

ELEMENTE DE FOTOMETRIE SOLARA

Prof. Dr. Valeria FILIP

Universitatea din Bucuresti,
Facultatea de Fizica

MARIMI FOTOMETRICE

Iluminarea (E_v) este fluxul luminos total care cade pe unitatea de arie a unei suprafete. Se masoara in lux: $1 \text{ lux} = 1 \text{ lm/m}^2$.

Fluxul luminos (masurat in lumeni – lm; $1 \text{ lm} = 1 \text{ cd} \cdot 1 \text{ sr}$.) este definit de relatia:

$$F = 683.002 \text{ lm/W} \cdot \int_0^{\infty} \bar{y}(\lambda) J(\lambda) d\lambda$$

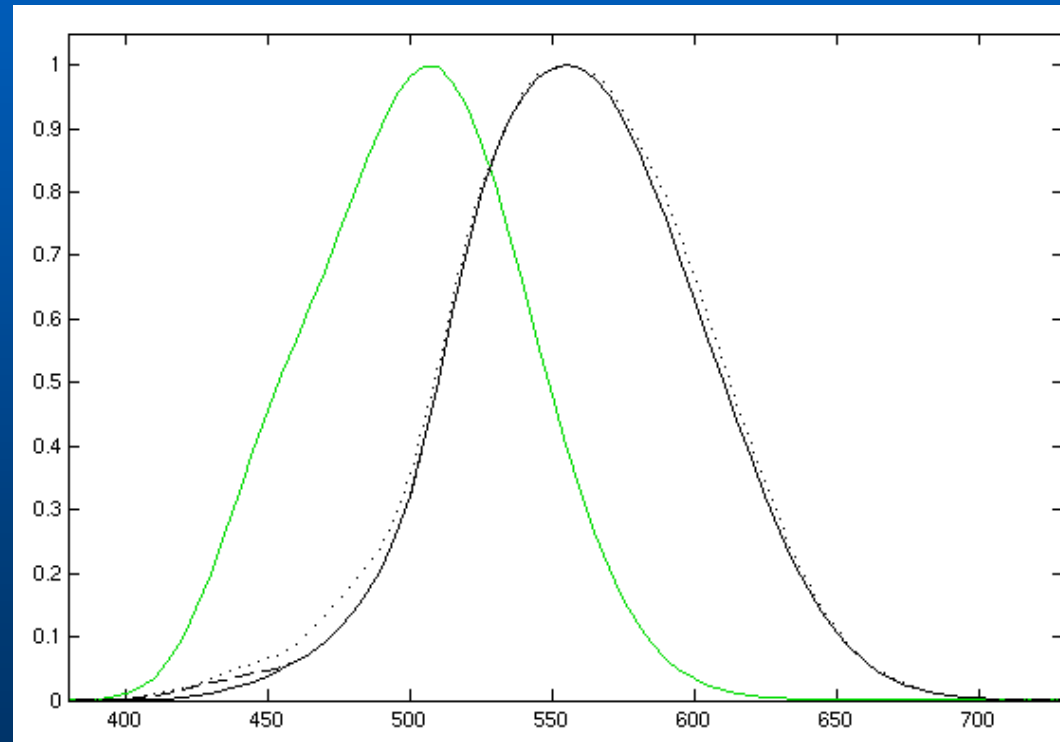
unde $J(\lambda)$ este *densitatea spectrala de putere a radiatiei*, iar $y(\lambda)$, notat uneori si cu $V(\lambda)$, este *functia standard de luminozitate*.

Iradieria (E) este puterea radiatiei electromagnetice care cade pe o suprafata, pe unitatea de arie. Se masoara in W/m^2 .

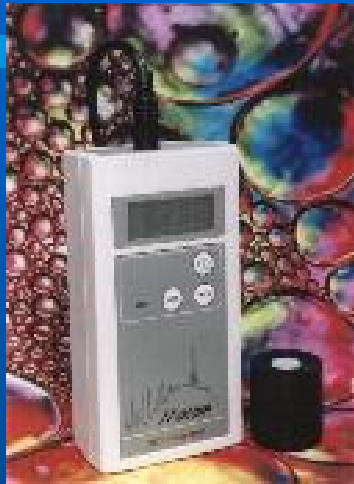
FUNCTIA STANDARD DE LUMINOZITATE

Este ponderea standard, in fluxul luminos, a sensibilitatii ochiului omenesc.

Are un maxim egal cu unitatea la lungimea de unda de 555 nm.



FOTOMETRE (1)



Fotometrul
L201 produs
de compania
Macam



Fotometru de
flux luminos

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

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

-Intensitatea luminii imprastiate

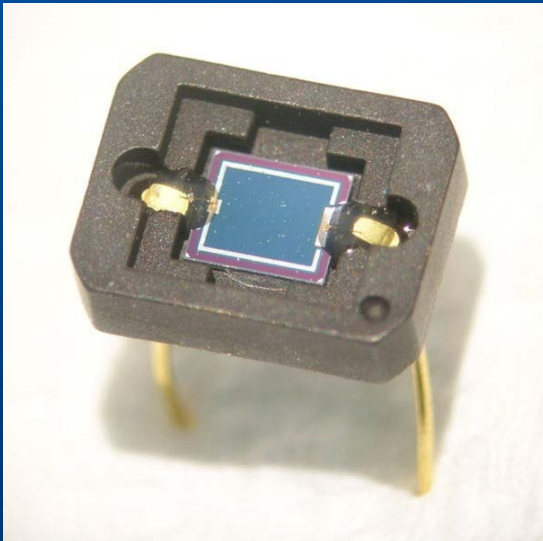
-Intensitatea luminii absorbite

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

FOTOMETRE (2)

In principiu, un fotometru este compus dintr-un *senzor*, care isi modifica anumite proprietati electrice sub actiunea iluminarii, plasat intr-un circuit electronic corespunzator pentru detectarea modificarilor respective.

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

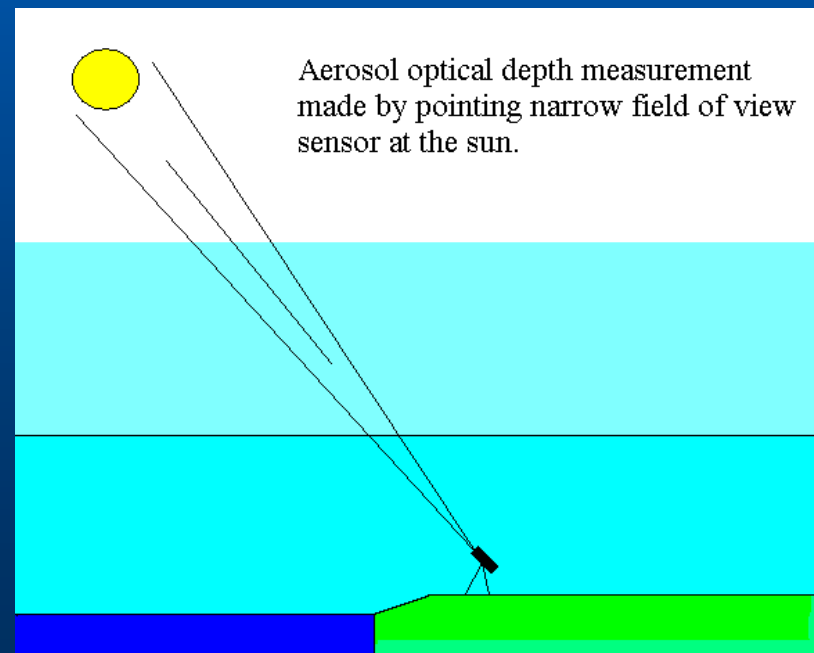


FOTOMETRU SOLAR

In esenta, un fotometru solar (*sun-photometer*) consta dintr-un senzor cu camp vizual ingust, indreptat catre Soare. Fotometrele solare moderne contin, pe langa fotodetector si sistemul optic corespunzator, un dispozitiv de *filtrare spectrala*, o unitate de *urmarire automata a Soarelui* si un *sistem de achizitie a datelor*.



Fotometrul solar CE 318, produs de compania
CIMEL



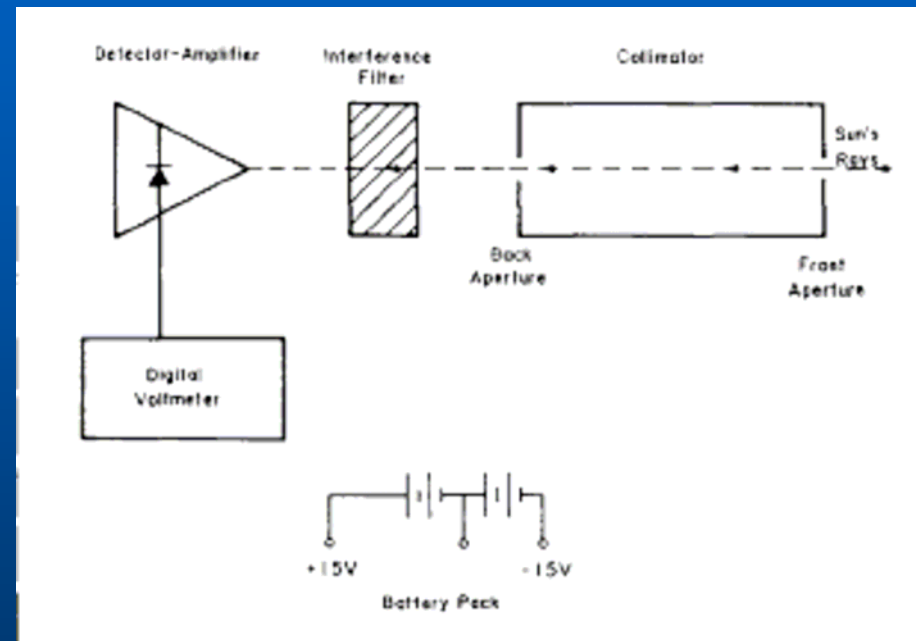
FOTOMETRU SOLAR - SCHEMA DE PRINCIPIU

Colimator (fara lentile)

Filtru interferential

Detector/amplificator optic

Sistem de inregistrare si achizitie
a datelor



RADIANTA SOLARA

Cantitatea masurata cu fotometrul solar este *radianta solara directa*.

Radianta este cantitatea de lumina (putere luminoasa) *difuză* care cade pe o suprafata sau este emisa de o suprafata in unitatea de unghi solid si sub o directie specificata ($\text{W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$):

$$L = \frac{d^2\Phi}{dA d\Omega \cos \theta} \simeq \frac{\Phi}{\Omega A \cos \theta}$$

unde:

Φ este fluxul radiant, sau puterea luminoasa (W); A este aria sursei (m^2); Ω este unghiul solid (sr); θ este unghiul dintre directia specificata si normala la suprafata.

Aproximatia este valabila pentru valori mici ale ariei si unghiului solid.

Corespondentul radiantei pentru ochiul omenesc este *iluminanta*.

RADIANTA SPECTRALA

Radianța caracterizează emisia sau reflexia totală, pentru tot spectrul disponibil.

Radianța spectrală este radianța pe unitatea de frecvență (L_ν) sau pe unitatea de lungime de undă (L_λ). Unitățile de măsură sunt $W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2} \cdot Hz^{-1}$ sau $W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-3}$; mai obișnuită este unitatea $W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1}$. Radianța este deci suma (integrala) radianțelor spectrale emise pe toate lungimile de undă disponibile. Radianța caracterizează emisia sau reflexia totală, în timp ce radianța spectrală caracterizează din acest punct de vedere numai o anumită lungime de undă sau frecvență.

Radianța este utilă întrucât indică fracțiunea din puterea luminoasă emisă sau reflectată de o suprafață care va fi recepționată de un sistem optic ce vizează suprafața sub un anumit unghi. În acest caz, unghiul solid avut în vedere este cel subînțins de apertura optică a sistemului.

EFECTUL ATMOSFERIC

Atunci cand un fotometru solar este plasat intr-un anumit loc in atmosfera terestra radianta masurata nu este egala cu radianta emisa de Soare (adica radianta solara extraterestra), intrucat fluxul solar este redus prin absorbtie si imprastiere. Prin urmare, fluxul radiant masurat este datorat unei combinatii intre ceea ce emis de Soare si *efectul atmosferei*. Legatura dintre aceste efecte este continuta in legea Lambert-Beer:

$$L = L_0 e^{-m\tau}$$

$$\tau = \varepsilon l C$$

(adancime de
patrundere optica)

unde ε este coeficientul de extinctie, C este concentratia centrilor de absorbtie sau imprastiere in mediu, iar l este lungimea parcursului geometric al luminii.

m este un factor geometric ce caracterizeaza inclinarea drumului razelor de lumina prin atmosfera (*airmass factor*, *masse relative de l'air*):

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

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 radiantei 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:

$$\ln\left(\frac{L}{L_0}\right) = -m\tau$$

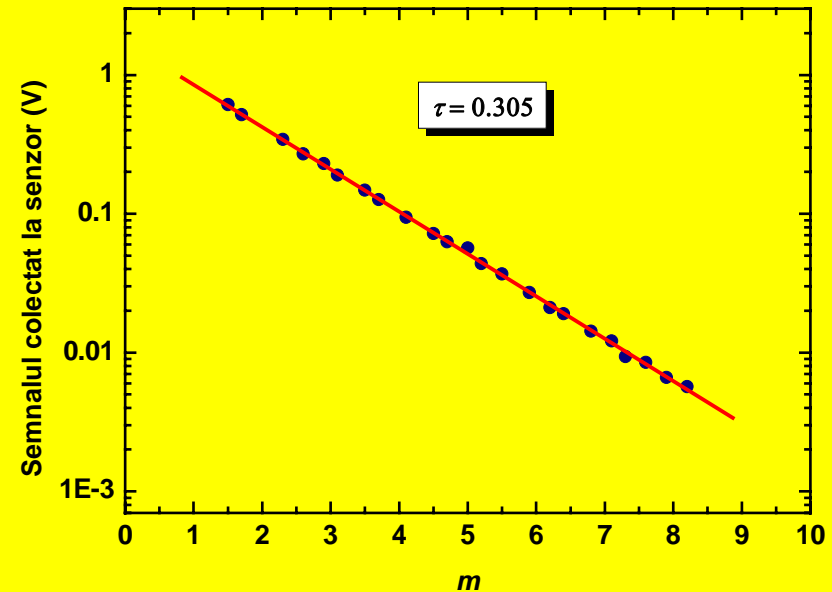
Masurand L pentru mai multe valori ale lui m si reprezentand graficul $\ln(L)$ ca functie de m , se poate calcula L_0 din extrapolarea dreptei obtinute prin interpolare liniara, la intersectia acesteia cu ordonata. Adancimea de patrundere optica τ rezulta apoi imediat din panta dreptei amintite.

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.



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_g), numita si contributia dispersiei moleculare.

DETERMINAREA PRACTICA A AOD (2)

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

$$\ln \left(\frac{V - V_{dark}}{V_0} \right) = -m (\tau_A + \tau_g)$$

unde V_0 este constanta de etalonare a aparatului (obtinuta prin extrapolare Langley), iar cu τ_A am notat AOD. Constanta V_0 mai trebuie corectata practic si cu patratul raportului dintre valoarea actuala si cea medie a distantei Pamant-Soare.

Din relatia de mai sus se poate extrage imediat valoarea AOD prin doua metode:

1. din panta graficului $V(m)$ trasat in scara logaritmica (sunt necesare conditii de stabilitate atmosferica pe timpul determinarilor);
2. direct din relatia de mai sus, pentru o valoare punctuala a lui m :

$$\tau_A = \tau_g - \frac{1}{m} \ln \left(\frac{V - V_{dark}}{V_0} \right)$$

DEPENDENTA DE LUNGIMEA DE UNDA A AOD

Adancimea de patrundere optica moleculara, τ_g , se determina separat. Ca si τ_A , este o marime dependenta de lungimea de unda a radiatiei investigate. De exemplu, pentru lumina rosie, $\tau_g = 0.05793$, iar pentru lumina verde, $\tau_g = 0.13813$.

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.

EXPONENTUL ÅNGSTRÖM

Pentru aerosoli se poate considera aproximativ ca AOD pentru o anumita radiatie variaza invers proportional cu o anumita putere a lungimii de unda a radiatiei:

unde λ_0 este o lungime de unda de referinta, iar α este un parametru aproximativ independent de λ numit *exponent Ångström*.

$$\frac{\tau_A(\lambda)}{\tau_A(\lambda_0)} = \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} \right)^{-\alpha}$$

Daca se masoara AOD la cel puțin doua lungimi de unda diferite, λ_1 si λ_2 , exponentul Ångström se poate calcula dupa relatia:

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

PARAMETRUL ÅNGSTRÖM

Intr-o abordare riguroasa, exponentului Ångström este functie de lungimea de unda a radiatiei. Aceasta marime se poate defini prin expresia urmatoare [N. T. O'Neill, O. Dubovik, and T. F. Eck, Applied Optics 40(15), 2368 (2001)]:

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

Sub aceasta forma, α este cunoscut sub numele de *parametru Ångström*.

Determinarea parametrului Ångström se face deci prin masurarea AOD la diferite lungimi de unda (canale), prin interpolarea si derivarea curbelor corespunzatoare.

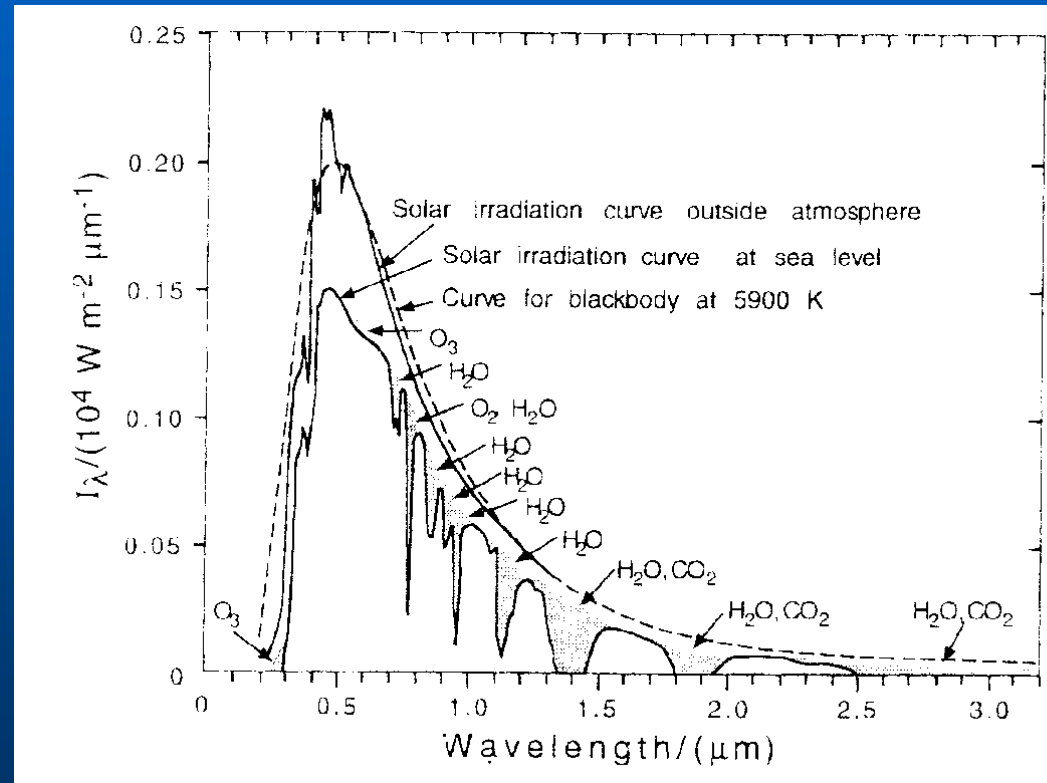
Limitare practica importanta: pentru un instrument dat, numarul de canale nu poate fi prea mare (fotometre solare cu opt canale de masura sunt in momentul de fata printre cele mai avansate).

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 radianta 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.

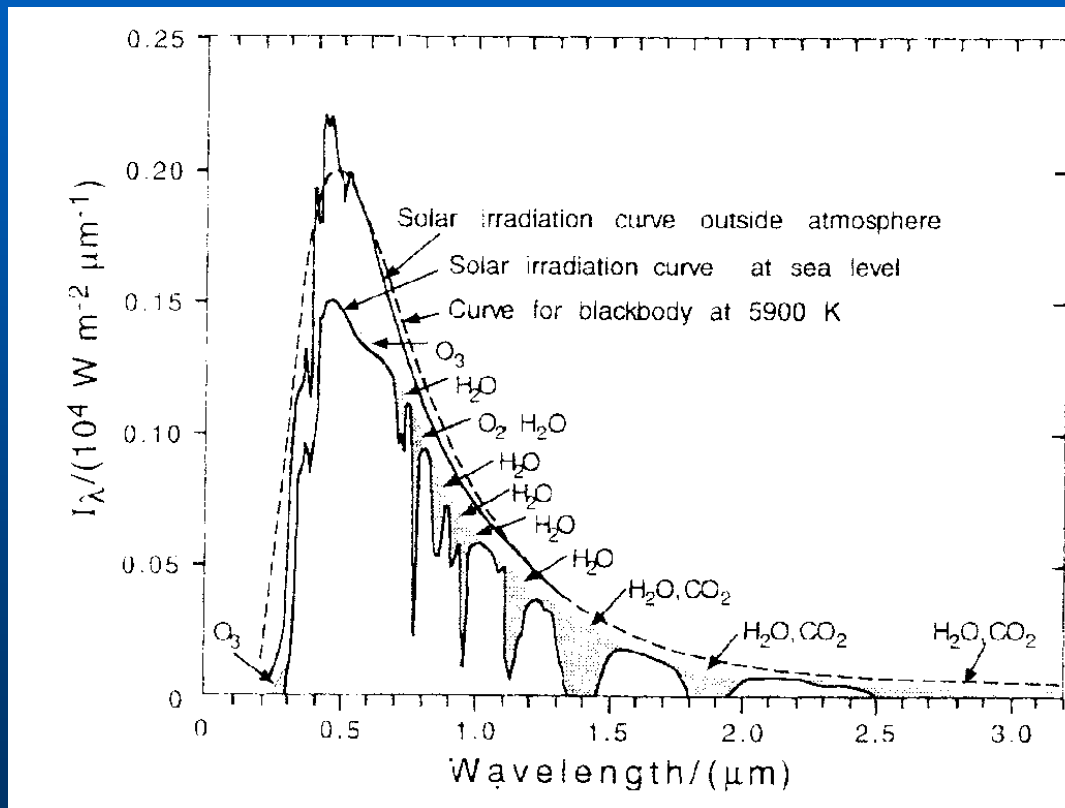
POZITIA CANALELOR DE MASURA

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 ne semnificative. 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*.

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.

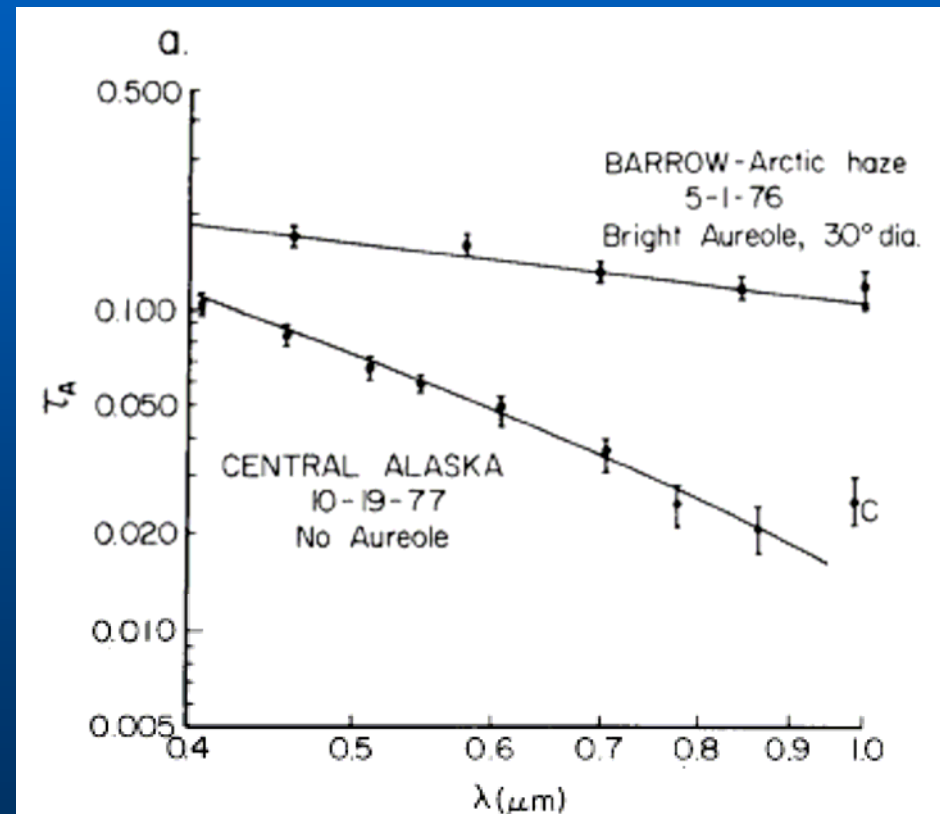
EXEMPLE DE SPECTRE DE EXTINCTIE PRODUSA DE AEROSOL (1)

Diagrama de sus arata un episod de ceata arctica masurat in Alaska in 1981.

Masuratorile chimice indicau un transport interns 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.



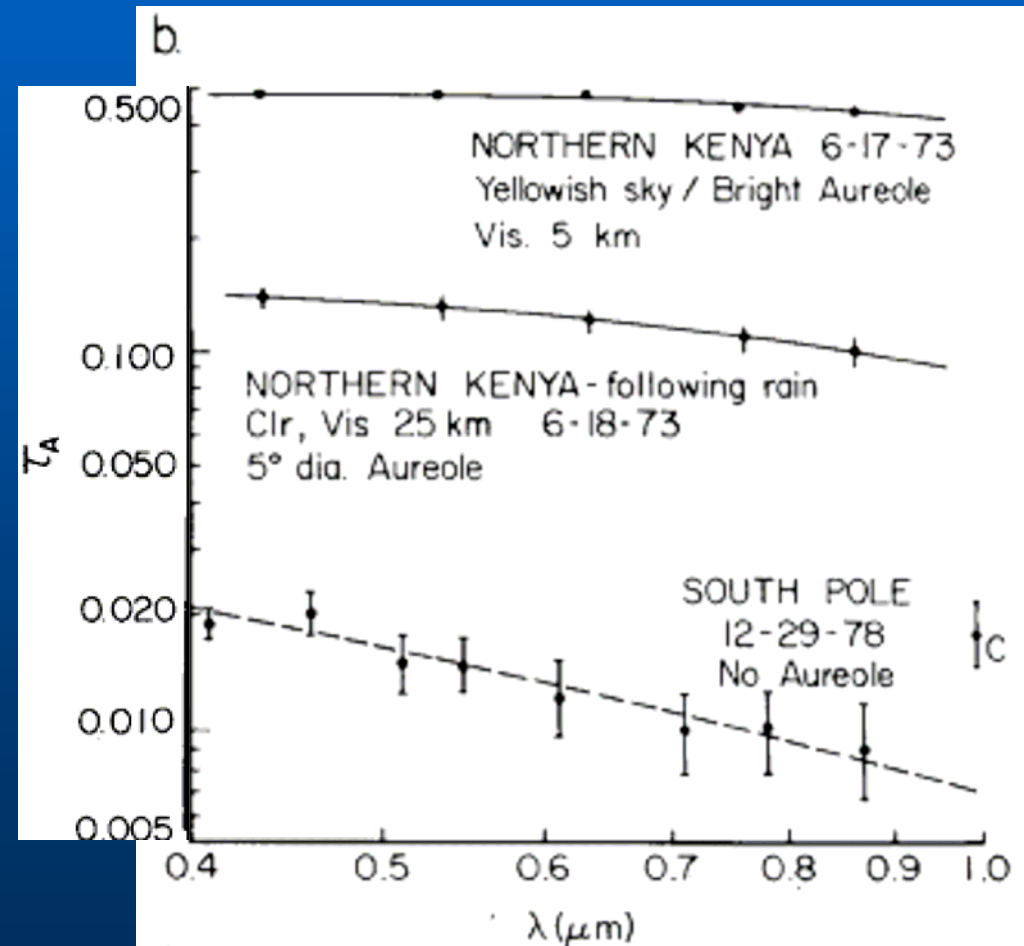
EXEMPLE DE SPECTRE DE EXTINCTIE PRODUSA DE AEROSOL (2)

Nordul Keniei, pe malul sudic al lacului Turkana, o zona prafoasa plasata la marginea desertului Sahill, in 1979.

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).



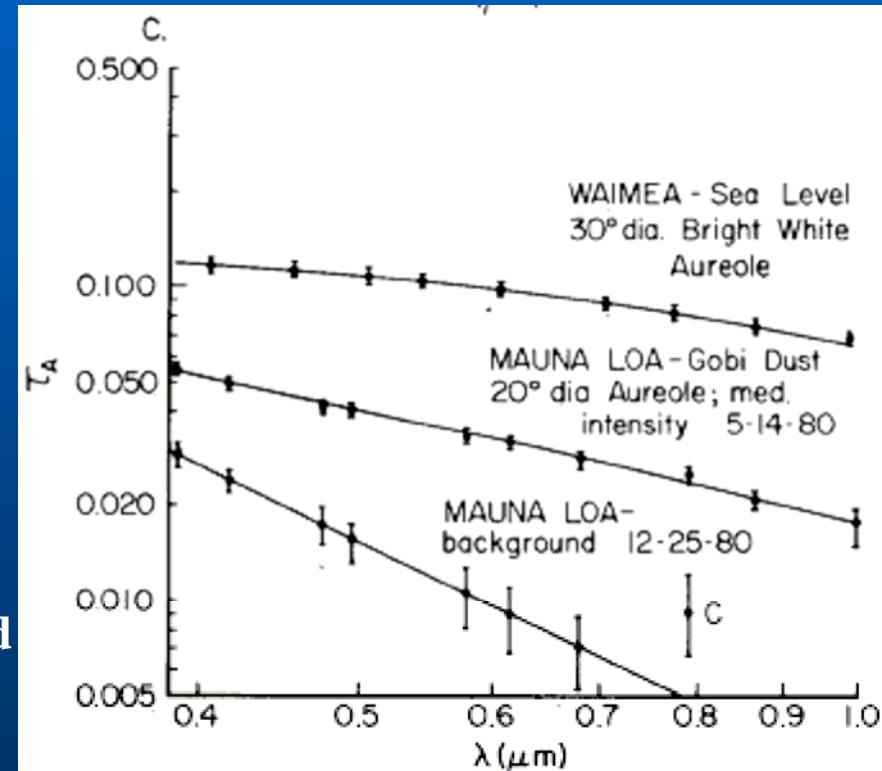
EXEMPLE DE SPECTRE DE EXTINCTIE PRODUSA DE AEROSOL (3)

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}).

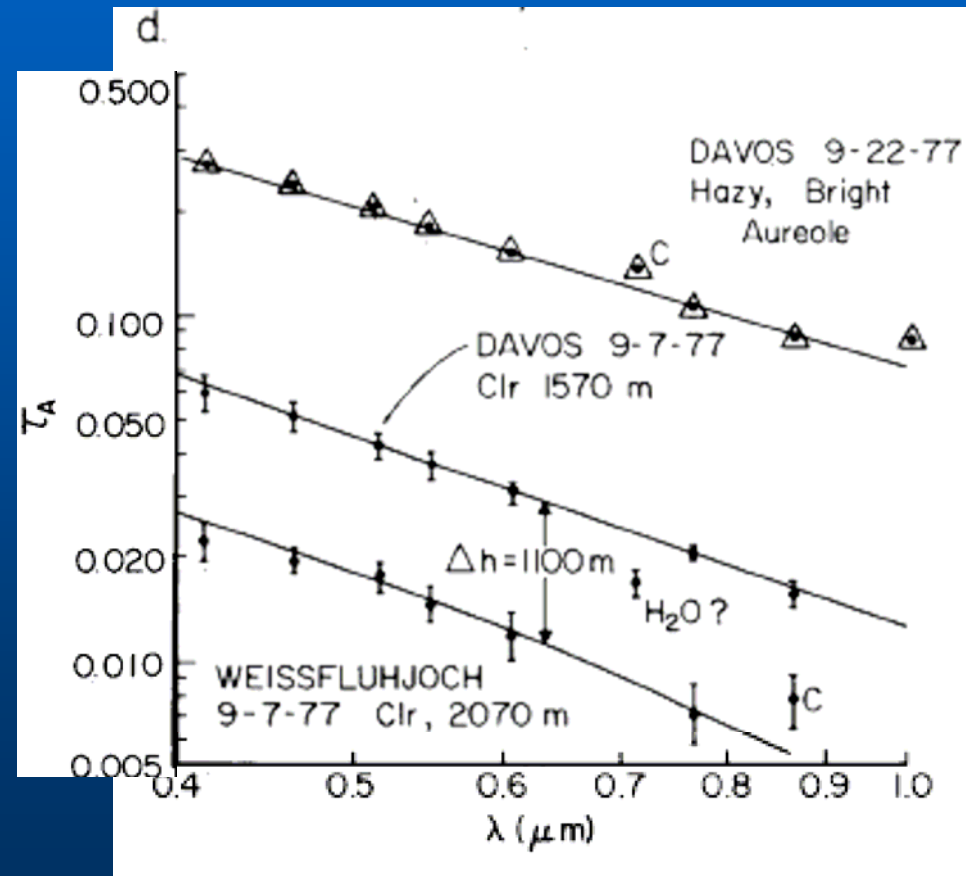


EXEMPLE DE SPECTRE DE EXTINCTIE PRODUSA DE AEROSOL (4)

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 cenușiu-murdar. In acest exemplu se observa amprenta tipică a aerosolului industrial relativ proaspăt (10^4 s), care, după panta abruptă a curbei de extinctie, conține o concentrație mare de particule in domeniul $r < 0.1 \mu\text{m}$.



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 temporală: 30 s

Largime de bandă: 2 – 10 nm

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



Numar de canale 16 (305 – 1024 nm)

Resolutie temporala: 2 min

Largime de banda: 2 – 10 nm

Radiometru cu filtre de precizie