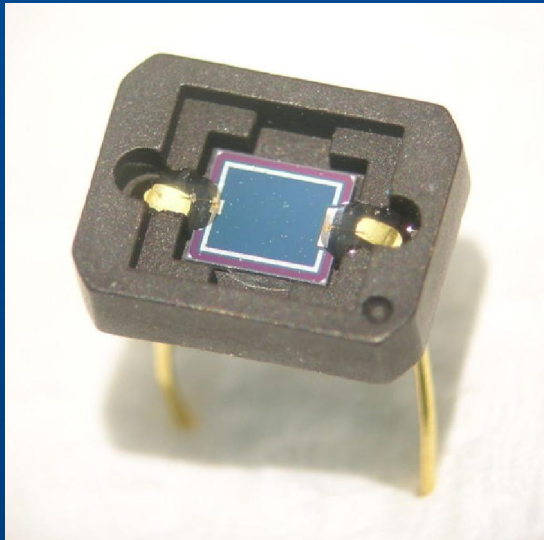
- Intensitatea luminii absorbite

- Intensitatea luminii de fluorescenta (fluorescenta: fenomenul de luminescenta produs de absorbtia unei radiatii de lungime de unda inferioara celei emise).

FOTOMETRE (2)

În principiu, un fotometru este compus dintr-un *senzor*, care își modifică anumite proprietăți electrice sub acțiunea iluminării, plasat într-un circuit electronic corespunzător pentru detectarea modificărilor respective.

Cel mai des folosite ca senzori sunt *fotodiodele* și *fotorezistentele*.

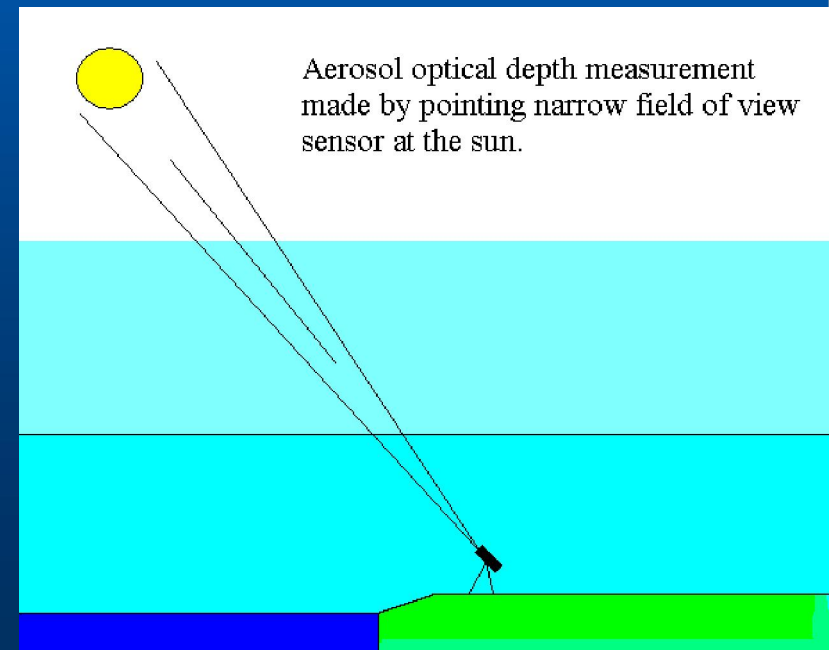


FOTOMETRE SOLARE (1)

În esență, un fotometru solar (*sun-photometer*) constă dintr-un senzor cu câmp vizual îngust, îndreptat către Soare. Fotometrele solare moderne conțin, pe lângă fotodetector și sistemul optic corespunzător, un dispozitiv de *filtrare spectrală*, o unitate de *urmărire automată a Soarelui* și un *sistem de achiziție a datelor*.



Fotometrul solar CE 318, produs de compania
CIMEL

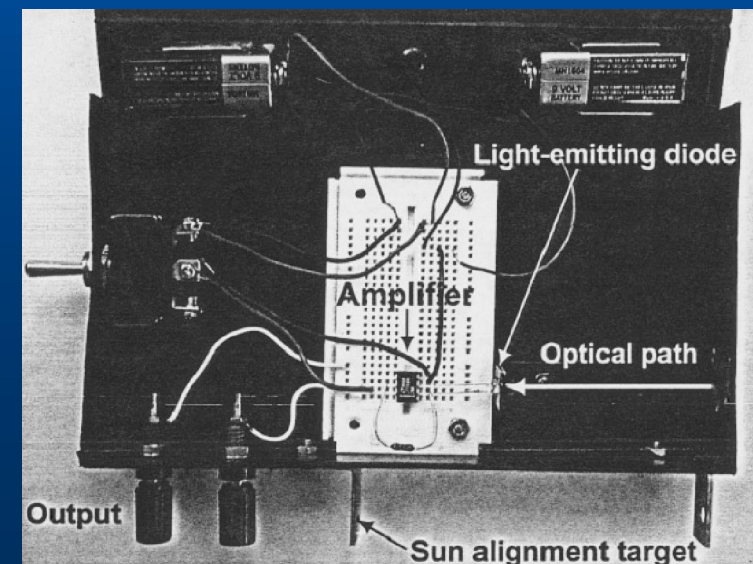
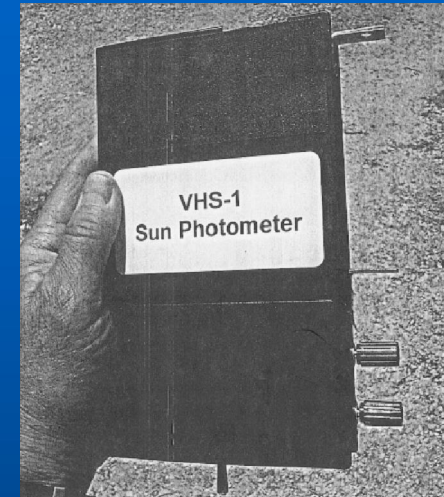


FOTOMETRE SOLARE (2)

Un exemplu de fotometru solar, cu o structură relativ simplă și puțin costisitoare a fost sistemul VHS-1.

Acesta este un instrument pentru care alinierea pe direcția soarelui se face manual.

Folosește două canale spectrale. Are avantajul portabilității, putând fi folosit atât pe platforme marine cât și pe platforme aeriene.



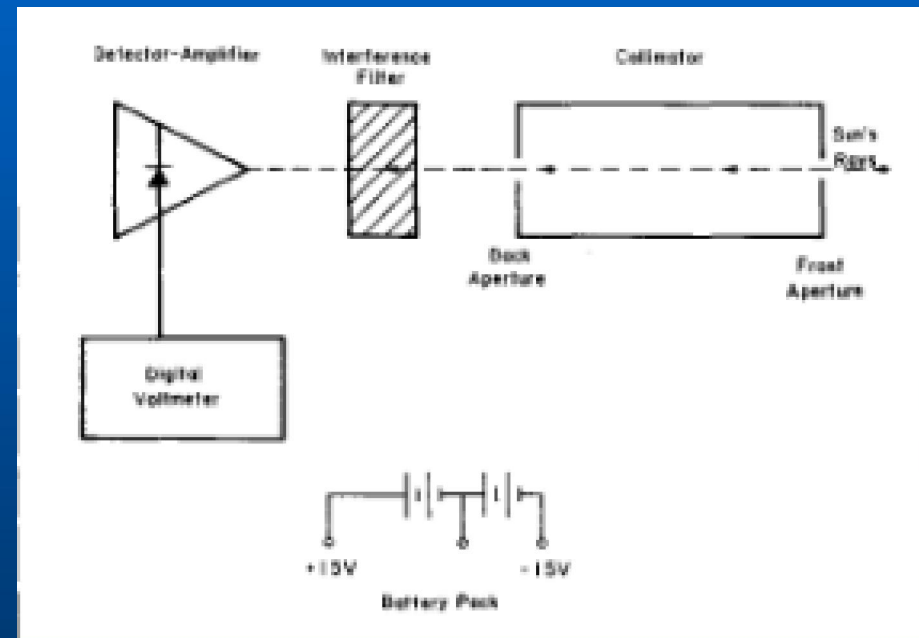
FOTOMETRU SOLAR – SCHEMA DE PRINCIPIU

Colimator (fara lentile)

Filtru interferential

Detector/amplificator optic

Sistem de inregistrare si
achizitie a datelor



FOTOMETRUL SOLAR CE 318



Este un sistem mult mai perfecționat, fabricat de compania franceză CIMEL Electronique.

Este un instrument extrem de precis, având toate calitățile unui echipament de teren: este motorizat, portabil, autonom (alimentat de o baterie solară) și automat.

FOTOMETRUL SOLAR CE 318



Folosește o combinație de filtre spectrale și vizare ajustabilă de la azimut la zenit, controlată de un microprocesor.

Fotometrul solar CE 318 se compune dintr-un cap optic, o unitate electronică și un robot.

Capul optic are două sisteme separate: colimatorul solar, fără lentile, și colimatorul celest prevăzut cu lentile.

FOTOMETRUL SOLAR CE 318

CARACTERISTICI TEHNICE

Varianta standard CE 318-1: are cinci filtre (canale de măsură) 440 nm, 670 nm, 870 nm, 936 nm și 1020 nm.

Modelul cu polarizare, CE 318-2: are opt canale de măsură, dintre care două sunt canale de polarizare.

Semi-deschiderea unghiulară a colimatoarelor 1,2°.

Lărgimea de bandă: 10 nm.

Detector: detectori de siliciu pentru Soare și cer.

Domeniul de temperatură pentru operare: -30°C to +60°C.

Alimentare: Baterii interne pentru capul optic și baterii externe pentru robot; bateriile sunt reîncărcabile prin panouri solare sau tensiune de rețea de 220 V.

Colectarea și transferul datelor: Stocare locală în memorii de tip EPROM, care pot fi citite opțional de un PC, sau transmise către satelit prin Data Collection Systems.

POZITIA FOTOMETRULUI SOLAR DE LA BERNA (46.95°N, 7.44°E, 560 m)



IAP, Berna

Instrument SPM2000

Numar de canale 18 (300 –
1024 nm)

Resolutie temporala: 30 s

Largime de banda: 2 – 10 nm

OBSERVATORUL DE LA JUNGFRAUJOCH **(46.55°N, 7.99°E, 3580 m)**



Numar de canale 16 (305 – 1024 nm)

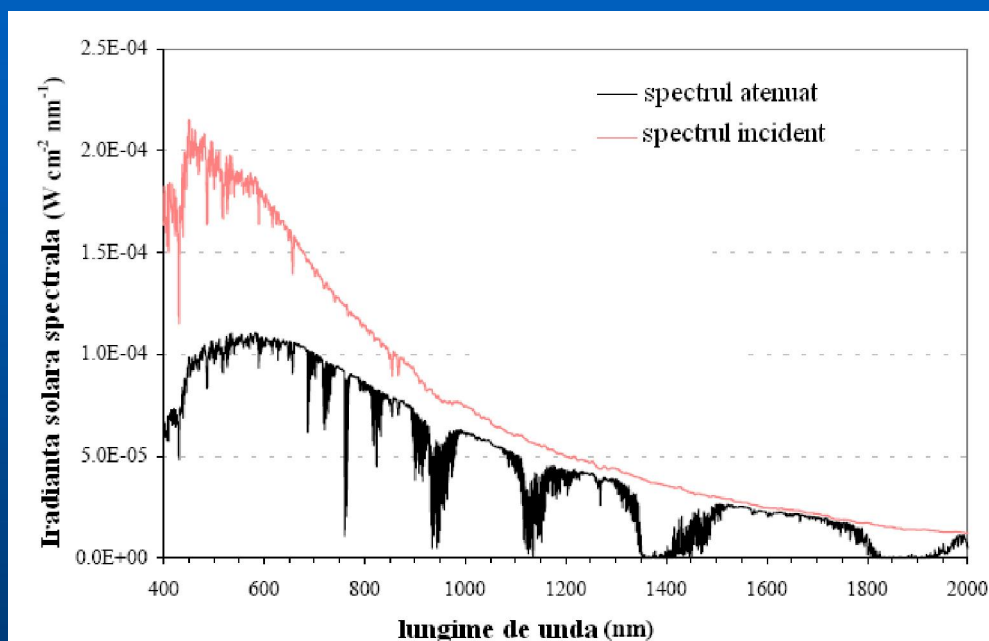
Resolutie temporală: 2 min

Largime de banda: 2 – 10 nm

Radiometru cu filtre de precizie

EFFECTUL ATMOSFERIC (1)

Prezența diverselor componente ale atmosferei face ca iradianța solară spectrală măsurată la sol să difere substanțial de cea incidentă pe stratul atmosferic.



Din acest motiv, studiul iradianței solare la suprafața Pământului în funcție de proprietățile optice ale atmosferei devine esențial.

EFFECTUL ATMOSFERIC (2)

Atunci când un fotometru solar este plasat într-un anumit loc în atmosfera terestră iradianța măsurată nu este deci egală cu iradianța emisă de Soare (adică iradianța solară extraterestră), întrucât fluxul solar este redus prin absorbție și împrăștiere. Prin urmare, fluxul radiant măsurat este datorat unei combinații între ceea ce emis de Soare și *efectul atmosferei*. Legătura dintre aceste efecte este continuată în legea Lambert-Beer :

$$I = I_{ext} e^{-m\tau} \quad \tau = \varepsilon l C \quad (\text{adancime optica})$$

unde ε este coeficientul de extincție, C este concentrația centrilor de absorbție sau împrăștiere în mediu, iar l este lungimea parcursului geometric al luminii.

m este un factor geometric (*airmass factor*, *masse relative de l'air*) ce caracterizează înclinarea drumului razelor de lumină prin atmosferă (θ este unghiul razelor solare față de orizont, sau *unghiul de elevație*):

$$m = 1/\sin(\theta)$$

COMPONENTA GENERALA A ATMOSFEREI

Gazele formeaza partea cea mai consistenta a atmosferei terestre. Gazele nu sunt distribuite uniform in spatiul din jurul planetei: exista atat variatii de densitate cu inaltimea, cat si variatii mari de compozitie. De exemplu, ozonul este o componenta gazoasa care se concentreaza intr-o patura subtire in stratosfera.

In afara de componenta gazoasa, atmosfera contine si suspensii condensate.

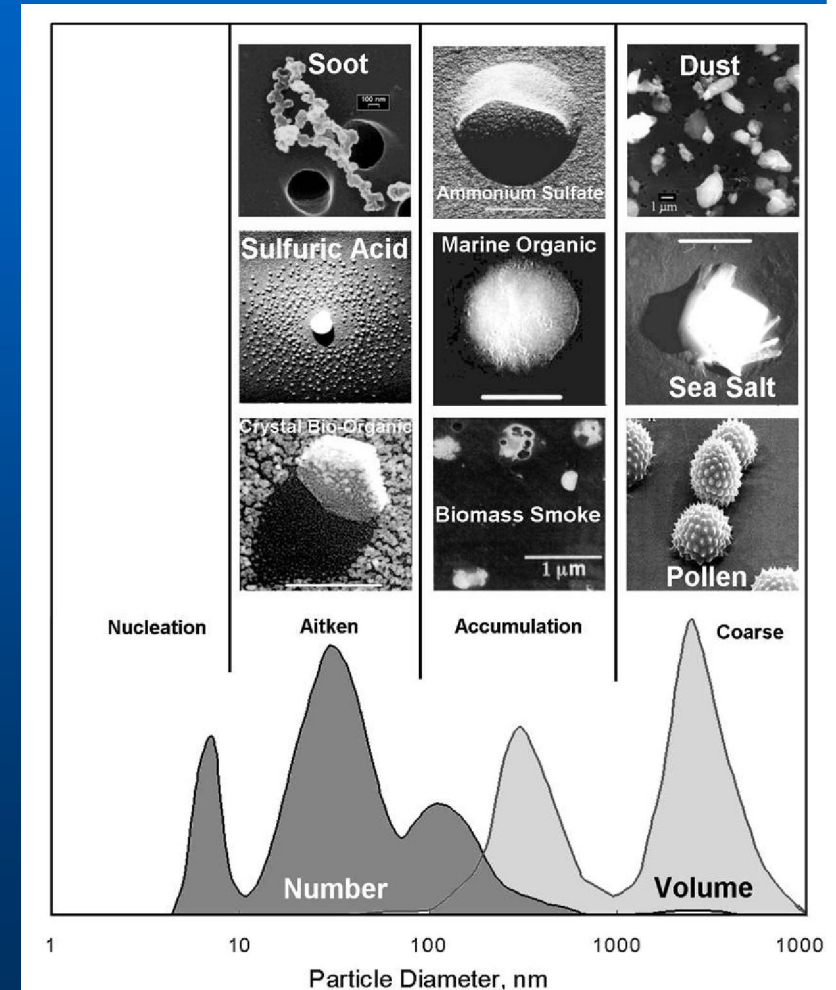
Din aceasta categorie fac parte picaturile de apa, cristalele de gheata, dar si alte particule care difera de acesti asa-zisi “meteori”. Ansamblul suspensiilor condensate in atmosfera, exceptand meteorii, se numeste *aerosol atmosferic*.

Studiul aerosolului atmosferic constituie partea centrala a investigatiilor facute in radiometria solara.

AEROSOLUL ATMOSFERIC (1)

Exista *aerosol primar*, format din particule care sunt emise sau injectate direct in atmosfera.

Aerosolul secundar este format din particule rezultate din agregarea particulelor primare sau prin nucleatie din faza gazoasa.



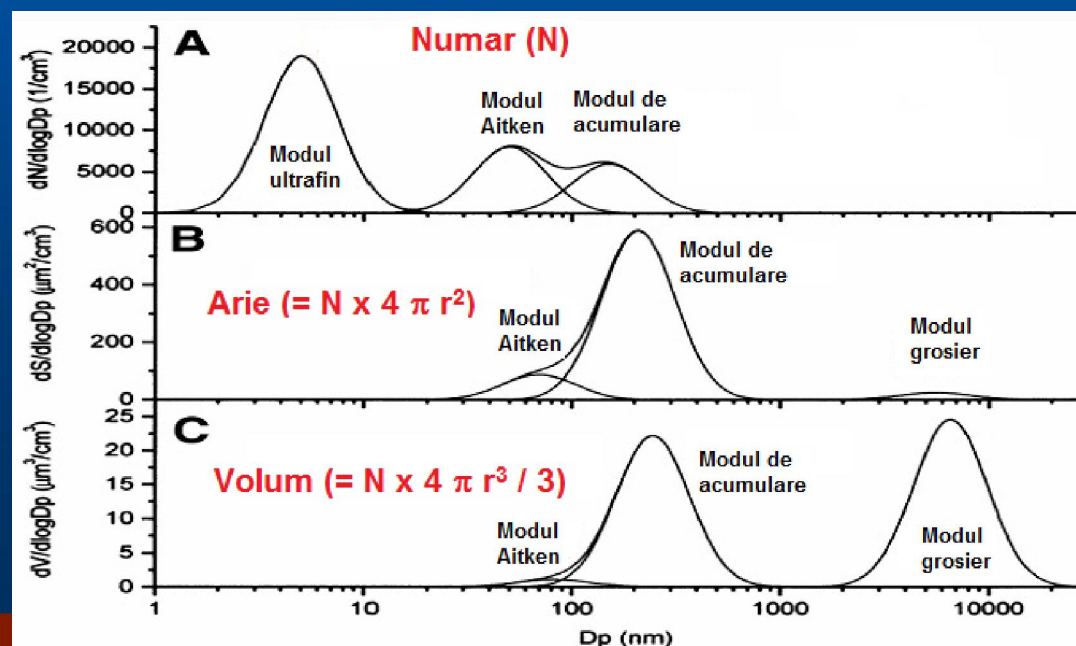
AEROSOLUL ATMOSFERIC (2)

Din punctul de vedere al fotometriei solare, cel mai mult intereseaza *distributia dupa dimensiuni* a particulelor de aerosol.

Aceasta distributie se poate exprima in forma numerica, de arie sau volumetrica.

Diversele forme ale distributiei aerosolului se utilizeaza in diverse situatii (ex. distributia de arie intereseaza în efectele aerosolului asupra sănătății).

Determinările experimentale directe au demonstrat că particulele de aerosol se pot grupa în câteva dimensiuni preferențiale, numite *moduri*.



AEROSOLUL ATMOSFERIC (3)

Una din cele mai folosite forme pentru descrierea matematica a modurilor distincte este *funcția log-normală*.

De exemplu distribuția volumetrică a modului i , în aproximația log-normală, se definește astfel:

$$v_i(r) = \frac{C_i}{r \sqrt{2\pi} \sigma_i} \exp \left[-\frac{\ln^2(r/R_i)}{2\sigma_i^2} \right]$$

C_i este *conținutul volumetric columnar al modului i* ($\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$), adică volumul total de particule de aerosol din modul i care se găsesc în coloana atmosferică de arie transversală unitate.

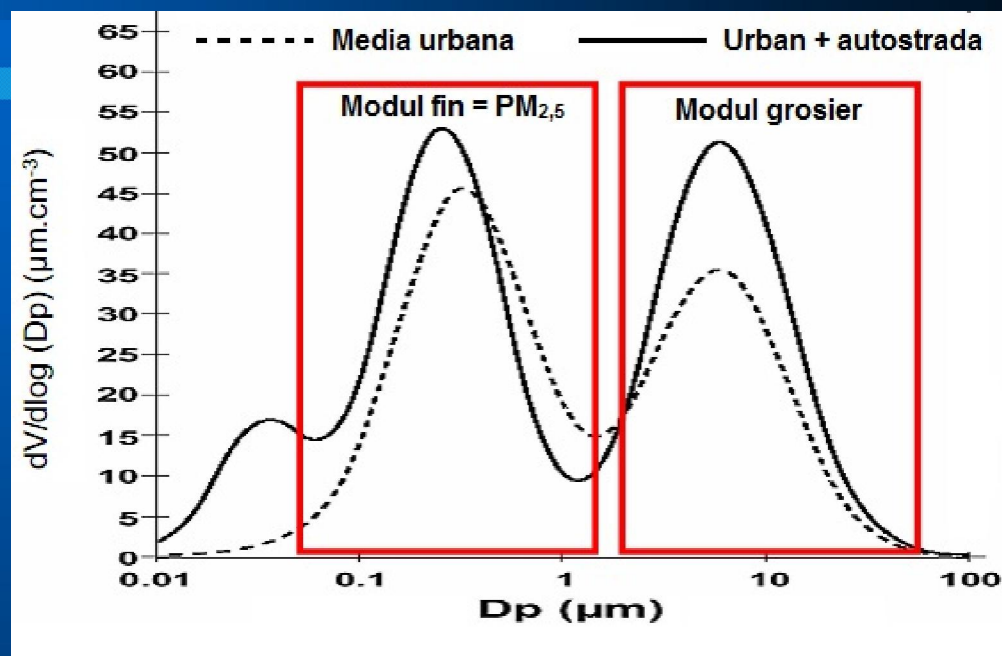
σ_i este o marime adimensională care, exprimând lărgimea distribuției, se numește *lărgime modală*.

R_i se numește *rază modală* și reprezintă valoarea lui r pentru care distribuția modului respectiv este maximă.

AEROSOLUL ATMOSFERIC (4)

În distribuțiile dimensionale ale aerosolului se pot distinge cel puțin patru moduri separate.

Totusi, în calcule practice de extincție a luminii nu este necesară o astfel detaliere.



Practic, particulele din modurile ultrafin (de nucleație), Aitken și de acumulare se pot grupa într-un singur mod distinct, numit **modul fin**. **Modul grosier** rămâne entitate separată.

Această considerare simplificată a structurii aerosolului atmosferic se numește în literatura de specialitate **aproximația bimodală**.

AEROSOLUL ATMOSFERIC (5)

Aerosolul atmosferic are doua efecte importante asupra sistemului atmosfera-pamant:

- Efectul direct (“de umbrire”) prin care atat radiatia solara cat si cea telurica sunt atenuate.
- Efectul indirect asupra mecanismelor de formare a meteorilor (aerosolii sunt centri de condensare a vaporilor de apa din atmosfera)

Efectul de atenuare a radiatiei solare este bivalent: are o componenta de imprastiere si una de absorbtie.

In total, insa, efectul de atenuare este masurat de o componenta specifica a OD, numita **adancimea de patrundere a aerosolului (AOD)**

METODA DE EXTRAPOLARE LANGLEY (1)

Efectul atmosferei se poate elimina din rezultate folosind *metoda de extrapolare Langley*. Aceasta metoda permite determinarea radiantei extraterestre folosind masuratori terestre.

Se bazeaza pe masurarea repetata a iradiantei cu un fotometru solar plasat intr-o locatie fixata, in timpul unei dimineti sau dupa amieze insorite, pe masura ce Soarele se deplaseaza pe cer.

Legea Lambert-Beer se poate scrie sub forma:

$$\ln \left(\frac{I}{I_{ext}} \right) = -m \tau$$

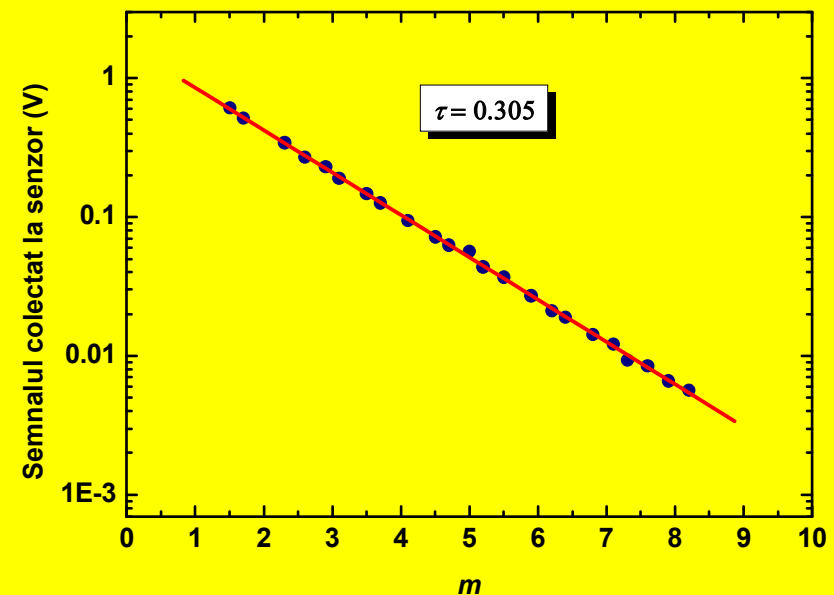
Masurand I pentru mai multe valori ale lui m si reprezentand graficul $\ln(I)$ ca functie de m , se poate calcula I_{ext} din extrapolarea dreptei obtinute prin interpolare liniara, la intersectia acesteia cu ordonata. Adancimea optica τ rezulta apoi imediat din panta dreptei amintite.

METODA DE EXTRAPOLARE LANGLEY (2)

Observatii:

1. Este evident ca, fizic, domeniul de variatie al lui m este intre 1 si infinit. Extrapolarea la $m = 0$ este un artificiu matematic pentru determinarea radiantei extraterestre.

2. In metoda descrisa, τ se presupune constant in timp. Practic, aceasta conditie se realizeaza daca nu exista nori deasupra punctului de observatie si daca nu sunt variatii semnificative in stratul de aerosoli atmosferici. Intrucat aerosolii tind sa se concentreze la altitudine joasa, manevrele de extrapolare Langley se fac in observatoare montane, la altitudini relativ mari. Acuratetea extrapolarilor Langley este mult imbunatatita daca datele sunt colectate deasupra topopauzei. De asemenea, durata de colectare a datelor nu trebuie sa depaseasca cateva ore.



METODA DE EXTRAPOLARE LANGLEY (3)

In literatura se citează erori ale OD masurat situate între 0.005 și 0.02.

Astfel de erori sunt în primul rând produse de imprecizii de calibrare, de erori în considerarea corecțiilor de împrăștiere și absorbție moleculară și de defecte în instrumentație (printre care se poate include și murdărirea accidentală a componentelor optice).

De asemenea, orice eroare de aliniere cu Soarele duce la valori mai mari ale AOD.

METODA DE EXTRAPOLARE LANGLEY (4)

Din acest motiv, procesul de extrapolare Langley trebuie efectuat în mod iterativ în modul următor:

- 1) se fitează o dreaptă (cu metoda celor mai mici pătrate) pe datele disponibile;
 - 2) se elimină datele ale căror puncte se află cu mai mult de 0,1% în afara liniei;
 - 3) se refitează punctele rămase cu o nouă linie dreaptă.
- Procesul continuă până când toate punctele rămase se află sub linia dreaptă sau deasupra ei cu mai puțin de 0,1%.

DETERMINAREA PRACTICA A AOD (1)

Ceea ce se masoara practic intr-un fotometru solar este un semnal electric, o anumita tensiune (V) produsa de senzor pentru fiecare determinare.

Semnalul V trebuie corectat intotdeauna cu valoarea sa “la intuneric” (V_{dark}), produsa de senzor in absenta iluminarii. In acest fel, semnalul util este $V - V_{dark}$.

In plus, AOD se suprapune intotdeauna cu OD-ul altor componente atmosferice, in special cu cel al componentelor gazoase (τ_m), numita si contributia dispersiei moleculare.

De asemenea, iradianța extraterestră trebuie corectată în funcție de unghiul solid sub care se vede pământul la diverse distanțe față de soare: este invers proporțională cu pătratul distanței dintre pământ și soare, d .

DETERMINAREA PRACTICA A AOD (2)

Admitand ca semnalul senzorului este proportional cu radianta, legea Lambert-Beer se poate deci pune sub forma:

$$\ln\left(\frac{V - V_{dark}}{V_0}\right) + 2 \ln\left(\frac{d}{d_{av}}\right) = -m(\tau_A + \tau_m) - m_{O_3} \tau_{O_3}$$

unde V_0 este constanta de etalonare a aparatului (obtinuta prin extrapolare Lngley), iar cu τ_A am notat AOD. τ_m si τ_{O_3} sunt componentele moleculara (gazoasa) si a ozonului din OD total, iar m si m_{O_3} sunt factorii geometrici acorespunzatorigazelor atmosferice (cu exceptia ozonului) si ozonului stratosferic. Cu d_{av} s-a notat media distantei pamant-soare. Raportul dintre d si d_{av} se poate calcula in functie de numarul zilei respective din calendarul Iulian, doy , cu urmatoarea relatie:

$$\frac{d_{av}}{d} = \left\{ 1 - 0,01673 \cos \left[0,017201 \times (doy - 4) \right] \right\}^{-1}$$

DETERMINAREA PRACTICA A

AOD (3)

Datorită faptului că suprafața Pământului nu este plană, iar atmosfera nu este omogenă pe verticală, variația lui m cu unghiul de elevație trebuie corectată, mai ales la elevații solare mici, sub 30° . O expresie valabilă pe un domeniu larg de elevații solare este următoarea:

$$m = \frac{1.002432 \sin^2 \theta + 0.148386 \sin \theta + 0.0096467}{\sin^3 \theta + 0.149864 \sin^2 \theta + 0.0102963 \sin \theta + 0.000303978}$$

Comparati cu formula simplificata, obtinuta pentru atmosfera planara si omogena:

$$m = \frac{1}{\sin \theta}$$

DETERMINAREA PRACTICA A AOD (4)

Distribuția ozonului are un maxim foarte pronunțat în stratosferă (aproximativ la 22 km) și deci diferă semnificativ față de distribuția moleculară obișnuită. Factorul geometric al ozonului se poate obține ca o corecție a factorului m în felul următor:

$$m_{O_3} = m - 0,011m + 0,027m^2 - 0,0161m^3$$

Cantitățile τ_m și τ_{O_3} se pot calcula prin algoritmi empirici proveniți din diverse modele atmosferice, după cum se va vedea în continuare. Cu toate că ozonul contribuie relativ slab la extincția totală a luminii solare în atmosferă, în zona lungimilor de undă de 340 nm și 675 nm contribuția sa devine semnificativă datorită liniilor de absorbție specifice.

DETERMINAREA PRACTICA A AOD (5)

Trebuie precizat aici că determinarea precisă a unghiului de elevație nu este o chestiune banală. Simpla măsurare a unghiului sub care se vede Soarele față de direcția sud-nord poate fi afectată de erori considerabile. De aceea, în practică, se calculează unghiul de elevație solară în funcție de trei parametri care se pot determina mai precis: latitudinea punctului de observare (φ), unghiul de declinație solară (δ – care este latitudinea punctului de pe sol în care Soarele apare la zenit în momentul măsurătorii) și unghiul orar (h – care este unghiul cu care ar trebui rotit Pământul pentru a suprapune meridianul punctului de observare cu meridianul punctului în care Soarele este la zenit; acest unghi se determină prin relația: $2\pi t/86400$, unde t este timpul local exprimat în secunde).

Expresia care dă unghiul de elevație este următoarea:

$$\sin \theta = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos h$$

DETERMINAREA PRACTICA A AOD (6)

$$\tau_m = R_4 \exp\left(-H \frac{273}{29,3}\right)$$

$$\tau_{O_3} = Ozabs \frac{DOBS}{1000}$$

unde H este altitudinea locului de observație, iar R_4 depinde de lungimea de unda λ prin următoarele relații:

$$R_4 = 28773,6 \frac{R_2^2 (2 + R_2)^2}{\lambda^4}$$

$$R_2 = 10^{-8} \left(8342,13 + \frac{406030}{130 - \lambda^{-2}} + \frac{15997}{38,9 - \lambda^{-2}} \right)$$

$Ozabs$ este secțiunea eficace de absorbție a ozonului, $DOBS$ este cantitatea de ozon în *unități Dobson* (DU; 1 DU este cantitatea de ozon care ar forma, la suprafața Pământului, un strat cu grosimea de 10 μm , în condiții normale de temperatură și presiune)

DEPENDENTA DE LUNGIMEA DE UNDA A AOD

Ca si τ_A , adancimea optica moleculara, τ_m , este o marime dependenta de lungimea de unda a radiatiei investigate. De exemplu, pentru lumina rosie, $\tau_m = 0.05793$, iar pentru lumina verde, $\tau_m = 0.13813$.

Datorita dependentei de lungimea de unda a AOD, este util sa se faca masuratori la diverse frecvente ale radiatiei incidente. In acest scop fotometrele solare sunt prevazute cu mai multe filtre de lumina si eventual cu senzori separati pentru fiecare din aceste filtre. Se spune astfel ca instrumentul masoara pe mai multe “canale”.

Cunoasterea dependentei AOD de lungimea de unda este utila in determinarea dimensiunilor si chiar a tipului de aerosol, aceasta fiind un fel de amprenta a aerosolului.

APROXIMATIA ÅNGSTRÖM

Deși variația spectrală a OD este în general complicată, se admite de multe ori ca valabilă *ipoteza lui Ångström* conform căreia OD este invers proporțională cu o anumită putere a lungimii de undă:

$$\tau_{\lambda} = \beta \lambda^{-\alpha}$$

unde β este așa-numitul *coeficient de turbiditate*, iar α este *exponentul Ångström*.

Această ipoteză este extinsă, de obicei, în mod tacit, și la componenta de extincție datorată aerosolului, AOD, astfel încât apare frecvent în literatură expresia:

$$\tau_A(\lambda) = \beta \lambda^{-\alpha}$$

EXPONENTUL ÅNGSTRÖM

Folosind aproximatia Ångström, exponentul specific se poate calcula din determinari efectuate cu numai doua lungimi de unda. Facand raportul valorilor AOD corespunzatoare celor doua canale, λ_1 si λ_2 , se obtine:

$$\frac{\tau_A(\lambda_1)}{\tau_A(\lambda_2)} = \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^{-\alpha}$$

De aici, exponentul Ångström se poate calcula dupa relatia:

$$\alpha = - \frac{\ln \left[\frac{\tau_A(\lambda_1)}{\tau_A(\lambda_2)} \right]}{\ln \left[\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right]}$$

FOTOMETRUL SOLAR VIRTUAL CALIPSO



PARAMETRUL ÅNGSTRÖM

Odata cu aparitia fotometrelor solare cu mai multe canale, a aparut evident ca dependenta AOD de lungimea de unda a radiatiei este mult mai complicata decat aproximatia lui Ångström.

Ca trasatura generala, AOD este o functie descrescatoare de lungimea de unda a radiatiei (lumina de lungime de unda mai mica este imprastiata –si deci atenuata – practic de toate componentele atmosferei, in timp ce undele de lungime mai mare tind sa “ocoleasca” centrii de extinctie aflati in suspensie in atmosfera si astfel sunt mai putin atenuate).

Pentru a pastra formal descrierea spectrala a AOD in spiritul aproximatiei Ångström, se defineste asa-numitul *parametru Ångström* prin relatia:

$$\alpha(\lambda) = -\frac{d \ln \tau_A(\lambda)}{d \ln(\lambda)} = -\lambda \frac{\tau'_A(\lambda)}{\tau_A(\lambda)}$$

PARAMETRUL ÅNGSTRÖM (2)

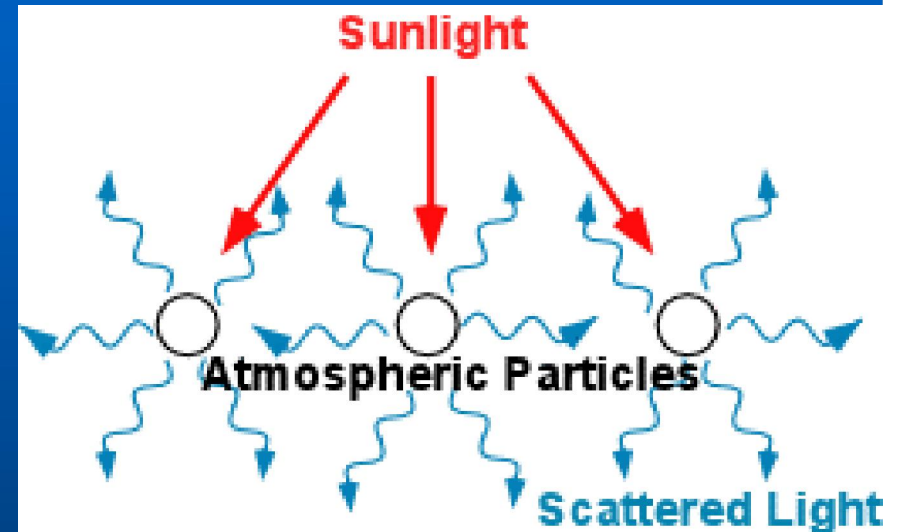
Determinarea parametrului Ångström se face deci prin măsurarea AOD la diferite lungimi de unda (canale), prin interpolarea și derivarea curbelor corespunzătoare.

Limitare practica importanta: pentru un instrument dat, numărul de canale nu poate fi prea mare (fotometre solare cu opt canale de măsură sunt în momentul de față printre cele mai avansate).

Ca urmare, operația de derivare numerică pentru calcularea parametrului Ångström rămâne dependentă de erori semnificative, mai ales la extremitățile domeniului de lungime de undă investigat.

TEORIA MIE (1)

Pentru a intelege mai exact dependenta spectrala a AOD si pentru a utiliza corespunzator datele de fotometrie solara sunt necesare cateva consideratii teoretice.



Imprăștierea și absorbția luminii pe un obiect sferic dielectric este descrisă de o soluție a ecuațiilor Maxwell care poartă denumirea generică de teoria Mie, după numele fizicianului german Gustav Mie, care a elaborat-o în 1908.

TEORIA MIE (2)

Expresia generală a AOD
este următoarea:

$$\tau_A(\lambda) = \int_{r_m}^{r_M} \pi r^2 Q_{ext} \left(\frac{2\pi r}{\lambda}, n - ik \right) N(r) dr$$

unde r_m și r_M sunt limitele domeniului în care poate varia raza particulei de aerosol.

Nucleul Q_{ext} se numește *factor de eficiență a extincției* care depinde de indicele de refracție complex al tinte dielectrice $n-ik$. Teoria Mie produce, de fapt, acest factor de eficiență a extincției.

Factorul $N(r)$ este distribuția dimensională a tintelor (particulelor de aerosol), adică $N(r)dr$ este numărul de particule cu raza în intervalul $(r, r+dr)$ aflate în coloana atmosferică de raza unitate.

TEORIA MIE (3)

Expresia factorului de eficiența a extincției, data de teoria Mie, este următoarea:

$$Q_{ext}(x, m) = \frac{2}{x^2} \sum_{j=1}^{\infty} (2j+1) \operatorname{Re}(a_j + b_j)$$

Unde $m = n - i k$, iar a_j și b_j sunt *coeficienții Mie*, determinați de condițiile la interfața dintre tinta sferică și mediul extern (considerat în general ca fiind vid).

Se poate demonstra prin teste numerice că numărul optim de termeni în seria de mai sus este dat de întregul cel mai apropiat de valoarea următoarei expresii:

$$N(x) = x + 4x^{1/3} + 2$$

TEORIA MIE (4)

La randul lor, coeficientii Mie sunt dependenti de m si au expresii analitice complicate:

$$a_j = \frac{\left(\frac{A_j(mx)}{m} + \frac{j}{x} \right) \operatorname{Re}(\zeta_j(x)) - \operatorname{Re}(\zeta_{j-1}(x))}{\left(\frac{A_j(mx)}{m} + \frac{j}{x} \right) \zeta_j(x) - \zeta_{j-1}(x)}$$
$$b_j = \frac{\left(m A_j(mx) + \frac{j}{x} \right) \operatorname{Re}(\zeta_j(x)) - \operatorname{Re}(\zeta_{j-1}(x))}{\left(m A_j(mx) + \frac{j}{x} \right) \zeta_j(x) - \zeta_{j-1}(x)}$$

unde simbolul A_j reprezintă derivata logaritmică a funcției Riccati-Bessel de prima speță, iar ζ_j este funcția Riccati-Bessel de speță a doua.

ALEGEREA CANALELOR DE MASURA

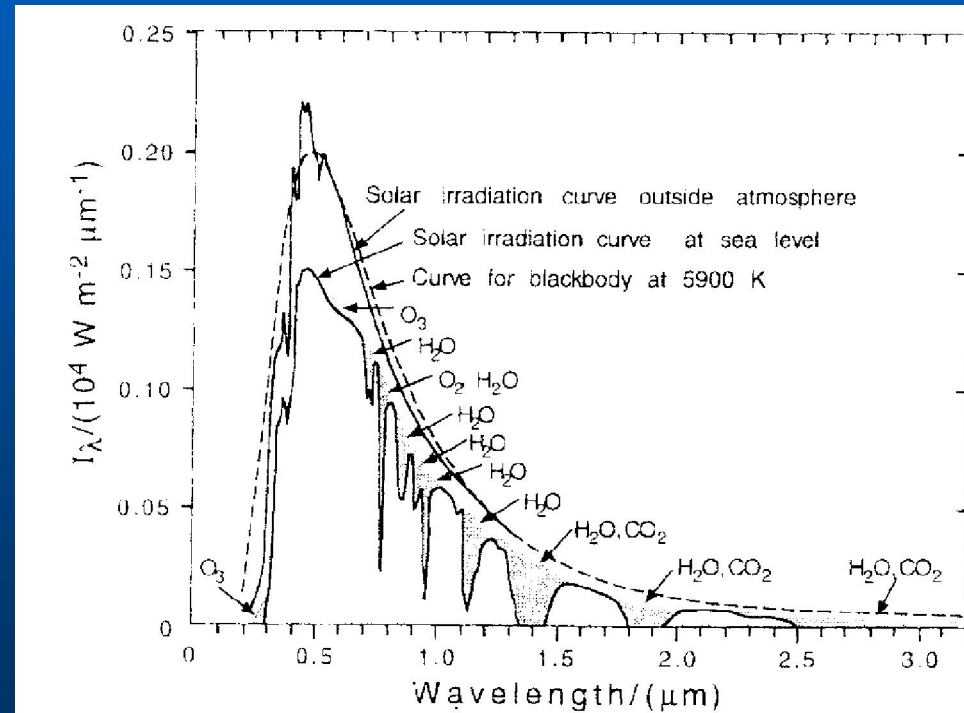
Una dintre sursele de erori in masuratorile de fotometrie solara este infiltrarea de lungimi de unda nedorite prin filtrele instrumentului, sau asa-numitele *scurgeri de lumina*.

Pentru obtinerea unor rezultate de incredere, astfel efecte trebuie reduse pana la $10^{-6} - 10^{-7}$ din iradiana primara. Aceasta cerinta este realizata mai usor daca se admit canale de lucru cu largime relativ mare.

Totusi largimea spectrala a unui canal nu poate fi prea mare, pentru a nu include variatii semnificative ale transmisiei atmosferice pe intervalul spectral respectiv. Un bun compromis este largimea spectrala de 10 nm a fiecarui canal de lucru.

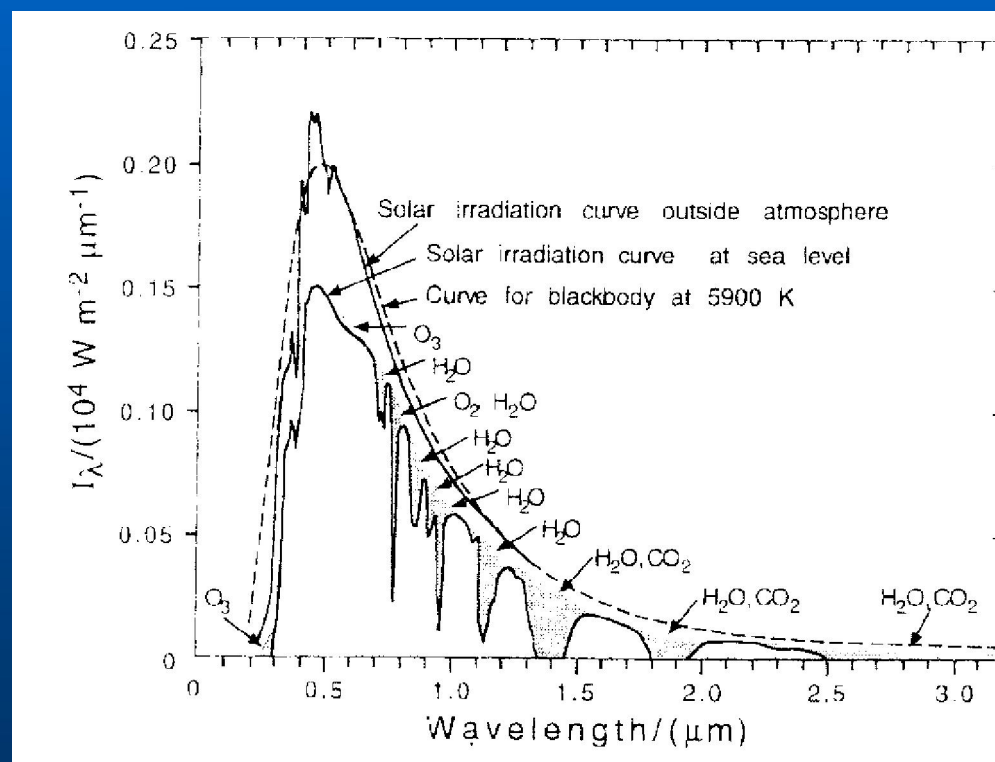
POZITIA CANALELOR DE MASURA

In operarea fotometrelor solare sunt recomandate cateva lungimi de unda care se afla in zone cu absorbtie atmosferica redusa din spectrul solar, sunt bine separate si plasate in zone in care structura Fraunhofer a spectrului de absorbtie solara este relativ neteda. In acest fel, in cazul unor usoare deplasari ale ferestrelor canalelor spectrale (produse de exemplu de variatii de temperatura sau dezinlinieri accidentale ale instrumentului), energia solara primita pe un canal sa nu varieze prea mult.



EXEMPLU: FOTOMETRUL SOLAR CE 318N

Exemplu: fotometrul solar CE 318N produs de CIMEL
Electronique foloseste urmatoarele cinci canale: 440 nm, 670 nm, 870 nm, 940 nm si 1020 nm. Dupa cum se vede in spectrul solar alaturat, ele corespund unor valori bine separate, pentru care absorbtia atmosferica este relativ mica, astfel incat corectiile de OD molecular sa fie nesemnificative. Aceasta duce la diminuarea erorilor in obtinerea curbelor $\tau_A(\lambda)$ si deci in determinarea parametrului Ångström.



ESTIMAREA TIPULUI DE AEROSOL CU PARAMETRUL ÅNGSTRÖM

Distributia aerosolilor dupa dimensiuni se poate estima din dependenta AOD de lungimea de unda. Curbele de tipul $\tau_A(\lambda)$ se numesc *spectre de extinctie produsa de aerosol* (sau, mai scurt, spectre de AOD)

In mod tipic, se fac masuratori la 440 nm si 870 nm si se calculeaza exponentul Ångström.

Valori ale lui α mai mari decat 2 indica prezenta unor particule fine (de exemplu fum sau sulfati).

Valori ale lui α apropiate de zero indica modul grosier de aerosol, de exemplu praf desertic.

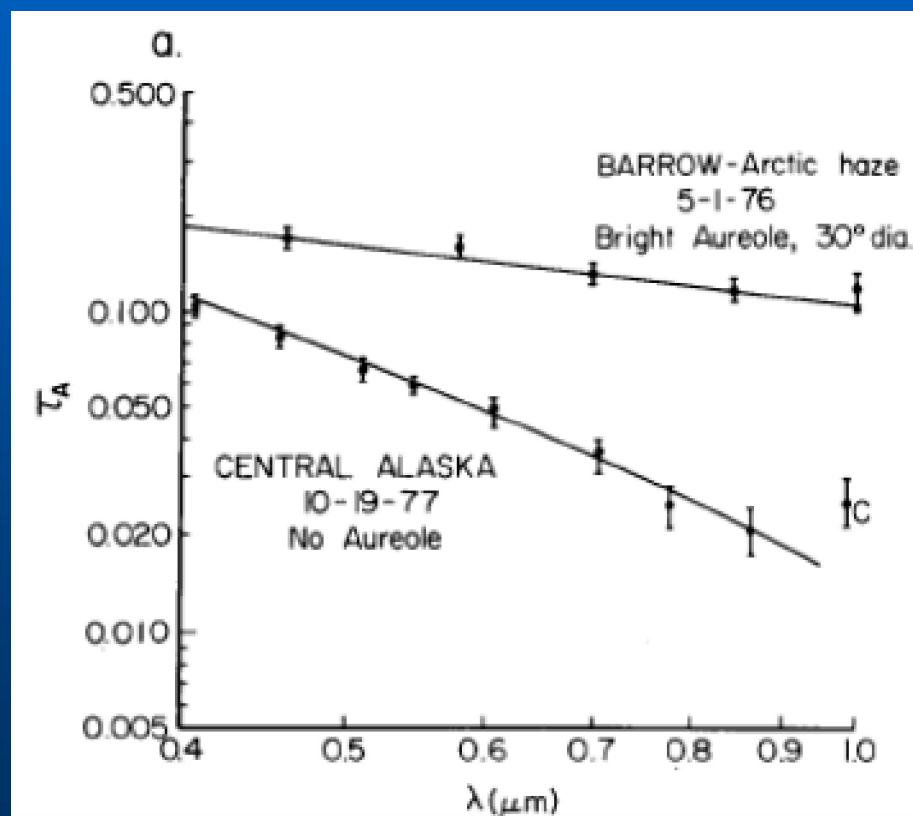
EXEMPLE DE SPECTRE DE EXTINCTIE PRODUSA DE AEROSOL (1)

Diagrama alaturata ilustreaza un episod de ceață arctică măsurat in Alaska.

Masuratorile chimice indicau un transport intens de aerosol din Eurasia (datorat poluarii) catre Alaska.

Curba de jos, corespunde unei situatii in care sursele de poluare locale sau distante nu afecteaza zona de masurare in nici un fel.

Extinctia variaza diferit cu lungimea de unda in cele doua cazuri, in cazul cetii arctice fiind mai slaba. Aceasta reflecta faptul ca particulele de aerosol importate sunt mai mari decat cele din fondul natural local.



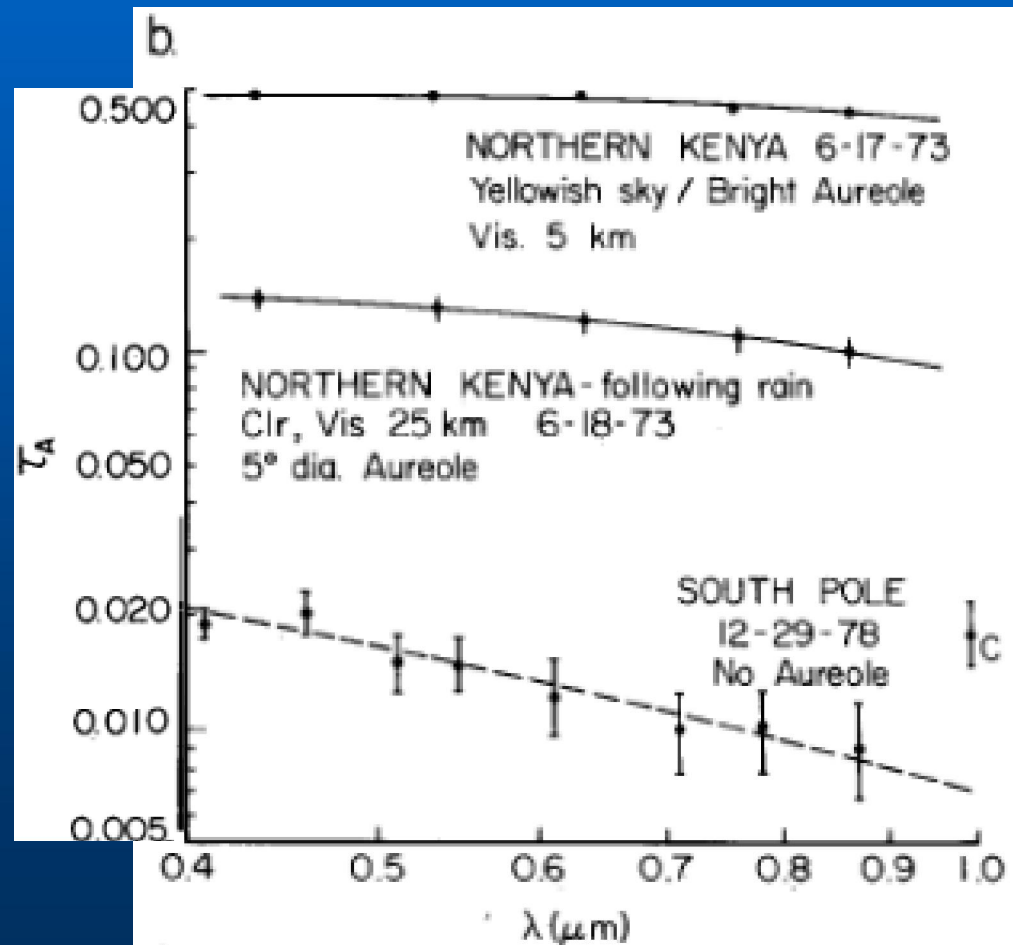
EXEMPLE DE SPECTRE DE EXTINCTIE PRODUSA DE AEROSOL (2)

Nordul Keniei, pe malul sudic al lacului Turkana, o zona prafoasa plasata la marginea desertului Sahill.

Curba de sus a fost obtinuta in timpul unei perioade uscate, cu convectii puternice, cu transport masiv de praf saharian dinspre nord.

Curba mijlocie corespunde unui transport moderat de aer dinspre sud, care a urmat unor precipitatii abundente. Se observa ca aerul curatat de ploaie mai pastreaza inca o oarecare cantitate de particule gigantice ($r > 1 \mu\text{m}$).

Pentru comparatie, se prezinta si un spectru de extinctie obtinut la Polul Sud (curba de jos).



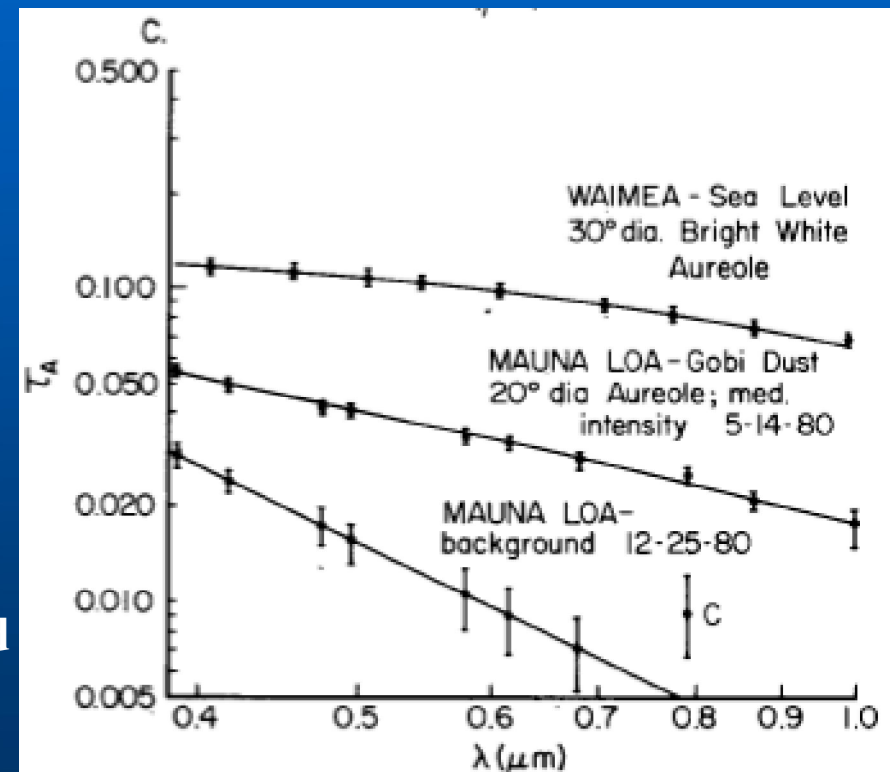
EXEMPLE DE SPECTRE DE EXTINCTIE PRODUSA DE AEROSOL (3)

Exemplul alaturat se refera la observatii in zona Pacificului central, facute cu precizie de 2%.

Curba de sus este un spectru de extinctie tipic la nivelul marii produs de particulele gigantice de sare din stratul de amestec.

Cea de-a doua diagrama este pentru conditii normale de fond la observatorul de pe muntele Mauna Loa (3380 m), obtinute in timpul diminetii, cand aerosolul din straturile inferioare de aer nu a ajuns la nivelul observatorului. Aceste masuratori au fost facute primavara, cand se produc intruziuni puternice de praf din Mongolia (desertul Gobi).

Curba inferioara a fost obtinuta in conditii normale, la aceeasi concentratie de aerosoli (aprox. 150 cm^{-1}).

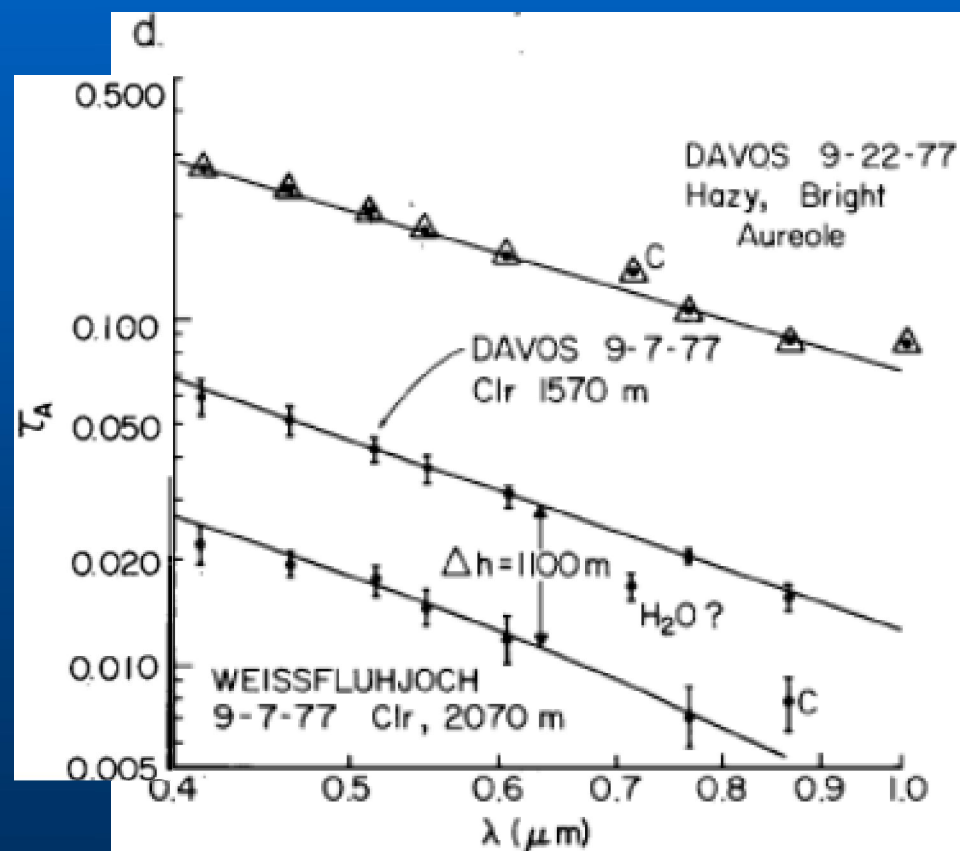


EXEMPLE DE SPECTRE DE EXTINCTIE PRODUSA DE AEROSOL (4)

Ca ultim exemplu, figura alaturata prezinta diagrame de extinctie determinate in Alpii elvetieni, langa Davos, in estul Elvetiei.

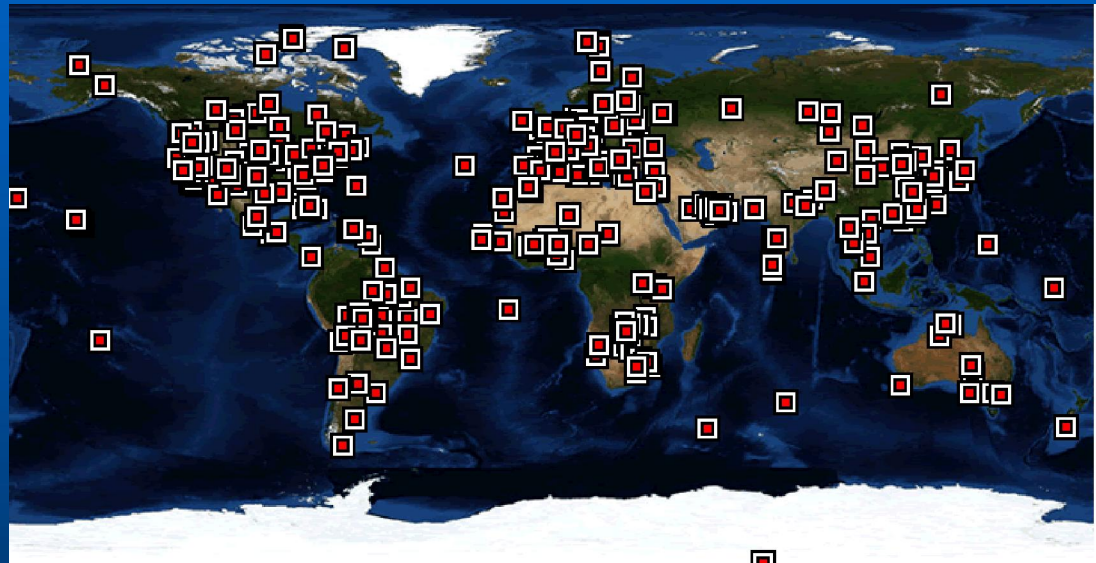
Curba de jos a fost luata dupa trecerea unui sistem frontal care a adus o intruzie de aer foarte curat in Europa centrala.

Curba de sus a fost masurata la o zi dupa ce o ceata industrială a ajuns in zona alpina. Cerul era cenusiu-murdar. In acest exemplu se observa amprenta tipica a aerosolului industrial relativ proaspat (10^4 s), care, dupa panta abrupta a curbei de extinctie, contine o concentratie mare de particule in domeniul $r < 0.1 \mu\text{m}$.



MONITORIZAREA SUN-FOTOMETRICA A INCARCARI CU AEROSOL A ATMOSFEREI

Valoarea practica a metodelor fotometrice de investigare a atmosferei este mult amplificata prin folosirea de retele nationale sau internationale de fotometre solare.



Cea mai ampla dintre acestea este Aerosol Robotic Network (AERONET), initiata de NASA și de LOA-PHOTONS (CNRS) și care se extinde permanent. In momentul de fata, aceasta retea acopera practic toata suprafata de uscat a globului.

RETEAUA AERONET – GENERALITATI

AERONET furnizează pe termen lung o bază de date continuă și accesibilă public de date optice, microfizice și radiative ale aerosolului atmosferic, obținute atât prin fotometrie solara directa cat si prin fotometrie celesta.

La baza functionarii rețelei AERONET se afla **standardizare a instrumentației, a procedurilor de calibrare, a procesării și distribuirii datelor**, ceea ce permite comparații multianuale și la scară globală.

Baza de date AERONET este accesibila public (<http://aeronet.gsfc.nasa.gov/index.html>).

Datele se prezinta sub forma grafica sau ca tabele care se pot prelucra ulterior

MASURATORI STANDARD ALE AERONET

Instrumentele AERONET pot face în mod curent măsurători fotomertrice directe sau aureolare (de fotometrie celestă, sau de împrăștiere multiplă).

În primul caz, instrumentul este orientat către soare și măsoară iradianța în ipoteza că lumina incidentă suferă o singură împrăștiere la trecerea prin atmosferă – atmosfera trebuie să fie deci suficient de limpede, fără nori.

Măsurătorile celeste se efectuează cu instrumentul orientat către cer, sub un unghi mic față de direcția solară (în almucantar). Radiația patrunde astfel în colimator după ce a suferit cel puțin două împrăștiări pe suspensiile prezente în atmosferă.

ALGORITMUL DE INVERSIUNE – GENERALITATI (1)

Extragerea informației din astfel de date se face prin utilizarea unui așa-numit algoritm de inversiune.

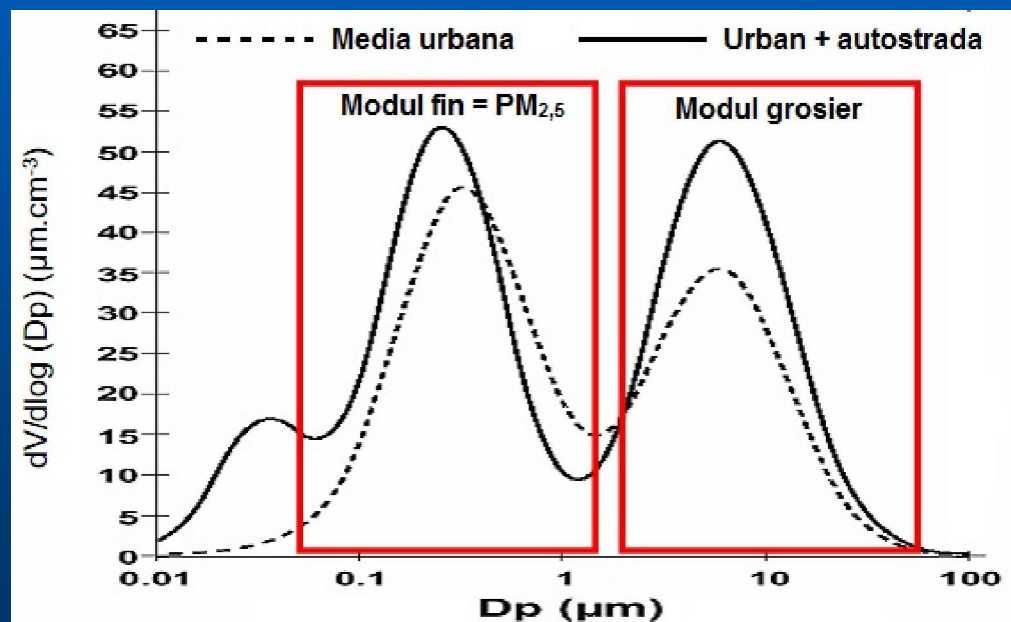
La baza algoritmului de inversiune se află un set de ipoteze de model. Gradul de îndeplinire a acestor ipoteze în situații practice este o măsură a calității rezultatelor algoritmului:

- Particulele de aerosol sunt presupuse de două categorii: sferice și ne-sferice care formează un ansamblu polidispers și omogen de sfere și sferoizi (sfere alungite, orientate aleatoriu). Indicele de refracție complex este același pentru toate particulele.
- Atmosfera este presupusă plan-paralelă.
- Se presupune că aerosolul este distribuit omogen pe verticală, iar într-o abordare mai exactă, se admite că există două straturi omogene de aerosol.

ALGORITMUL DE INVERSIUNE – GENERALITATI (2)

In esenta, algoritmul de inversiune este conceput sa furnizeze parametrii distributiei de aerosol prin inversarea relatiei fundamentale a AOD pentru fiecare canal disponibil, in aproximatia bimodala si admitand distributii log-normale pentru fiecare mod de aerosol.

$$\tau_A(\lambda) = \int_{r_m}^{r_M} \pi r^2 Q_{ext} \left(\frac{2\pi r}{\lambda}, n - ik \right) N(r) dr$$



Algoritmul utilizeaza in conjunctie datele de fotometrie solara directa si celesta

PRODUSE AERONET OBTINUTE DIN ALGORITMUL DE INVERSIUNE

- Distribuția dimensională a volumului de aerosol din coloana verticală de arie unitate, $dV/d\ln r$, exprimat în $\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$. Distribuția este calculată într-o diviziune de 22 puncte logaritmice echidistante, în domeniul $0,05 \mu\text{m} \leq r \leq 15 \mu\text{m}$.
- Partea reală, $n(\lambda)$ și imaginară $k(\lambda)$ a indicelui de refracție complex al aerosolului ($1,33 \leq n(\lambda) \leq 1,66$; $0,0005 \leq k(\lambda) \leq 0,5$).
- Procentul de particule sferice în aerosolul observat.
- Diverși parametri modali: concentrații volumice modale, raze mediane, deviații standard modale, raze efective modale și punctul de separare dintre modurile fin și grosier (definit ca raza pentru care distribuția dimensională volumică este minimă).

MARIMI RADIATIVE OBTINUTE INDIRECT DIN ALGORITMUL DE INVERSIUNE

- Albedoul de împrăștiere singulară, $\omega_0(\lambda)$.
- Funcția de fază, $P(\Theta; \lambda)$, pentru 83 valori ale unghiului de împrăștiere.
- Factorul de asimetrie, $g = \langle \cos(\Theta) \rangle$, pentru fiecare valoare a funcției de fază.
- Fluxuri spectrale la partea de sus si de jos a atmosferei (fluxuri de bandă largă, forcing radiativ, eficiența forcingului radiativ).

DETERMINAREA CONTINUTULUI DE APA PRECIPITABILA PRIN FOTOMETRIE SOLARA

Apa precipitabila: continuta in atmosfera sub forma de vapori (stare gazoasa).

Determinarea continutului de apa precipitabila se face in mod asemanator cu metoda DIAL: se face raportul extinctiei la 936.1 nm (lungime de absorbtie rezonanta a apei) si la o lungime de unda apropiata, dar in afara rezonantei. Ambele valori ale AOD sunt afectate identic de continutul de aerosoli si apa precipitata si factorul corespunzator se simplifica in raport.

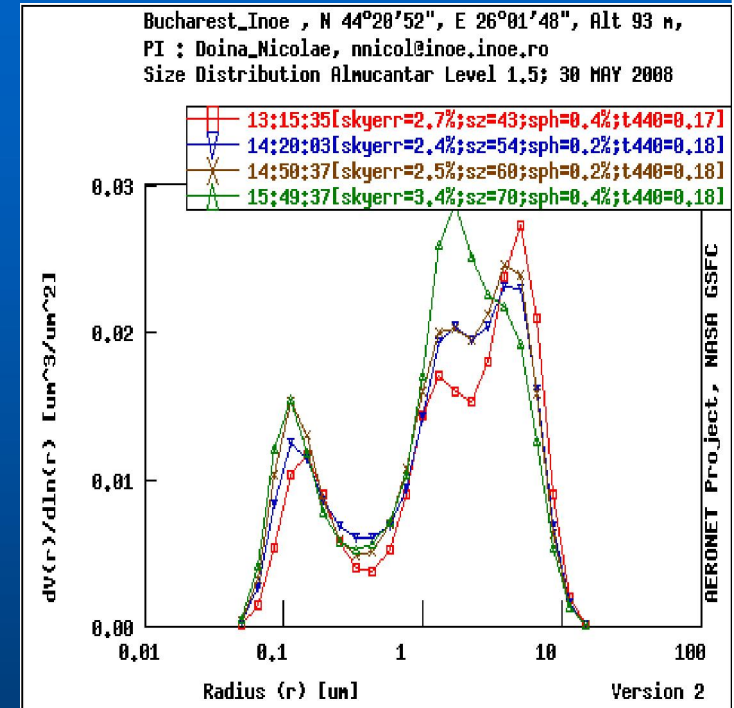
AOD la 936.1 contine insa si factorul de extinctie datorat absorbtiei rezonante, care este proportional cu concentratia de vapori de apa. Cantitatea de apa precipitabila este un alt produs AERONET.

BAZA DE DATE AERONET – GENERALITATI

Masuratorile AERONET se efectueaza si se includ in baza de date cu o rata de aproximativ 1 la 10-15 minute. La cerere, se obtin date mediate pe fiecare ora sau mediate pe fiecare zi.

Baza de date AERONET este în permanentă dezvoltare si necesită folosirea unei proceduri reproductibile si sistematice de filtrare numerică.

Datele de AOD sunt calculate pentru trei nivele de calitate: nivelul 1.0 (date ne-filtrate), nivelul 1.5 (date filtrate față de acoperirea cu nori) și nivelul 2.0 (date filtrate față de acoperirea cu nori și care îndeplinesc un set mai larg de condiții de calitate).



EXEMPLE DE UTILIZARE A BAZEI DE DATE AERONET

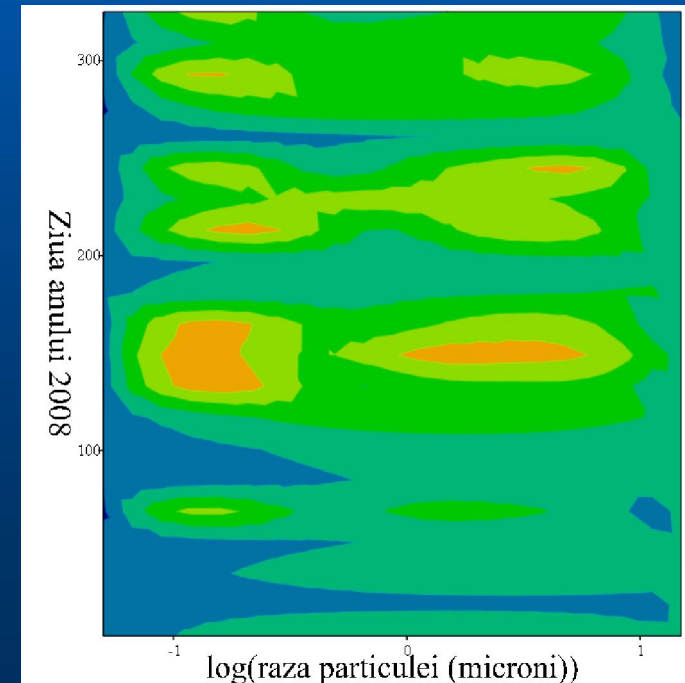
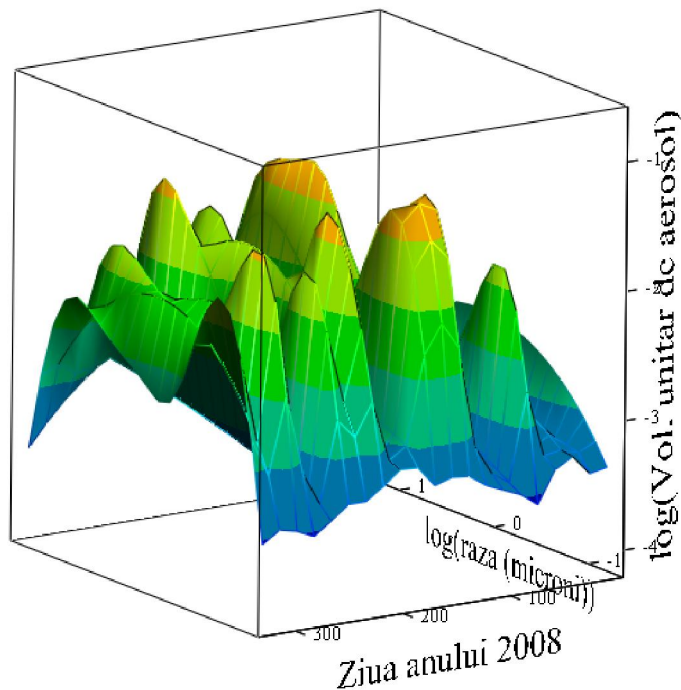
Universitatea din București este afiliată la AERONET cu instrumentul nr. 397 este proprietatea și face parte din Platforma de Geoștiințe din cadrul Centrului de Cercetare-Dezvoltare Materiale Polimere, Mezofaze și Metode Neconvenționale de Protecție a Mediului. Este un fotometru solar robotizat, de tip CE 318, cu opt canale de observare solară și celestă și un canal pentru observarea apei precipitabile.

În prezent, instrumentul se afla amplasat la Eforie Nord, dar, o perioadă a funcționat în zona București. Utilizând datele obținute de acest instrument se pot evidenția unele particularități ale aerosolului Bucureștean.

In figurile de mai jos sunt reprezentate datele de distribuție dimensională a aerosolului (medii diurne), determinate în anul 2008 (reprezentare tri-dimensională și prin linii de nivel).

Se poate observa, pe direcția paralelă cu axa zilelor, că distribuția are permanent o **forma bimodală cu ponderea relativă variabilă în timp**.

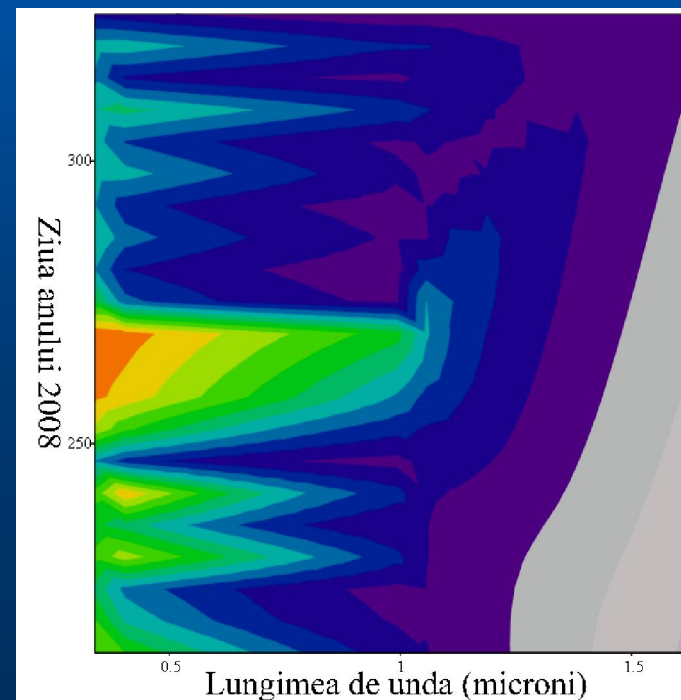
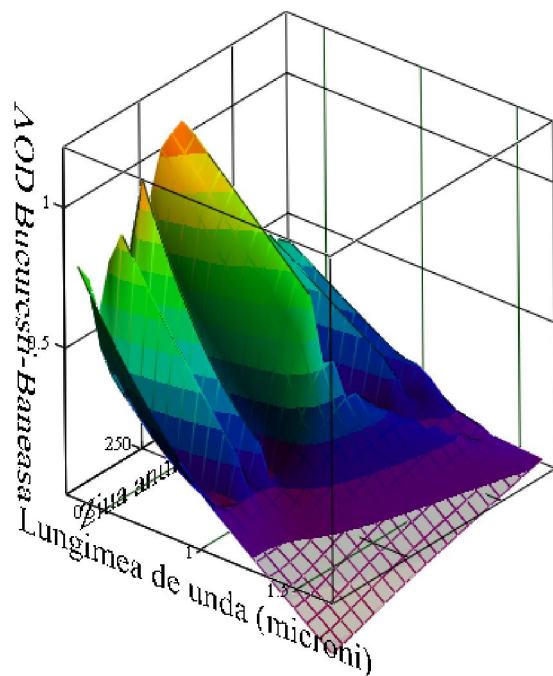
Se disting clar perioade de în care ambele moduri sunt mult amplificate, probabil din cauza unor advecții. Cu excepția acestor situații, se observă în general o ușoară dominanță a modului fin, ceea ce semnalează prezența consistentă a aerosolului antropogenic de tip urban.



In figurile de mai jos se prezintă mediile diurne ale AOD măsurate cu fotometrul solar nr. 397 în a doua jumătate a anului 2008.

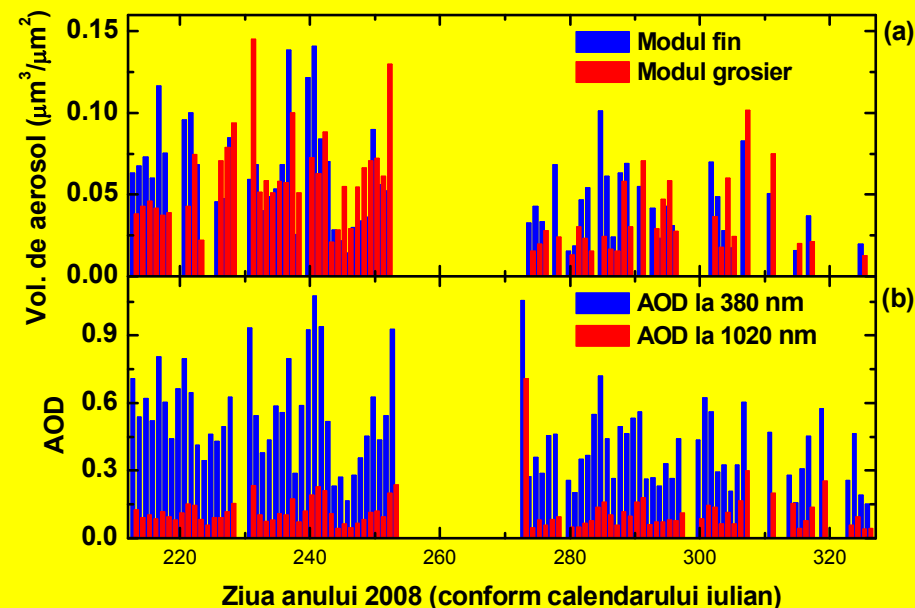
Se observă o creștere semnificativă a AOD pe aproape tot spectrul vizibil în perioada august-septembrie, ceea ce înseamnă o prezență masivă de aerosol în ambele moduri.

In general, însă, aerosolul grosier, care intensifică mai ales AOD la lungimi de undă mari, pare să fie redus față de cel fin, care determină creșteri ale AOD la lungimi de undă mici. Aceasta confirmă ipoteza existenței unor surse intense de poluare antropică în zona investigată.



O posibilitate mai sugestivă de investigare o oferă studiul comparativ al încărcării cu aerosol fin și grosier cu variația AOD aproape de cele două extremități ale spectrului: 380 nm și 1020 nm. Pentru primul canal, AOD este influențat în mod esențial de aerosolul fin, iar pentru canalul din extremitatea opusă a spectrului AOD este determinat de aerosolul grosier.

Corelațiile dintre volumul de aerosol fin și AOD la 380 nm pe de o parte și volumul de aerosol grosier AOD la 1020 nm pe de altă parte sunt foarte vizibile. De exemplu, în lunile iunie și octombrie se observă o creștere importantă a cantității de aerosol fin, față de cel grosier, ceea ce determină valori mari ale AOD la lungimi de undă mici.



METODĂ DE ESTIMARE A CONȚINUTULUI DE AEROSOL SUB-MICRONIC ÎN ATMOSFERA TERESTRĂ FOLOSIND DATE DE FOTOMETRIE SOLARĂ DIRECTĂ

Folosind expresia generală, se pot defini componente separate ale AOD pentru fiecare din cele două moduri principale de aerosol:

$$\tau_{f,c}(\lambda) = \frac{3}{4} \int_{r_m^{f,c}}^{r_M^{f,c}} Q_{ext} \left(\frac{2\pi r}{\lambda}, n - ik \right) v_{f,c}(r) \frac{1}{r} dr$$

unde $v(r)$ este distribuția volumetrică de aerosol. Prin definiție, $v(r)dr$, reprezintă volumul total al particulelor de aerosol care au razele cuprinse în intervalul $(r, r + dr)$ aflate în coloana atmosferică de arie unitate.

$$v(r) = \frac{4\pi}{3} r^3 N(r)$$

Distribuțiile separate ale modurilor de aerosol sunt considerate de formă log-normală:

$$v_{f,c}(r) = \frac{C_{f,c}}{r \sqrt{2\pi} \sigma_{f,c}} \exp \left[-\frac{\ln^2(r/R_{f,c})}{2\sigma_{f,c}^2} \right]$$

$C_{f,c}$ sunt *concentrațiile volumetrice modale* de aerosol (volumul total de aerosol din modul respectiv aflat în coloana atmosferică de arie unitate); $R_{f,c}$ sunt *razele modale*; $\sigma_{f,c}$ sunt *lărgimile modale*.

Cu ajutorul concentrațiilor volumice modale se poate defini *fracțiunea volumetrică de aerosol fin* din coloana atmosferică de arie unitate:

$$\phi = \frac{C_f}{C_v}$$

unde C_v este *concentrația volumetrică totală*

In concluzie, folosind **teoria Mie** si **aproximatia bimodala**, AOD total se poate obtine ca sumă de AOD modale in functie de fracțiunea volumetrică de aerosol fin, de concentrația volumetrică totală, de indicii de refractie complecsi si de parametrii distributiilor modale:

$$\tau_A(\lambda) = \tau_f(\lambda) + \tau_c(\lambda) = C_f \tilde{\tau}_f(\lambda) + C_c \tilde{\tau}_c(\lambda) = C_V \left[\phi \tilde{\tau}_f(\lambda) + (1 - \phi) \tilde{\tau}_c(\lambda) \right]$$

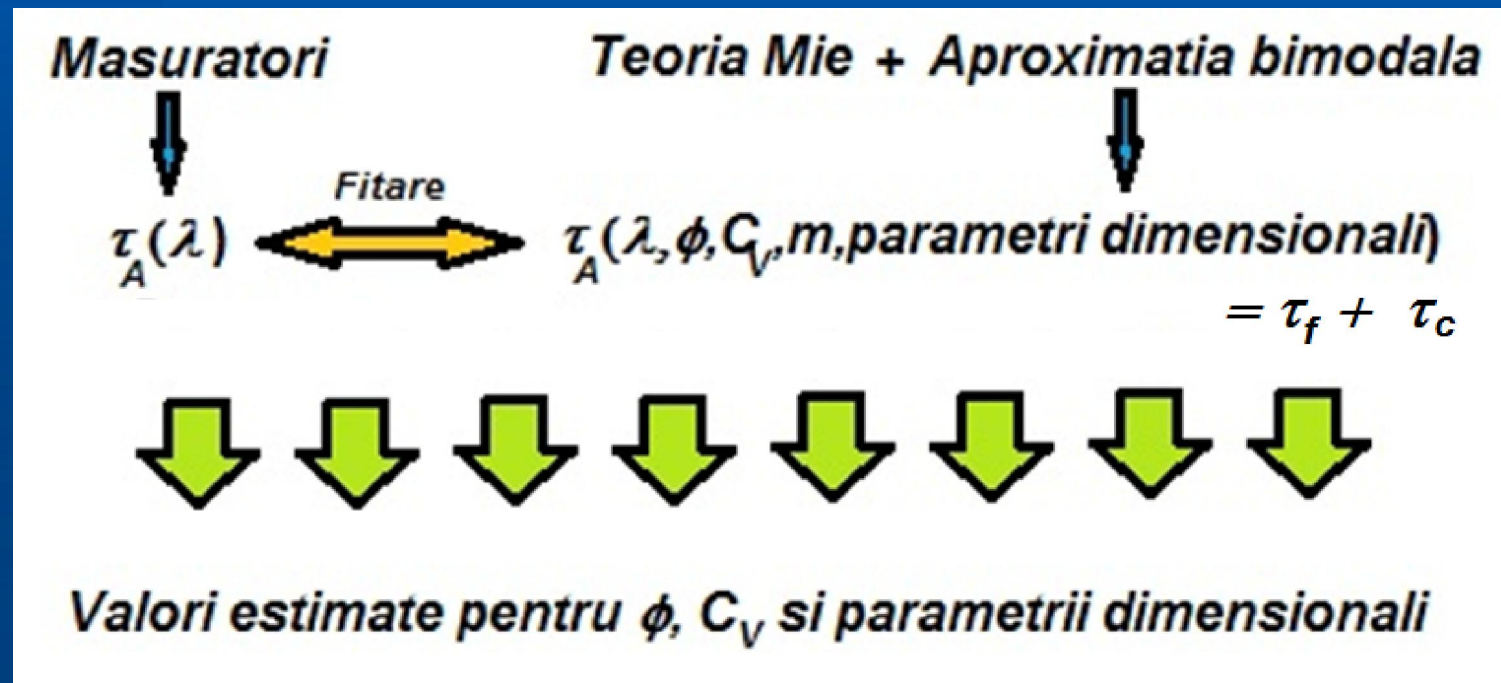
unde mărimile $\tilde{\tau}_{f,c}(\lambda) = \frac{\tau_{f,c}(\lambda)}{C_{f,c}}$ sunt AOD modale reduse.

Principiul metodei este rezumat in schema alaturata:

Spectrele de AOD masurate se compara cu diagramele teoretice corespunzatoare;

Ajustand convenabil parametrii de model se obtine un fit optim al curbelor teoretice pe cele experimentale.

Valorile parametrilor de model care corespund celui mai bun fit sunt considerate a fi cele reale

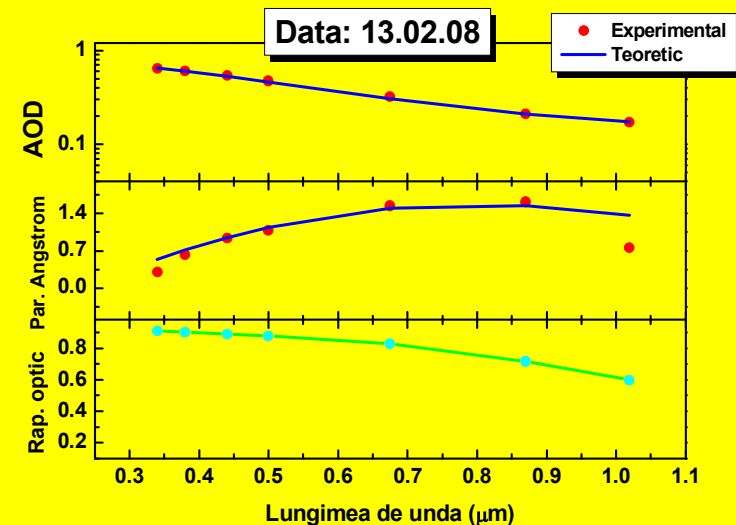
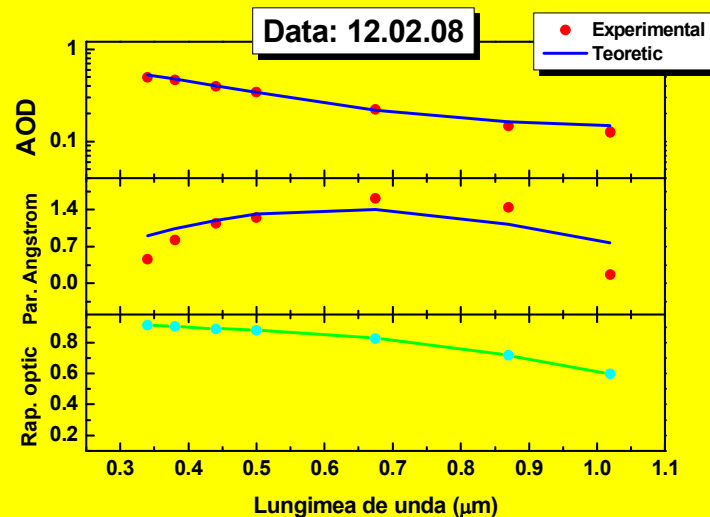


➤ Procedura propusa permite deci extractia parametrilor dimensionali si de compozitie ai aerosolului atmosferic din date de fotometrie solara directa.

➤ Ea se constituie ca alternativa la procedurile standard ale AERONET care se bazeaza pe algoritmul de inversiune aplicat datelor de fotometrie celesta.

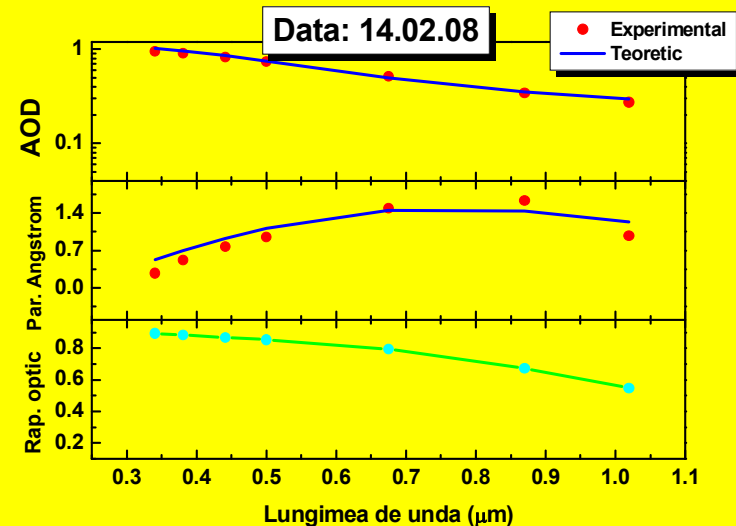
EXEMPLIFICAREA METODEI PROPUSE

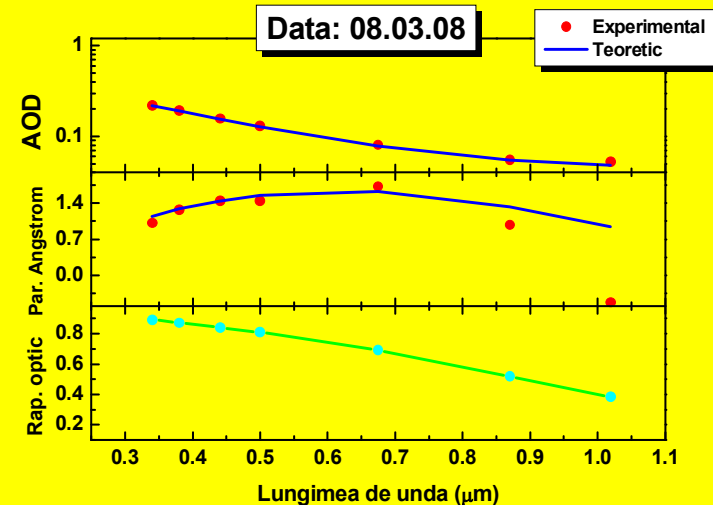
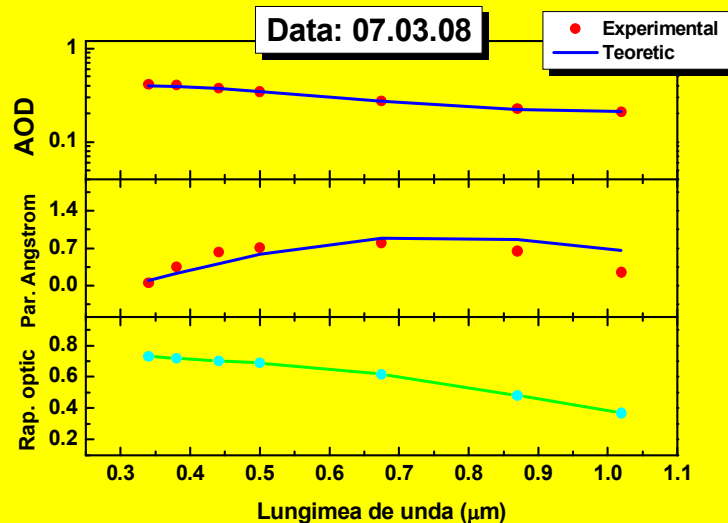
Au fost selectate doua seturi de cate trei zile din lunile februarie si martie ale anului 2008. Curbele teoretice sunt desenate cu linii continue, iar datele experimentale sunt reprezentate prin puncte.



In prima serie de determinări se observă curbele de AOD relativ plate cu valori absolute relativ mari și în ordine crescătoare de la o zi la alta.

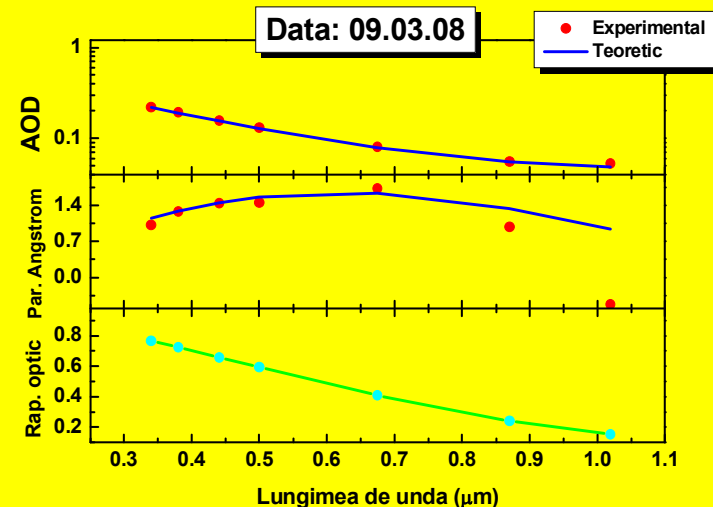
Având în vedere valorile relativ mici ale fracțiunii volumice de aerosol fin ($\phi=0,28$; $0,43$ și $0,38$) și valorile crescătoare ale conținutului total de aerosol ($C_V=0,08 \mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$; $0,13 \mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$ și $0,23 \mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2$), acest fapt se datorează unei advecții de aerosol grosier (posibil praf) în zona respectivă.





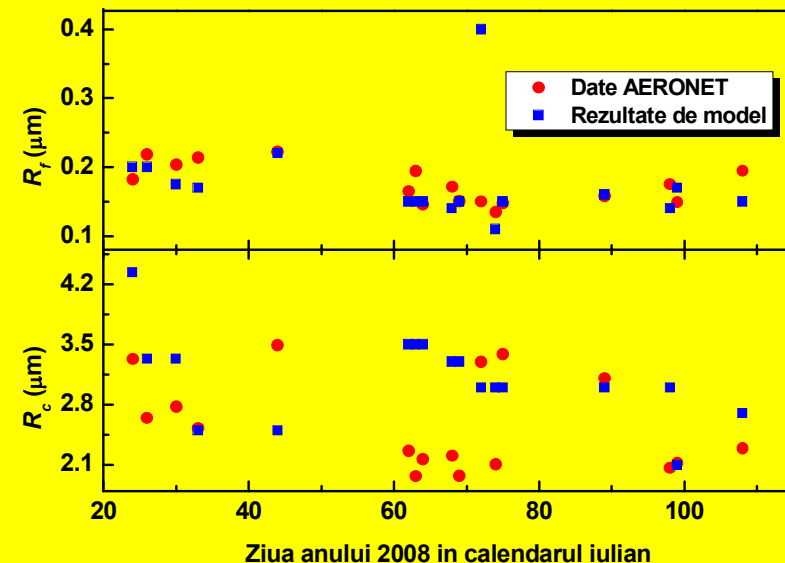
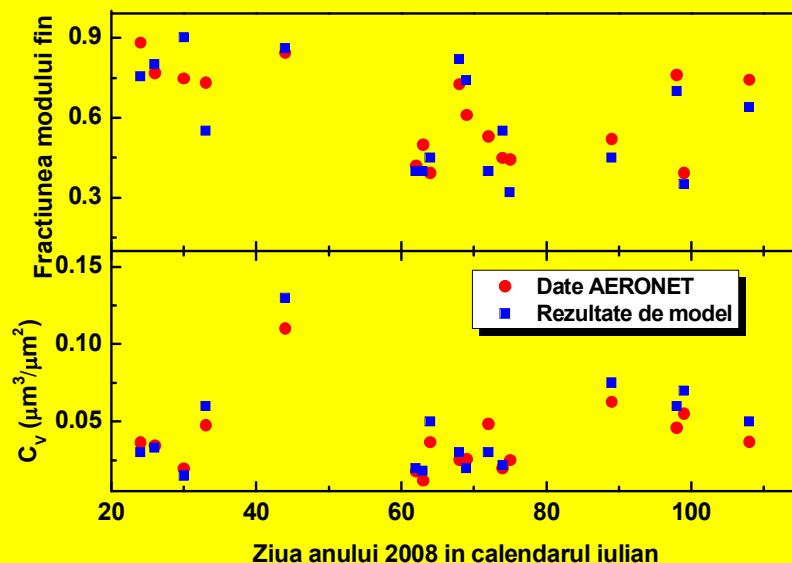
O situație oarecum opusă se poate observa pentru trei zile consecutive din prima decadă a lunii martie.

Valorile AOD sunt mult diminuate și descrescătoare de la o zi la alta. De asemenea, panta spectrală a AOD este din ce în ce mai mare. Acest fapt sugerează o advecție de aer curat în atmosfera monitorizată, fapt susținut și de valorile relativ scăzute ale conținutului total de aerosol ($C_V = 0,13 \mu\text{m}^3 / \mu\text{m}^2$; $0,025 \mu\text{m}^3 / \mu\text{m}^2$ și $0,025 \mu\text{m}^3 / \mu\text{m}^2$).



VALIDAREA METODEI PRIN COMPARATIE CU PRODUSE AERONET

Valorile celor patru parametri de fit (pătrate albastre) și corespondentele lor furnizate de AERONET (puncte roșii) sunt prezentate în figurile alaturate.



Exceptând raza modală grosieră care influențează mai puțin fitul, valorile obținute prin modelul propus sunt apropiate de cele oferite de AERONET.

Acest fapt întărește încrederea că modelul propus este o alternativă consistentă pentru determinarea unor parametri de distribuție ai aerosolului.

