الليدار واستخداماته في الكشف عن بعض الملوثات الغازية
(دراسة مرجعية)

عصام فواز الجغامي

قسم الفيزياء ـ كلية العلوم ـ جامعة دمشق

تاريخ الإيداع 2003/05/24
قبل للنشر في 2003/09/27

الملخص

تهدف هذه الدراسة المرجعية إلى التعريف بتقانة الليدار وتطبيقاتها في استشعار مركبات الغلاف الجوي عن بعد. وتبين كيف يساعد الليدار في رسم خرائط ثلاثية البعد، لتوزع الملوثات، تمتد إلى مسافة عدة كيلومترات. أما حدود الكشف عن الملوثات فتبلغ قيماً من مرتبة ppb، مما يعطي طريقة الليدار تفوقها، من ناحية الدقة والحساسية، على جميع طرائق الكشف الكيميائية والفيزيائية على اختلاف أنواعها.

يتعرض هذا العمل لدراسة الملوثات NO , NO_2 , SO_2 , O_3 , HCl , C_2H_4 والبنزن، والتولوين، إضافة إلى الزئبق الذري. كما يبين أطوال أمواج الامتصاص، والمقاطع الفعالة التفاضلية لهذه الملوثات. ويتعرض إلى جانب ذلك إلى معالجة المتطلبات التقانية والتصاميم المختلفة لليدار.

من ناحية أخرى، تعطي هذه الدراسة مواصفات المنابع الليزرية المتعددة المستخدمة في مجموعات الليدار، مثل ليزر Nd:YAG، و Dye – ليزر، وغيرها. وكذلك طاقة النبضة وأمدها الزمني ومعدل تكرارها والبلورات اللاخطية المستخدمة لمضاعفة التواتر والحصول على خطوط ليزرية في مجالات طيفية مختلفة، مما يسمح بتوسيع مجال عمل الليدار.

الكلمات المفتاحية: الليدار، مطيافية ليزر الليدار، استشعار ملوثات الغلاف الجوي عن بعد، الملوثات الغازية.

Lidar Techniques and Applications in Detection of some Gaseous Pollutants (Review)

AL Jghami Issam Fawaz

Department of Physics - Faculty of Sciences - Damascus University

Received 24/05/2003 Accepted 27/09/2003

ABSTRACT

This review aims to show the techniques of lidar in atmospheric remote sensing, which can be utilized to draw three-dimensional maps of pollutants distribution over path lengths of the order of few kilometers. The detection limits achieve values of the order of ppb. This sensitivity and accuracy gives this method its superiority over all other physical and chemical methods of detection.

Some details of this method are given for the following pollutants: NO, NO_2, SO_2, O_3, HCl, C_2H_4, benzene and toluene, as well as atomic mercury. This work shows, for these pollutants, absorption wavelengths, differential cross sections and detection limits. In addition to dealing with the technical requirements and different designs of Lidar.

On the other hand, this review study handles the characteristics of many laser sources used in lidar systems such as, Nd:YAG- laser, Dye- laser and others. Especially it concentrates on pulse energy, time duration, repetition rate and nonlinear crystals, used for frequency doubling, which broaden the working region of the lidar.

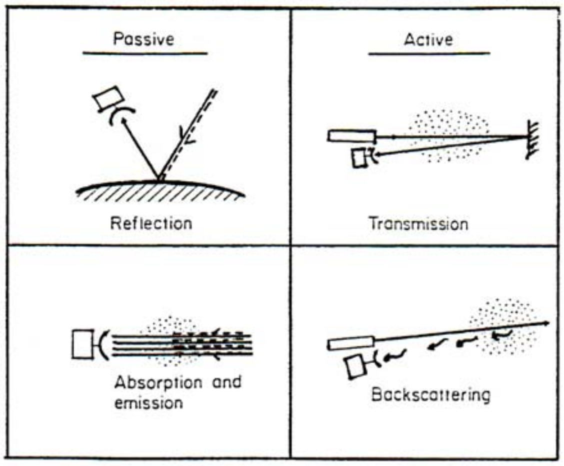
Key words: Lidar, Laser Lidar Spectroscopy, Atmospheric Pollutants Remote Sensing, Gaseous Pollutants.

المقـدمـة

تتطلب عملية الكشف عن الملوثات الغازية في الغلاف الجوي استخدام تقانات متطورة جداً نظراً لصغر تركيز هذه الملوثات الذي يصل إلى قيم من مرتبة *ppb* ,(10^{-9})، أو حتى *ppt* ,(10^{-12}). إن الحاجة لمثل هذه التقانات أصبحت ضرورةً ملحة، خاصةً بعـد ارتفـاع سويات التلوث البيئي. لقد امتدت الآثار السلبية للتلوث، ليس فقط على الغـلاف الجـوي، حيث ظهرت ثقوب الأوزون وارتفعت درجة حرارة الكرة الأرضية، بل وامتدت عمومـاً إلى التربة والمياه والغطاء الحيوي للكرة الأرضية.

تعد الطريقة الطيفية، التي تقوم على أساس امتصاص الغازات النوعي للضوء إحدى أهم طرائق الكشف، نظراً لحساسيتها وانتقائيتها العاليتين من جهة، ومن جهة أخرى ملاءمتها لطرائق الاستشعار عن بعد، التي تعطي بدورها معلومات هامة عن توزع الملوثات الغازية في مناطق واسعة من الغلاف الجوي.

يقسم الاستشعار الطيفي الضوئي عن بعد إلى نمطين، نمطٍ منفعل (Passive mode) يعتمد على منابع الإشعاع الطبيعية، كالشمس، أو السماء الزرقاء، ونمطٍ فاعل (Active mode) يعتمد على المنابع الطيفية الصنعية، كالمصابيح أو أشعة الليزر، كما يوضح ذلك الشكل –1 [1]. إن عملية المراقبة باستخدام النمط الفاعل، يمكن أن تعتمد على الامتصاص (Absorption)، حيث تكون المنابع الضوئية فيها مستمرة، أما النتيجة المسجلة، فهي الامتصاص الوسطي على طول المسار في الغلاف الجوي. أو تعتمد على كشف الضوء المتبعثر الراجع (Backscattering) الذي يعد أساس تقانة الليدار LIDAR (Light Detection and Ranging) [2].



الشكل (1) أنماط الاستشعار الضوئي البيئي عن بعد [1]

التمهيد النظري

مطيافية الامتصاص الضوئي التفاضلي

(DOAS)(Differential Optical Absorption Spectroscopy)

تُعد دراسة الامتصاص المباشر، في الغلاف الجوي، أكثر العمليـات الطيفيـة تعقيـداً بسبب تعدد العوامل المساهمة في توهين الحزم الضوئية المألوفة والليزرية، على السواء. ويمكن إيجاز هذه العوامل بما يأتي:

- تبعثر رايلي (Rayleigh) على الجزيئات والذرات المكونة للغلاف الجوي، حيث يمكن التعبير عن ذلك باستخدام معامل إخماد رايلي $\varepsilon_R(\lambda), cm^{-1}$ المعطى بالعلاقـة الآتية [3]:

$$\varepsilon_R(\lambda)=\sigma_R(\lambda).N_t=\frac{8\pi^3\left(n^2-1\right)^2}{3N_0^2}\lambda^{-4}.N_t=\sigma_{RO}.\lambda^{-4}.N_t$$

حيث:

$\sigma_R(\lambda), cm^2.molecule^{-1}$ المقطع الفعال لتبعثر رايلي،

N_t , $molecules.cm^{-3}$: عدد جزيئات الهواء عند درجة الحرارة،

t، n،: قرينة انكسار الهواء وتساوي 1.00031،

$N_0 = 2.688 \times 10^{25}$ $molecules.\ m^{-3}$: عدد جزيئات الهواء في وحـدة الحجـم فـي الشرطين النظاميين، λ, nm: طول الموجة،

عندها قيمة الثابت تساوي $\sigma_{RO}=4.4\times10^{-16}\,cm^2\,nm^4$،

وعدد جزيئات الهواء $N_t = 2.4 \times 10^{19}$ $molecules.\ cm^{-3}$ عند درجة حرارة تـساوي $20\ C^o$ وضغط $1\ atm$.

- تبعثر مي (Mie) على الجسيمات الصغيرة(الإيروسول) ويعبر عنه بشكل مماثـل بمعامل إخماد مي الآتي:

$$\varepsilon_M(\lambda)=\varepsilon_{MO}(\lambda).\lambda^{-n}$$

حيث تأخذ n القيم من 1 إلى4. تجدر الإشارة إلى أن المساهمة الناجمة عن تبعثر مي أكبر بكثير من تلك الناجمة عن تبعثر رايلي في مجال الأشعة المرئية وتحـت الحمـراء، وعلى عكس ذلك في مجال الأشعة فوق البنفسجية [1].

- امتصاص الجزيئات الأخرى الموجودة في الغلاف الجوي، إضافة إلى تبعثر مـي ورايلي، يسهم في إضعاف شدة الحزمة الضوئية الكلية.

بناء على ما تقدم، يمكن التعبير عن المساهمات جميعاً، باستخدام قانون بيير ـ لامبرت (Beer- Lambert) الذي يعطى، في هذه الحالة، كما يأتي:

$$\mathrm{I}(\lambda)=\mathrm{I}_o(\lambda)\exp\left[-L\left(\sum\sigma_i(\lambda)c_i+\varepsilon_R(\lambda)+\varepsilon_M(\lambda)\ \right)\right]$$

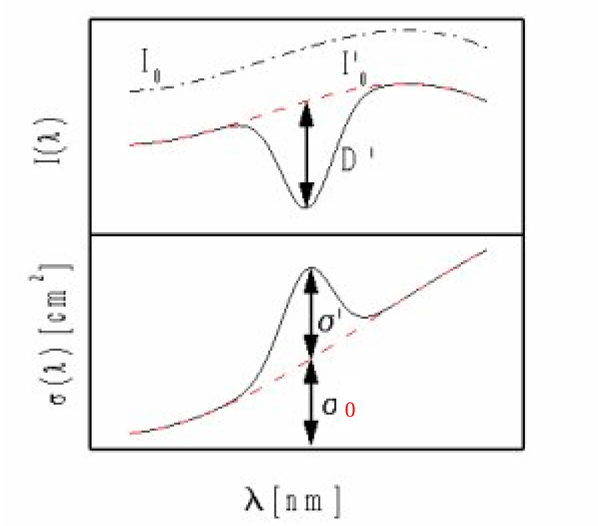
حيث $\mathrm{I}_o(\lambda)$: الشدة الابتدائية للمنبع و$\mathrm{I}(\lambda)$: شدة الضوء التي يسجلها الكاشـف بعـد عبوره طبقة من الغلاف الجوي سمكها L (L: طول المسار الـضوئي) وσ_i: المقطـع الفعال لامتصاص الجزيء i وc_i: تركيز الجزيئات في الطبقة المدروسـة مـن الغـلاف الجوي.

تظهر في هذه المعادلة الشدة الإبتدائية $\mathrm{I}_o(\lambda)$ التي يـصعب تحديـدها عنـد إجـراء القياسات في الغلاف الجوي، لأنها تعني شدة ضوء المنبع التي يسجلها الكاشف بعد عبوره المسارL بغياب الهواء نهائياً. من جهةٍ أخرى، يظهر شريط امتصاص أي جزيء يـسجل في الغلاف الجوي على شكل شريط طيفي ضيق نسبياً على خلفية امتصاص عريضة جداً تعود لامتصاص المكونات المختلفة للغلاف الجوي، كما هو مبين في الشكل-2 أعلاه.

تلافياً لذلك، تعتمد مطيافية الامتصاص التفاضلي على فصل المقطع الفعال لامتصاص الجزيء أو الذرة σ إلى جزأين، كما يأتي[4]:

$$\sigma(\lambda)=\sigma_o(\lambda)+\sigma'(\lambda)$$

حيث $\sigma_o(\lambda)$: المقطع الفعال للامتصاص المتغير ببطء مع طول الموجة، أي العائـد لخلفية الامتصاص العريضة، في حين $\sigma'(\lambda)$: المقطع الفعال للامتصاص المتغير بسرعة مع طول الموجة أي الموافق لشريط الامتصاص الضيق العائد للجزيء المعتبر، كما هـو مبين في الشكل-2 أسفله.



الشكل (2) مطيافية الامتصاص التفاضلي: فصل الامتصاص الضيق والعريض[6]

بتطبيق ذلك على الشدة (λ) I : المعطاة في قانون بيير- لامبيرت بوجود عـدد مـن الأنواع المرافقة، بعد ضربها بمعامل إخماد (λ) A: يعبر عن نفوذيـة الجملـة الـضوئية التجريبية المستخدمة ويتغير ببطء مع طول الموجة، نحصل على العلاقة الآتية:

$$I(\lambda)=I_o(\lambda)\cdot\exp\left[-L\sum(\sigma_i'(\lambda)c_i)\ \right]\cdot$$
$$\exp\left[-L\left(\ \sum\sigma_{io}(\lambda)c_i+\varepsilon_R(\lambda)+\varepsilon_M(\lambda)\ \right)\right].A(\lambda)$$

يعبر التابع الأسي الأول عن تأثير امتصاص الأنواع المرافقة في منطقة تغير المقطع الفعال للامتصاص بسرعة ويسمى بالامتصاص التفاضلي. أمـا التـابع الأسـي الآخـر فيتضمن الامتصاص المتغير ببطء للمكونات، إضافةً إلى تـأثير تبعثـر رايلـي ومـي المتغيرين ببطء أيضاً مع طول الموجة. وفقاً لذلك يمكن تحديد I_0' بأنها الشدة في غيـاب الامتصاص التفاضلي وتتضمن المساهمات المتغيرة ببطء مع طول الموجة جميعاً وتساوي:

$$\mathrm{I}_0'(\lambda)=\mathrm{I}_o(\lambda)\exp\left[-L\left(\sum\left(\ \sigma_{i0}(\lambda)c_i\right)+\varepsilon_R(\lambda)+\varepsilon_M(\lambda)\ \right)\right].A(\lambda)$$

يمكن تقريب هذه الشدة جيداً والتعبير عنها رياضياً, بواسطة كثيرة حدود من الدرجـة الثانية على الأقل $(P(\lambda)=\sum a_n\lambda^n)$. عندئذٍ, $I_0'(\lambda)\approx P(\lambda)$ ، ومنه نجد أن:

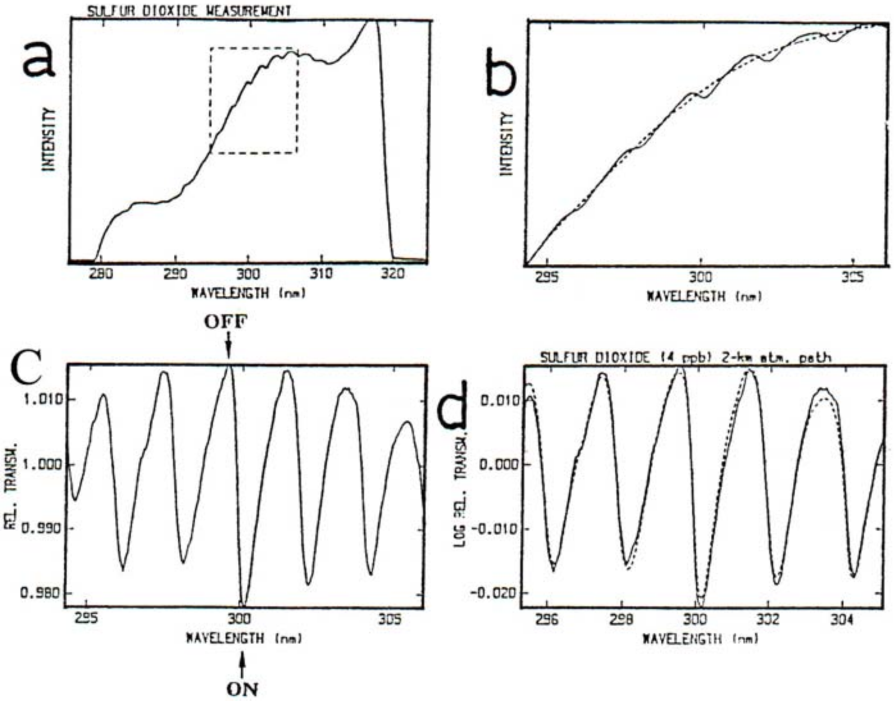
$$I(\lambda)/I'_o(\lambda) = \exp\left[-L\sum\left(\sigma'_i(\lambda)c_i\right)\right] \approx I(\lambda)/P(\lambda)$$

بهذه الطريقة يمكن حساب التركيز الوسطي للغازات الماصة، بمعرفة المقطع الفعـال للامتصاص التفاضلي $\sigma'_i(\lambda)$ من المعطيات التجريبية المخبرية.

اعتماداً على طريقة تقريب الشدة إلى كثيرة حدود من الدرجة الثالثة جـرى حـساب التركيز الوسطي للملوث SO_2 باستخدام مطيافية الامتصاص التفاضلي DOAS [5]. سجل طيف SO_2 في المجال الطيفي من 280 *nm* حتى 320 *nm*، بطول مسار ضوئي يـساوي 2000 *m*. لوحظ وجود بنية امتصاص صغيرة تقع في المجال من 295 *nm* حتـى 305 *nm* (الشكل-3 (a)) توافق امتصاص الملوث SO_2. لإيجاد التركيز الوسطي لهذا الملوث يواءم الطيف في منطقة بنية الامتصاص مع كثير حدود مناسب يأخذ شكل مـنحنٍ مـنعم (الشكل-3(b)). من ثم يقسم الطيف على كثير الحدود، بعد تنظيمهمـا(الـشكل-3(c)). أخيراً، يؤخذ لوغارتيم الطيف الحاصل, ويواءم مع طيف مخبري معروف بدقة. لقد بلـغ التركيز الوسطي للملوث في هذا المثال (4 *ppb*) 11$\mu g/m^3$ [5]. استخدمت أيضاً مطيافية DOAS بنجاح في قياس البنزن والتولوين [6] وغاز النشادر[7]. لقد قاد تطـوير تقانـات الكشف إلى استخدام هذه الطريقة في دراسة استنفاد الأوزون من خلال ضـوء الـشمس المتبعثر[8]. يضاف إلى ذلك تلك القياسات المنجزة فوق القطب الـشمالي خـلال الليـل القطبي لتعيين تركيز NO_3 حيث استخدم ضوء القمر كمنبع[9]. إن استخدام منبع ومضي ذي طيف عريض ومطياف مزود بكاميرا CCD وتليسكوب أدى إلى بلوغ حـد الكـشف 1 *ppb* عند مراقبة الملوث NO_2 بطول مسار ضوئي يساوي 5.5 *km* [10].

عند إجراء القياسات في الغلاف الجوي يجب، إضافة إلى اختيار المنطقة الطيفية التي يسيطر فيها امتصاص الملوث المدروس، إنجاز القياسات بسرعة مسح عالية لتجنب تأثير اضطراب الغلاف الجوي. يتطلب ذلك استخدام كواشف طيفية ذات استجابة عاليـة مثـل CCD (Charge-Coupled Devices) واستخدام منابع مترابطة مثل ليـزرات أنـصاف

النواقل القابلة للتوليف أو ليزر CO2 المستمر، التي حلت مكان منـابع الـضوء العـادي المألوفة.



الشكل (3) قياس ثاني أكسيد الكبريت بتقانة(DOAS).

(a): الشدة المسجلة على مسار امتصاص بطول 2000 m،

(b): المنطقة الطيفية المضخمة مع كثير حدود ملائم (الخط المتقطع)،

(c): الشدة المسجلة مقسومة بواسطة كثير الحدود،

(d): لوغاريتم المنحني بعد ملاءمته مع الطيف المخبري (الخط المتقطع) أعطى تركيزاً وسطياً (4 *ppb*) 11 $\mu g/m^3$ [5]

إلى جانب المذكور آنفاً، يمكن التخلص من قياس I'_0 باستخدام الليـزرات النبـضية كمنابع بدلاً من المنابع المستمرة. عندئذٍ تؤخذ الشدة التي يسجلها الكاشف عنـد طـولين موجيين λ_1 و λ_2. يقع الأول داخل خط امتصاص الجزيء، أو الذرة المدروسة، أما الثاني فيقع خارجه تماماً. عندئذٍ، يتغير المقطع الفعال للامتصاص بقدرٍ ملحوظ، ضـمن مجـال طيفي صغير $\Delta\lambda$ لخط الامتصاص، بينما تكون تغيرات المقطع الفعال لتبعثر رايلي ومي

مهملة. بمقتضى ذلك، تُعطى نسبة الشدتين اللتين يسجلهما الكاشف، الواقع على مسافة L من المنبع، عند الطولين الموجيين، كما يأتي:

$$\frac{P(\lambda_{1,}L)}{P(\lambda_{2,}L)} = e^{-c_i[\sigma_i(\lambda_1)-\sigma_i(\lambda_2)]L}$$

باستخدام هذه العلاقة، يمكن حساب التركيز الوسطي للجزيئات الماصة c_i بعد تعيين المقطع الفعال للامتصاص التفاضلي، مخبرياً.

يتبين مما تقدم ذكره أن مطيافية الامتصاص التفاضلي DOAS تمتلك بعض الإيجابيات التي يمكن إيجازها بما يأتي:

1- لا تتطلب معرفة الشدة الابتدائية للمنبع كما يمكن إهمال تبعثر رايلي ومي.

2- ذات انتقائية وحساسية عاليتين بسبب طول المسار الضوئي الذي يصل إلى عدة كيلومترات.

3- قياس امتصاص عدد من مكونات الغلاف الجوي في آنٍ معاً.

لكن إلى جانب ذلك هناك عدد من المساوئ أهمها، حساسيتها العالية لاضطراب الغلاف الجوي ومحدودية عدد الجزيئات التي يمكن دراستها، إضافة إلى عدم إمكانية القياس عند هطول الأمطار والثلوج وبوجود الضباب والغيوم. كما أنها لا تعطي أي معلومات عن توزع الملوثات في الغلاف الجوي بل تعطي التركيز الوسطي للملوث.

مبدأ الليدار

بوجهٍ عام، يقوم مبدأ الليدار، كما في الشكل-4، على إرسال نبضة ليزرية قصيرة الأمد طاقتها $P_0\ (\lambda)$ في اللحظة $t = 0$ عبر الغلاف الجوي من خلال تليسكوب. فيتبعثر جزء صغير منها راجعاً، من خلال التليسكوب نفسه، إلى مجموعة الكشف التي تسجل إشارة شدتها $S(\lambda,\ t)$ تُقاس بمقدرة فصلٍ طيفية وزمنية عالية. تتعلق هذه الإشارة في اللحظة $t_1 = 2R/C$، بالتبعثر على الجسيمات الواقعة على مسافة R من الليدار. فإذا سمح الكاشف بمرور الإشارة الراجعة خلال مجال زمني:

$$t_1 \pm \frac{1}{2}\Delta t$$

عندئذٍ تعطى شدة الإشارة المقيسة المكاملة زمنياً كما يأتي [11]:

$$S(\lambda, t_1) = \int_{t_1-\frac{1}{2}\Delta t}^{t_1+\frac{1}{2}\Delta t} S(\lambda, t)\,dt$$

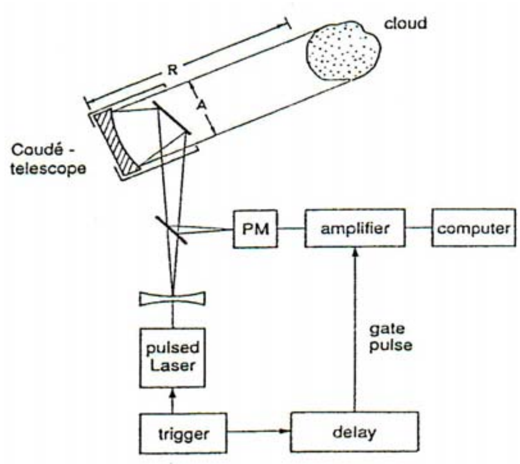
تتناسب هذه الإشارة المقيسة المكاملة زمنياً مع طاقة شـدة الـضوء المتبعثـر علـى الجسيمات الواقعة ضمن مسافة تساوي $R \pm \frac{1}{2}\Delta R = \frac{1}{2}C\left(t_1 \pm \frac{1}{2}\Delta t\right)$. تتعلـق شـدة الإشارة المسجلة $S(\lambda, t)$ بتوهين النبضة الأصلية المرسلة $P_0(\lambda)$ ، وأيضاً بطريقها ذهاباً وإياباً وبالزاوية المجسمة $d\Omega = D^2/R^2$ التـي يغطيهـا التليـسكوب ذو القطـر D والفتحة الدائرية $A = \pi(D/2)^2$. إلى جانب ذلك, تتعلق هذه الشدة بتركيـز الجـسيمات المبعثرة N، والمقطع الفعال للتبعثر الراجع σ^{scatt}، وفق العلاقة:

$$S(\lambda, t) = P_0(\lambda)e^{-2a(\lambda)R}N\sigma^{scatt}(\lambda)D^2/R^2$$

إن المقدار الهام في هذه العلاقة هو العامل $\exp[-2a(\lambda)R]$ لأنه يعطي المعلومات الضرورية عن الأنواع الماصة، لاحتوائه على معامل التوهين المعطى بالعلاقة الآتية:

$$a(\lambda) = \alpha(\lambda) + \sum_k N_k \sigma_k^{scatt}$$

حيث $\alpha(\lambda)$: معامل الامتصاص, ويساوي جداء كثافة الجزيئات الماصـة بـالمقطع الفعال للامتصاص($\alpha(\lambda) = N_i\sigma_i^{abs}$). أما الحد الثاني، فيعبر عن معامـل تبعثـر الضوء على جميع الجسيمات الموجودة في الغلاف الجوي.



الشكل (4) رسم تخطيطي لمجموعة الليدار[11]

بوجه مماثل لما تقدم ذكره في طريقة الامتصاص التفاضلي، يجري توليف الليزر في مجموعة الليدار بالتناوب، على طول موجة λ_1 يقع ضمن منطقة الامتصاص، وطول موجة λ_2 يكون عنده امتصاص الجزيئات المعتبرة مهملاً. ولما كان $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ صغيراً، كان بالإمكان إهمال تغيرات المقطع الفعال لتبعثر رايلي ومي. وفق ذلك، يمكن التعبير عن نسبة الإشارتين، كما يأتي [1]:

$$R(t)=\frac{S(\lambda_1,t)}{S(\lambda_2,t)}=\exp\left\{2\int_0^R[\alpha(\lambda_2)-\alpha(\lambda_1)]dR\right\}\approx\exp\left\{2\int_0^R N_i(R)\sigma(\lambda_1)dR\right\}$$

تعطي هذه النسبة التركيز الوسطي $N_i\ (R)$ المكامل على طول مسار الامتصاص.

يجري تعيين علاقة $N_i\ (R)$ بالمسافة R، بتطبيق طريقة التفاضل، هذا يعني، قياس الكميات المتعاقبة $S\ (\lambda_1,\ t)$ و$S\ (\lambda_2,\ t)$ و$S\ (\lambda_1,\ t+\Delta t)$ و$S\ (\lambda_2,\ t+\Delta t)$ بالتناوب في اللحظتين t و$t+\Delta t$.

عندئذٍ يتحدد الامتصاص ضمن المجال المكاني $(R+\Delta R)-R\ =-C\Delta t/2$ من النسبة الآتية [11]:

$$\frac{R(t+\Delta t)}{R(t)}=e^{-[\alpha(\lambda_2)-\alpha(\lambda_1)]\Delta R}\approx 1-[\alpha(\lambda_2)-\alpha(\lambda_1)]\Delta R$$

بتكرار العملية من أجل فواصل زمنية أخرى، أي مسافات مختلفة R، يمكـن تعيـين الامتصاص ضمن مجالات مكانية ΔR مختلفة. إضافة إلى هذا، تعطي معرفـة معامـل الامتصاص، في الشروط الطبيعية للغلاف الجوي (الضغط ودرجـة الحـرارة)، ضـمن الحجم المعتبر من الغلاف الجوي، إمكانيـة تحديـد تركيـز الأنـواع المدروسـة، أي: $N_i = \alpha_i / \sigma_i$. تتحدد مقدرة الفصل المكانية $\Delta R = C\Delta t/2$، بمقدرة الفصل الزمنية Δt لمجموعة الليدار، وبنسبة الإشارة إلى الضجيج التي يمكن التوصل إليها.

أنـواع الليـدار

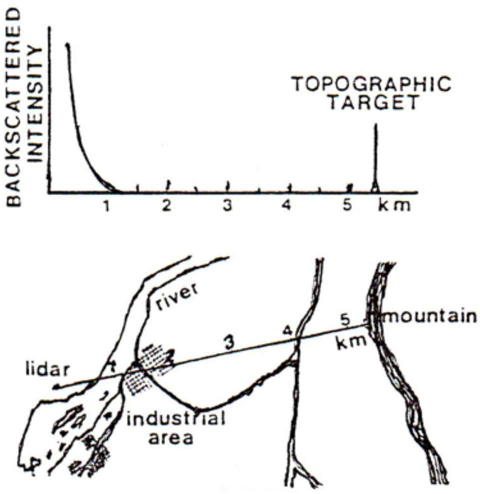
ليدار الهدف الطبوغرافي

تُرسل النبضات الليزرية، من هذا النوع من الليدار، ضمن الغلاف الجوي باتجاه هدف طبوغرافي. يمكن أن يكون هذا الهدف حافة جبل، أو جداراً، أو عاكـساً (علـى سـبيل المثال، Retroreflecting Corner Cube) أو حتى غطاء نباتياً، أو بقعة نفطية على سطح الماء. يجري تجميع الأشعة المتبعثرة الراجعة بواسطة تليسكوب يقـوم، مـع مجموعـة الكاشف، بتسجيلها تبعاً للزمن. فإذا كانت R، هي بعد الهدف عن الليدار، فإنه بعد مـرور زمن يساوي $t = \dfrac{2R}{C}$ (C: سرعة الضوء)، تُسجل إشارة صدى ضوئي قويـة، يمكـن بسهولة تمييزها، بسبب شدتها العالية نسبياً، كما يبين الشكل –5 أعـلاه. تُـستخدم هـذه الطريقة في تحديد المسافة عن بعد، على سبيل المثال، إذا كان أمـد النبـضة الليزريـة المرسلة δT، فأصغر عرض لإشارة الصدى الضوئي، والـذي يعبـر عنـه كمجـال δR هو: $\delta R = C\delta T/2$. يشار إلى أن شدة الصدى الضوئي P (λ)، تتعلق بطاقـة النبضة الليزرية، وبالمسافة بين الليدار والهدف، وبمساحة سطح التليسكوب، وبالانعكاسية الانتشارية لسطح الهدف (Albedo). بالإضافة إلى ذلك، تتعلـق P (λ) أيـضاً بـالمقطع الفعال للامتصاص $\sigma(\lambda)$، في الغلاف الجوي المتغير مع طول الموجة. فعنـد وجـود ملوث غازي، على سبيل المثال NO_2، الذي يمتلك مقطعاً فعالاً للامتصاص متغيراً، بتغير طول موجة المنبع الليزري، من λ_1 واقعة داخل خط الامتصاص (بحالة الليدار يرمز لها

(λ_{on})، إلى λ_2 خارج خط الامتصاص (ويرمز لها λ_{off})، ولا يوجـد ملوثـات أخـرى متداخلة معه، أو أنها تمتص بدرجةٍ متساوية عند كلا الطولين الموجيين، عندئـذٍ يعطـى قانون بيير- لامبرت كما يأتي [12]:

$$P(\lambda_{on}) / P(\lambda_{off}) = \exp\left[-2RN(\sigma_{on} - \sigma_{off})\right]$$

حيث N التركيز الوسطي للغاز المدروس، و$(\sigma_{on} - \sigma_{off})$ تغير المقطـع الفعـال للامتصاص التفاضلي، و $P(\lambda_{on})$ و$P(\lambda_{off})$ هما شدة الضوء المتبعثر الراجع عنـد λ_{on} وλ_{off}، على الترتيب. يلاحظ في المثال المدروس، تغير شدة إشارة الصدى بمقـدار4%، عندما تتغير λ من $448.1\ nm$ إلى $446.5\ nm$. وأن التركيز الوسطي لجزيئـات NO_2، على مسار بطول $5.5\ Km$ من الليدار إلى الجبل، يساوي قرابة $2ppb$. بناء علـى ذلـك، يعطى التركيز الوسطي للملوث على طول مسار يمتد من الليدار إلى الهدف [13].



الشكل (5) قياسات NO_2 باستخدام ليدار الهدف الطبوغرافي [12]

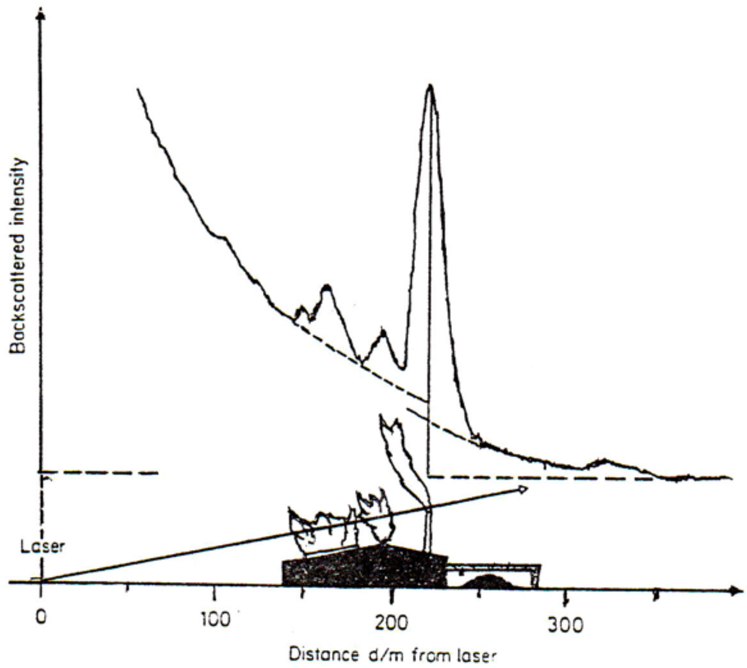
ليدار تبعثر مي Mie

يعطي تبعثر مي عن الجسيمات (الأيروسولات) وتبعثر رايلي عن الجزيئات، إشارات قوية تُلاحظ بوضوح عند دراسة التبعثر الراجع الناجم عن مسح الغلاف الجوي بواسـطة الليدار. ولما كانت هذه الإشارات واضحة، كان بالإمكان اعتبارها ناتجـة عـن هـدف طبوغرافي، ذي توزع مكاني على كامل المسافة. يسيطر تبعثر رايلـي عنـد الأطـوال الموجية القصيرة (UV) لتعلقه بالمقدار $\left(\frac{1}{\lambda^4}\right)$، أما تبعثر مي فيـسيطر عنـد الأطـوال الموجية المرئية، وتحت الحمراء القريبة لتعلقه بالمقدار $\left(\frac{1}{\lambda^n}\right)$، حيث $n \le 4$. لهذا يستخدم تبعثر مي المرتد عن الجسيمات لرسم خريطة للتوزيع الاتجاهي لهذه الأيروسولات علـى مساحات واسعة عند استخدام الليدار.

تعطى معادلة الليدار العامة، أي شدة الضوء المتبعثر الراجع المسجلة كتـابع لطـول الموجة λ والمسافة R، كما يأتي [1, 3]:

$$P(\lambda, R) = CWn_b(\mathrm{R})\sigma_\mathrm{b}\frac{\Delta \mathrm{R}}{\mathrm{R}^2}\exp\left[-2\int_0^{\mathrm{R}}\left[\sigma(\lambda)\mathrm{N(r)} + \mathrm{K}_{\mathrm{ext}}(r)dr\right]\right]$$

حيث C: ثابت الجملة، W: طاقة النبضة الليزرية المرسلة، $n_b(R)$: الكثافـة العدديـة للجسيمات، و σ_b المقطع الفعال للتبعثر الراجع. أما العامل الأسي فيعبـر عـن تـوهين الحزمة الليزرية، والأشعة المتبعثرة الراجعة الناتج عن وجود جزيئات ماصـة تركيزهـا $N(r)$، والمقطع الفعال لامتصاصها $\sigma(\lambda)$ وعن وجود الجسيمات الموهنة، حيث معامل التوهين $K_{ext}(r)$ مستقلٌ عن طول الموجة. يبين الشكل –6 مثالاً عن دراسـة الجـسيمات المنطلقة من مدخنة صناعية باستخدام ليدار تبعثر مي. يوضح الشكل-6 ازدياد شدة التبعثر الراجع ازدياداً ملحوظاً في مناطق التركيز العالية للجسيمات، بينما تتنـاقص شـدة إشـارة الخلفية الناتجة عن التوزع الطبيعي للجسيمات في الغلاف الجوي وفقاً للعلاقة $1/R^2$ [14].



الشكل (6) مراقبة الجسيمات المنطلقة من مصنع باستخدام ليدار تبعثر مي [14]

ليـدار رامـان

يستخدم تبعثر رامان، لإجراء قياسات كمية للمكونات الغازية للغلاف الجوي. في هذه الحالة، تأخذ الثوابت في معادلة الليدار معنى جديـداً. فتـصبح $n_b(R)$ الكثافـة العدديـة لجزيئات رامان المبعثرة للضوء، و σ_b المقطع الفعال لرامان. ولما كان تبعثر رامان لا مرناً، لذا تُبدي الإشارات المسجلة انزياحات رامان المميزة للجزيئات المعتبرة. لكن هـذه الإشارات، تكون أصغر من ناحية الشدة، بمقدار10^3 مرة من تلك الناتجة عن تبعثر رايلي للجزيئات نفسها. لتلافي إشارات تبعثر رايلي الشديدة، تستخدم مرشحات تداخليه، يوافـق مركز عصابة نفوذيتها طول موجة تبعثر رامان، أما خـارج هـذا المجـال، فنفوذيتهـا معدومة. مع ذلك، تبقى إشارة تبعثر رامان ضعيفة، ويمكن زيادة شدتها بزيادة التركيـز وتقصير مجال القياس[3]. لهذا السبب يستخدم ليدار رامـان بحالـة دراسـة المكونـات

الأساسية للغلاف الجوي، مثل H_2O، N_2, O_2 ، نظراً للأهمية الكبيرة لهذه القياسات في علم الأرصاد الجوية [15].

ليدار الفلورة

يعتمد ليدار الفلورة على توليف ضوء الليزر على خط امتصاص الملـوث الغـازي، وكشف ضوء الفلورة الناتج. في هذه الحالة تُعبر(R) n_b ، في معادلة الليدار عن الكثافـة العددية للذرات المتفلورة، و σ_b المقطع الفعال للفلورة. ولما كانت عملية التصادم بـين الذرات المتفلورة، هي السبب في زيادة شدة الانتقالات اللاإشعاعية، على حـساب نقـص شدة ضوء الفلورة، فإن مثل هذا الليدار يستخدم استخداماً جيداً لقيـاس طبقـات الـذرات القلوية والقلوية الترابية K, Na, Li, Ca الموجودة في طبقة الميزوسـفير علـى ارتفـاع يقارب km 100 [12]، حيث يكون الضغط منخفضاً ولا تحصل عملية إخمـاد لـضوء الفلورة بسبب التصادم. يستفاد من اختلافات الشدة في تلـك القياسـات فـي دراسـة ديناميكية الغـلاف الجوي [3].

ليدار الفلورة ذو الهدف الصلب

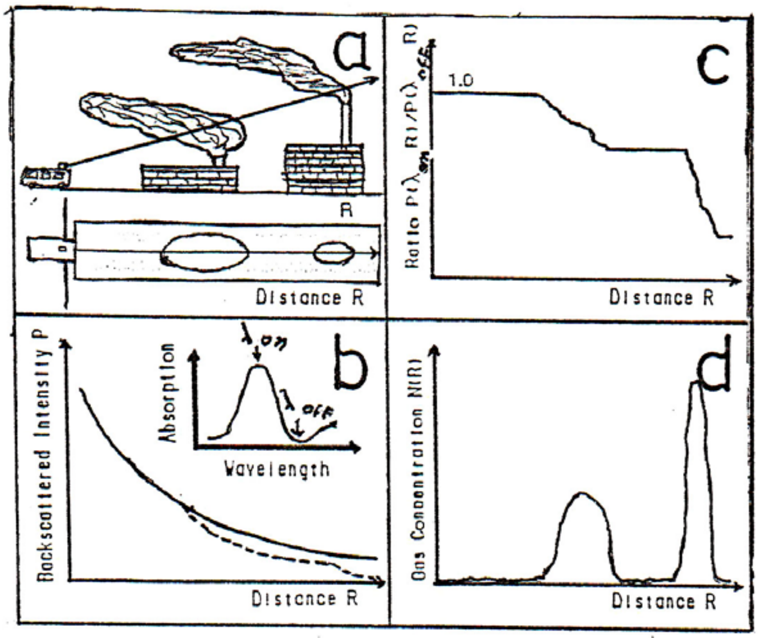
تُسدد الحزمة الليزرية باتجاه هدف صلب ويسجل الضوء المتبعثر الراجـع، وإشـارة صدى الهدف أيضاً. تُحرض الحزمة الليزرية فلورة الهدف الصلب، التي تعود مع إشارة صدى الهدف إلى الكاشف. فإذا كانت الإشارة المسجلة قوية بدرجة كافية، عندئـذٍ يمكـن تحليلها باستخدام محلل ضوئي متعدد القنوات، واستخلاص فلورة الهدف الصلب الصرفة. بتكرار العملية عدة مرات، يمكن الحصول على طيف الفلورة الكامل للهدف الصلب [13]. يستخدم هذا الليدار في مراقبة تلوث طبقة الهيدروسفير (الغطاء المائي) بالزيوت النفطية، وفي قياس أعماق مياه البحار عند استخدام ليزر أزرق مخضر، حيث يكون الماء نفـوذاً بالنسبة له. إضافة إلى ذلك، يمكن دراسة فلورة الطحالب، ذات الأهميـة الخاصـة فـي مراقبة الإنتاجية البحرية الكلية التي تبدأها البلانكتونات النباتية بتحويل أشعة الشمس وغاز

ثاني أكسيد الكربون والأطعمة المغذية إلى مواد عضوية [3]. كما يستخدم ليدار الفلـورة ذو الهدف الصلب بنجاحٍ كبيرٍ في تصوير الأماكن الأثرية [16].

مبدأ ليدار الامتصاص التفاضلي

(DIAL)Differential Absorption Lidar

يحتوي الغلاف الجوي الطبيعي بحالة التوازن البيئي، على توزع منـتظم للجـسيمات تتبعثر عنها النبضات الليزرية المرسلة وفقاً لتبعثر مي (Mie). يتغلغل الملوث الغـازي، في حال وجوده داخل التوزع المنتظم المفترض للجسيمات مـشكلاً أهـدافاً طبوغرافيـة موزعة حجمياً في الغلاف الجوي. لدراسة هذا الملوث يجري اختيار طولين موجيين من ضوء ليزري، الأول λ_{on} يوافق الامتصاص الأعظمي للملـوث، أو كمـا يقـال داخـل التجاوب، والثاني λ_{off} يقع خارج الامتصاص، أي خـارج التجـاوب. تتخامـد الإشـارة المسجلة عند إرسال النبضات الليزرية بطول موجة λ_{on}، في أثناء عبورها غيمة الملـوث الغازي (الشكل-7 (a)), ويزداد هذا التخامد بزيادة تركيز الملوث.أما الإشارة الحاصـلة عند إرسال النبضات λ_{off}، فلا تعاني مثل هذا التخامد، وتخضع فقط لتخامد بسبب تبعثـر مي يتناسب مع $\frac{1}{R^2}$، حيث R البعد عن الليدار، كما في الشكل-7 (b). لابد من التنويه إلى أن الإشارة المسجلة عند λ_{on}، تخضع لتخامد مي أيضاً. يسجل كـل مـن المنحنيـين $P(\lambda_{on}, R)$ و$P(\lambda_{off}, R)$ وتؤخذ نسبتهما، بعد تقسيمها إلى مجالات طيفية صغيرة جـداً (الشكل-7 (c)). يبقى ما ذُكر صحيحاً، إذا لم يتغير تبعثر مي بتغير طول الموجة من λ_{on} إلى λ_{off}. ولما كان الفرق بين $\lambda_{on}, \lambda_{off}$ صغيراً جداً، فإنه مهما تبـدل حجـم الجـسيمات المسببة لتبعثر مي في الغلاف الجوي، ومهما كان توزعها غير منتظم، يمكن دوماً أخـذ النسبة بين المنحنيين واستبعاد التشويشات الناتجة، وبالنتيجة الحصول علـى مـا يـسمى منحني DIAL(الشكل-7(c)). يستفاد من منحني DIAL، في حـساب تركيـز الملـوث الغازي المدروس كتابع للمسافة وذلك بتطبيق قانون بيير- لامبيـرت ومعرفـة المقطـع الفعال للامتصاص التفاضلي للغاز المدروس [17].



الشكل (7) مبدأ ليدار الامتصاص التفاضلي DIAL [17]

يمكن الحصول على العلاقة النظرية لمنحني DIAL انطلاقاً من معادلة الليدار العامة بأخذ نسبة الشدتين المسجلتين عند λ_{on} (داخل التجاوب) وعند λ_{off} (خارج التجاوب), كما يأتي [13]:

$$\frac{P(\lambda_{on},R)}{P(\lambda_{off},R)}=\exp[-2(\sigma_{on}-\sigma_{off})\int_0^R N(r)dr]$$

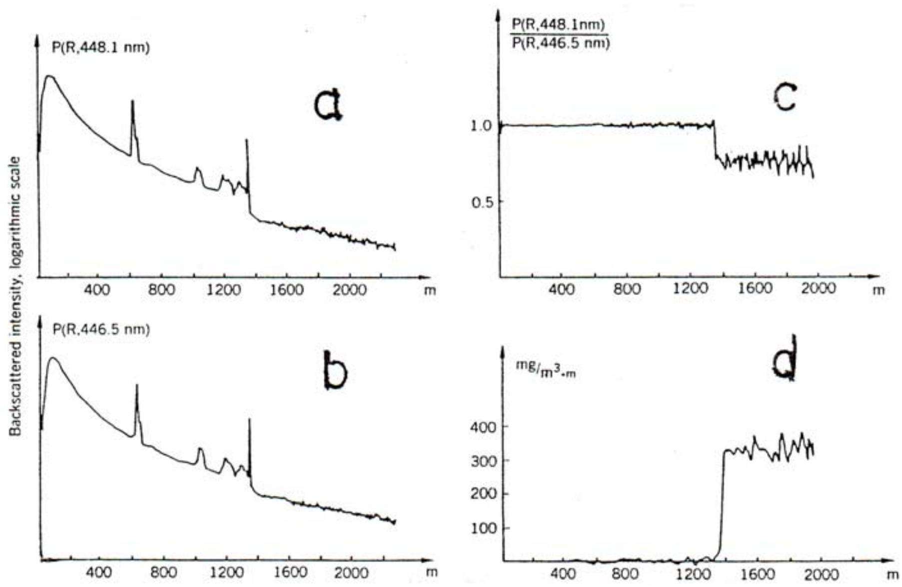
وذلك بافتراض أن $K_{ext}(r),\sigma_b$ في معادلة الليدار العامة مستقلة عن طول الموجـة، عندما يكون $\Delta\lambda = \lambda_{on} - \lambda_{off}$ صغيراً. يمكن أيضاً حساب التركيـز الوسـطي للملـوث الغازي $N_{av}(R, R+\Delta R)$، في مجال مكاني معين ΔR من العلاقة الآتية:

$$N_{av}(R,R+\Delta R)=\frac{1}{2(\Delta R)[\sigma_{on}-\sigma_{off}]}\ln\frac{P(\lambda_{on},R+\Delta R)P(\lambda_{on},R)}{P(\lambda_{off},R+\Delta R)P(\lambda_{off},R)}$$

تُستخدم تقانة DIAL في دراسة الملوثات المختلفة، ومراقبة مكونات الغلاف الجـوي الأساسية أيضاً، كما في المثالين الآتيين:

سحابة NO_2 صناعية

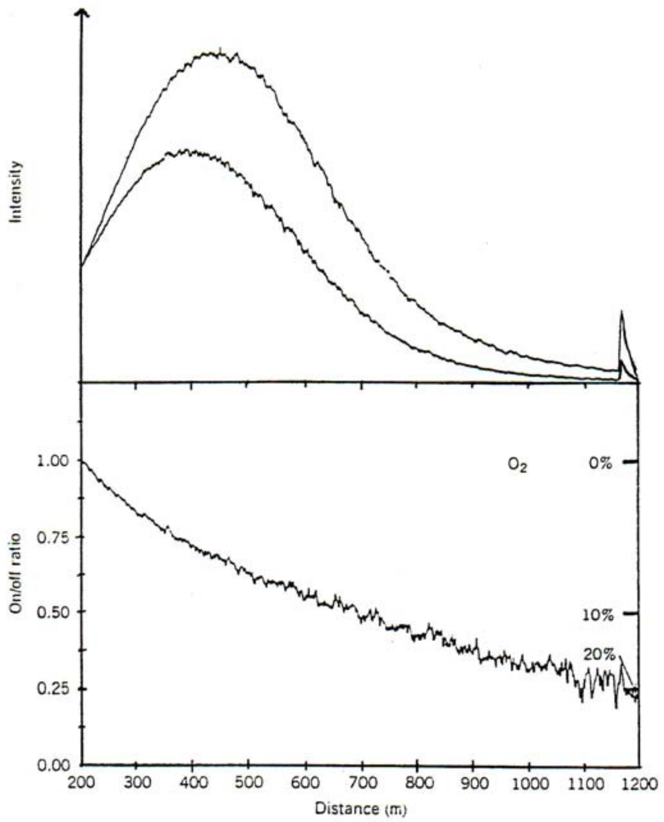
توجه الحزمة الليزرية باتجاه أعلى ذروة المدخنة الصناعية، وتُسجل منحنيات DIAL عند $\lambda_{on} = 448.1\ nm$ (داخل التجاوب)، كما في الشكل-8(a)، وعنـد $\lambda_{off} = 446.5\ nm$ (خارج التجاوب)، كما في الشكل-8(b). لقد أُخذ المقياس اللوغاريتمي، لتقليل الفروق بين شدة الإشارات الواردة من المسافات القريبة جداً، وتلك الواردة من المسافات البعيدة جـداً عن الليدار [18]. يتضح من مقارنة الشكلين أن تخامد المنحني داخل التجاوب أكبر مـن تخامده خارج التجاوب. إضافة إلى ذلك يتخامد كلا المنحنيين بسبب التبعثر المرن [14]. لكن بفضل منحني DIAL النسبي المبين في الـشكل-8(c)، يحـذف فعـل الجـسيمات المسؤولة عن تبعثر مي، ويبقى فقط فعل مكونات السحابة الدخانية، الذي يظهر بوضـوح على مسافة $1350\ m$، بعد ذروة المدخنة عن الليدار. بمعرفة المقطع الفعـال التفاضـلي لامتصاص الملوث NO_2، وجد أن تركيزه كتابع للمسافة يساوي قرابـة $320\ mg/m^3.m$، كما هو مبين في الشكل-8 (d) [18].



الشكل (8) قياسات DIAL للملوث NO_2، مع منحنيات داخل التجاوب وخارجه، ومنحني DIAL النسبي وتغيرات تركيز NO_2 مع المسافة [18]

توزع منتظم في الغلاف الجوي- O_2

توجه حزمة الليزر عبر الغلاف الجوي باتجاه جبل يبعد قرابة $1200\ m$ عن الليـدار. يصدر الليزر في منطقة الطول الموجي $\lambda = 254\ nm$، حيث يمـتص الأوكـسجين هـذه الموجة امتصاصاً ضعيفاً [17]. يبين الشكل-9 أعلاه منحنيـي شـدة الـضوء المتبعثـر الراجـع، المـسجلين مـن التـوالي الزمنـي للإشـارات المتبعثـرة الراجعـة، عنـد $\lambda_{on} = 254.0\ nm$, $\lambda_{off} = 253.6\ nm$. تظهر في المنحنيين إشارة صدى شديدة نسبياً عند مسافة $1200\ m$. يبين الشكل- 9 في أسفله منحني DIAL النسبي المتناقص بشكل أسـي. هذا التناقص الأسي تبينه معادلة الليدار التي تتطابق في هذه الحالة مع معادلة ليدار الهدف الطبوغرافي تماماً [19].



الشكل (9) مراقبة O_2 في الهواء المحيط بواسطة DIAL [19]

المتطلبات التقانية لتصميم مجموعة DIAL

تُصمم مجموعة DIAL لتكون قادرة على كشف التراكيز المنخفضة جـداً للملوثـات الغازية على مسافات كبيرة. لهذا ينصب الاهتمام الرئيس عند التصميم على شدة الإشارة الراجعة وعلى إشارات الضجيج. يتبين من معادلة الليدار المتقدم ذكرها، أن شدة التبعثـر الراجع تزداد بازدياد طاقة النبضة الليزرية المرسلة، وازدياد مساحة سـطح التليـسكوب ومردود الكاشف. إضافة إلى ذلك، يجب زيادة حساسية المجموعة بإدخال طرائق كـشف حديثة، على سبيل المثال، استخدام طريقة الكشف الهيترودايني (الكشف مغاير التـواتر)،

وطريقة الترابط التصالبي. من ناحيةٍ أخرى، لابد من أخذ تأثير الاضطراب في الغـلاف الجوي (الومضان)، وأخيراً القدرة على التعامل مع مجال ديناميكي واسع يمتد إلى عـدة كيلومترات.

المجال الديناميكي (Dynamical Range)

تتناسب شدة التبعثر الراجع مع $\frac{1}{R^2}$، لهذا ستكون شـدة الإشـارات الراجعـة مـن مسافات قريبة قويةً جداً، في حين تكون تلك الراجعة من مسافات بعيدة ضعيفةً جداً. وترد جميع هذه الإشارات في آنٍ معاً. لحل هذه المشكلة جرى استخدام عـدة طرائـق تقانيـة منها[13]:

1- فصل محور نفوذية الحزمة عن محور التليسكوب يؤدي إلى إنقاص شدة التبعثـر الراجع من مسافات قريبة.

2- إدخال جملة بصرية ذات فتحة تحدد حقل رؤية التليسكوب في مستوي خيال الحقل البعيد عنه. عندئذٍ يتشكل للضوء المتبعثر الراجع من مسافات قريبة خيالٌ على بعدٍ كبيـر من مرآة التليسكوب ولا يتمحرق في مستوي الفتحة. تبعاً لهذا يمر عبر الفتحة جزء مـن الضوء المتبعثر الراجع الكلي فقط, وبالنتيجة تنقص شدة الإشارات الراجعة من مـسافاتٍ قريبةٍ (Geometrical compression).

3- استخدام مضخم لوغاريتمي(Logarithmic amplifier). يبيـن الشـكل–8(a-b)، استخدام التمثيل اللوغاريتمي لتقليل الفروق بين شدات الإشارات الراجعة مـن مـسافات بعيدة، وتلك الراجعة من مسافات قريبة [18].

4- تطبيق طريقة انحدار الفولطية العالية التي تغذي سلسلة دينودات المضخم الضوئي (Ramp the high voltage). يبدأ المضخم الضوئي بتسجيل الإشارات الواردة بدءاً مـن لحظة تحرير نبضة الليزر دون تطبيق فولطية عالية عليه. يستمر المضخم بنظام العمـل هذا حتى تنقص شدة الإشارات المسجلة إلى ذلك المستوى الذي يمكـن عنـده معالجتهـا بمرقم انتقالي ذي سعة تخزين محدودة، وهذا يوافق تسجيل الإشارات الواردة من مسافات قريبة. في هذه اللحظة يبدأ تطبيق الفولطية العالية علـى المـضخم، أي يبـدأ التـضخيم

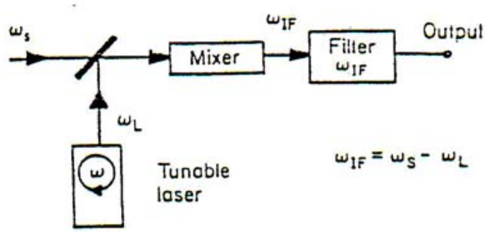
الأعظمي الثابت وذلك لتسجيل الإشارات الضعيفة الواردة من مسافات بعيدة. استخدمت هذه الطريقة عند تسجيل طيف الأوكسجين المبين في الشكل –9 حيث يبدأ التضخيم الأعظـمـي الثابت بعد مرور زمن يوافق ورود الإشارات من مسافة 600 *m* عن الليدار [19].

الكشف متغاير التواتر(الهيترودايني) (Heterodyne Detection)

تُعد طريقة الكشف الهيترودايني (الكشف متغاير التواتر) ذات فائدة كبيرة، خاصة عند العمل في منطقة تحت الأحمر IR من الطيف، حيـث لا يمكـن اسـتخدام المـضخمات الضوئية PMT ككواشف. ومع أن مردود الكواشف في مجال تحت الأحمر عالٍ جداً، إلا أن سوية الإشارة التي تعطيها منخفضة، مما يستدعي استخدام تضخيم إلكتروني يمكن أن يسبب بسهولة ضجيجاً إضافياً على الإشارة. يؤدي هذا الضجيج عنـد اسـتخدام كاشـف هيترودايني يبين الشكل-10 مخططاً له، إلى نتائج غير دقيقة، حيث تمتزج في الكاشـف الإشارات الواردة ذات السعة A_s مع إشعاعات الهزاز الموضعي، أي الليـزر المـستخدم التي تمتاز بسعتها A_L وبضيق عرضها الطيفي. عندئذٍ تتولد في الكاشف إشارات (Beats) بتواتر يساوي الفرق بين تواتر الإشارة الواردة وتواتر الهزاز الموضعي. وتعطـى شـدة الإشارة المحصلة كما يأتي [1]:

$$I = \left(A_s \cos \omega_s t + A_L \cos \omega_L t\right)^2$$

أما الإشارة المكشوفة S فتعطى بالعلاقة: $I = A_s A_L \cos\left(\omega_s - \omega_L\right)t$ + عالية (10^{13} x 10^{14} *Hz*) حدود تحـوي تـواترات فإذا عبرت الإشارة إلى مرشح إلكتروني ذي عـــصابة ضـــيقة يتطـــابق مركزهـــا مـــع فـــرق التـــواتر $\omega_{IF} = \omega_s - \omega_L$ ، $\Delta \nu_{IF} \le 10^9\, Hz$، فإن هذه الإشارات تعبر المرشح ويمكـن تضخيمها بسهولة. عندما يزداد تواتر الهزاز الموضعي، يزداد تواتر الإشارات الـواردة أيضاً، وعلى هذا يسجل الطيف بالتتالي. إن سعة الإشارة المكشوفة تتناسب مع كلٍ من A_s وA_L ، ولما كان ازدياد A_L اختيارياً كان بالإمكان الحصول على إشـارات خاليـة مـن الضجيج.



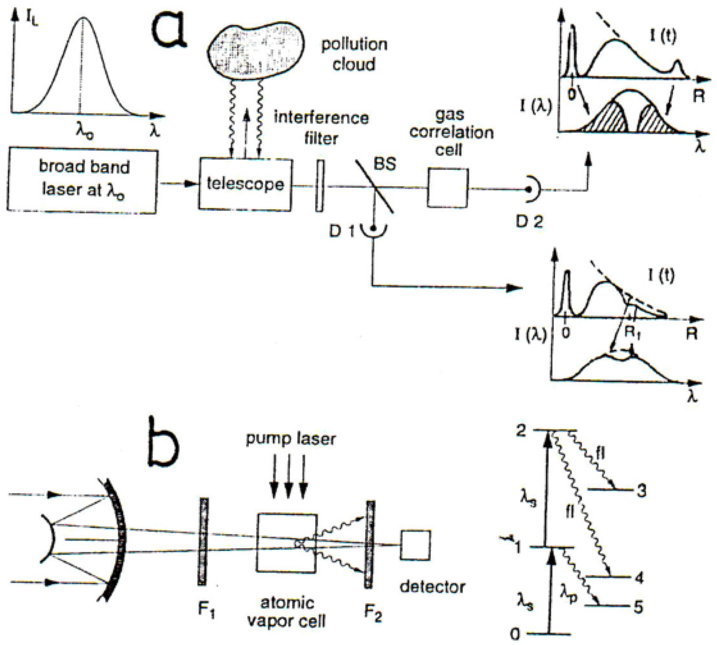
الشكل (10) مخطط كاشف هيترودينى[3]

لابد من الإشارة إلى أنه بهذه الطريقة تُحل مشكلة المجال الـديناميكي فـي الليـدار المعتمد على طريقة الكشف الهيترودينى لأن الإشارة النهائية تتناسب مع الجذر التربيعـي لإشارة الليدار العادية A_s^2 [3].

طريقة الترابط التصالبي (Cross Correlation Method)

تحد الخلفية المستمرة والساطعة لضوء الشمس المتبعثر في الغلاف الجوي من نـسبة الإشارة إلى الضجيج التي يمكن الحصول عليها باستخدام الليدار عند إجراء القياسات وقت النهار. لذا، تُعد طريقة الترابط التصالبي من الأساليب التقانية البديعة الانسجام التـي أدى تطبيقها إلى زيادة نسبة الإشارة إلى الضجيج وبالنتيجة زيادة حساسية الليدار بقدرٍ ملحوظ.

تعتمد طريقة الترابط التصالبي كما في الشكل-11، على تقـسيم الحزمـة المتبعثـرة الراجعة بمجزئ حزمة إلى قسمين. ينعكس القسم الأول نحو الكاشف D_1، في حين يعبـر الجزء النافذ من المجزئ من خلال خلية امتصاص طولها l. تحوي الخلية على الجزيئات المدروسة بشروط مماثلة لشروط الغلاف الجوي من حيث الضغط الكلي ودرجة الحرارة. أما الكثافة الجزيئية للجزيئات في الخلية فتكون عالية بحيـث تتحقـق فـي مركـز خـط امتصاصها المتراجحة الآتية: $l \rangle\rangle\ \alpha(\nu_0)$، حيث $\alpha(\nu_0)$: معامل الامتصاص عنـد قمة خط الامتصاص ν_0. من جهةٍ أخرى يجب أن يكون عرض عصابة الليزر المـستخدم $\Delta\nu$ أكبر قليلاً من عرض خط امتصاص الجزيئات المعتبرة[20].



الشكل (11)

(a): مبدأ ليدار الترابط التصالبي، (b): المرشح الذري الفاعل [11]

يضبط تضخيم D_1 وD_2 بحيث ينعدم الفرق بين إشارتيهما، عند التركيز المطلوب N_i في الخلية. وعليه، يمكن كشف أي انحراف في قيم (R) N_i عن قيمة التـوازن، كإشـارة فرق تضخيم (N_i) ΔS. تكون هذه الإشارة في المقام الأول مستقلة عن التأرجحات الممكن حصولها في شدة الليزر وتواتره.

بناء على ما تقدم ذكره، تعتمد طريقة الترابط التصالبي علـى اسـتخدام المرشـحات الذرية. وهذه المرشحات هي أبخرة ذرية تمتلك خطوط امتصاص ضوئية ضيقة توافـق تواتراتها تواترات الضوء المتبعثر الراجع. فبعد تجميع الضوء المتبعثر الراجع ذي الطول الموجي λ_L، بواسطة التليسكوب، يرسل من خلال مرشح طيفي ضـيق F_1 توافـق قمـة نفوذيته λ_L. من ثم يمرر عبر خلية الامتصاص الحاوية على بخـار ذرات أو جزيئـات

المادة التي تمتلك خط امتصاص عند λ_L، فيعمل علـى إثـارة فلورتهـا بطـول موجـة $\lambda_L < \lambda_{FI}$. تُكشف هذه الفلورة بعد عبورها مرشحاً لا يمرر الأطوال الموجية الأصغر من λ_{FI}. بهذه الطريقة، تُحذف أشعة الخلفية، بوجه أساسي، وتزداد حساسية الليـدار. تجـدر الإشارة إلى أن هذه المرشحات المنفَعلة تُقتصر على الأطـوال الموجيـة λ_L، الموافقـة للانتقالات التجاوبية فيها والتي تبدأ من الحالة الطاقية الأساسية [15]. لكن ومـع ازديـاد كثافة إسكان الحالات المثارة لذرات أو جزيئات المرشح بقدرٍ كـافٍ، بفـضل اسـتخدام ليزرات ضخ قابلة للتوليف، أمكن استعمال الانتقالات بين الحالات المثـارة كمرشـحات ذرية وجزيئية فاعلة. تمتاز المرشحات الذرية الفاعلة، بأنها يمكن أن تتفلور معطيةً أطوالاً موجية أقصر من طول موجة الإثارة، مما يسمح باستخدامها لكشف الأشعة تحت الحمراء عن طريق الفلورة في المجال المرئي أو حتى في المجال فوق البنفسجي من الطيف [11].

اضطراب الغلاف الجوي (Atmospheric Turbulence)

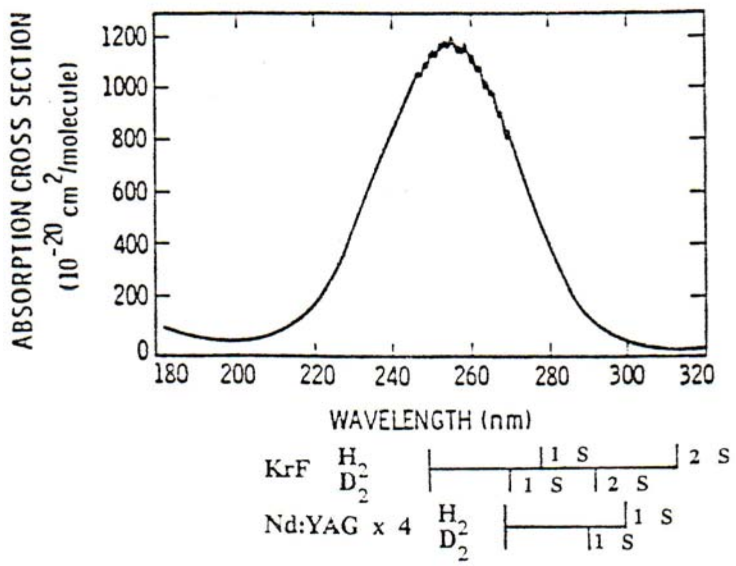
يؤثر اضطراب الغلاف الجوي والتغيرات الماكروسكوبية المتعددة التـي تحرضـها الرياح (الغيوم وحركات الجسيمات والسحب الدخانية)، بدرجةٍ كبيرةٍ في منحنيـي DIAL عند تسجيلهما داخل التجاوب وخارجه إذا لم ينجزا بالتزامن. لـذلك، يـستخدم ليـزران مستقلان، يولف الأول على طول الموجة λ_{on} والثاني على λ_{off}. ويكشف الضوء المتبعثر الراجع, باستخدام الكاشف نفسه والمرقم الإلكتروني الانتقالي نفسه، لكـن بتـأخير أحـد الليزرين عن الآخر قرابة μs 100، حيث بينت التجارب، أن الغلاف الجوي يبقى مستقراً خلال زمن $1s$. من جهةٍ أخرى، تُجرى القياسات عملياً بمعـدل تكـرار $10 - 100\ Hz$، وتُسجل في ذاكرات منفصلة، ومن ثم يؤخذ الوسطي، مما يؤدي إلى استبعاد الكثير مـن تأثيرات اضطراب الغلاف الجوي [21].

التصميمات المختلفة لمجموعة DIAL

تمتلك مجموعة DIAL العديد من النماذج المتفاوتة وفقاً للهـدف الـذي مـن أجلـه صممت، ومنها ما يأتي:

مجموعة DIAL الثابتة

تعد دراسة أوزون طبقة التروبوسفير من التطبيقات الهامة لمجموعة DIAL الثابتـة. يبين الشكل-12، طيف امتصاص الأوزون في المجال *nm* 320 – *nm* 180 [22]، الـذي لا يبدي بنية طيفية واضحة. لهذا، يمكن استخدام طولين موجيين داخل التجاوب وخارجه، منفصلين إلى حدٍ كبيرٍ نسبياً. ينجز ذلك باستخدام ليزر اكسيميري KrF يصدر عند 249 *nm*، أو ليزر Nd:YAG مع مضاعفة التواتر أربع مرات ليصدر عند *nm* 266. يـزود كل من الليزرين بخلايا تحويـل رامـان (Raman Converting Cell) الحاويـة علـى الهيدروجين H_2 أو الديتيريوم D_2، للحصول على طول موجة يقـع خـارج امتـصاص الأوزون. فعندما يستخدم ليزر KrF (طاقة النبضة *mJ* 300 ومعدل التكـرار *Hz* 100)، وتضم خلية رامان الأولى الهيدروجين والثانية الديتيريوم، يكون انزياح رامان من أجلهما يساوي $4155\ cm^{-1}$, $2987\ cm^{-1}$ [23]، على الترتيب. تُرسل مركبتا سـتوكس الأولـى والثانية، الناتجتان باستخدام الهيدروجين عند *nm* 249 ,*nm* 313، إضـافة إلـى إصـدار الليزر الإكسيميري الأساسي عند *nm* 249، شاقولياً ضمن الغلاف الجوي بواسطة السطح الأول لمرآة من الألمنيوم. تنعكس الأشعة المتبعثرة الراجعة عبر المـرآة نفـسها، إلـى تليسكوب متوضع أفقياً، باستخدام مرآة على هيئة قطع مكافئ مطلية بطبقة من الألمنيـوم. تستعمل مرآة لونانية (Dichroic Mirror) لتوجيه مركبتي ستوكس إلى مضخمين ضوئيين منفصلين مثبتين خلف مرشحات تداخلية ذات شرائط نفوذ ضيقة. يـرتبط كـل مـضخم ضوئي، مع مدخل راسم اهتزاز مهبطي رقمي لحساب وسطي الإشارات العـابرة، لعـددٍ كبيرٍ من النبضات الليزرية. يرتبط الراسم بحاسوب لتشكيل منحنـي DIAL المطلـوب. عملياً، يمكن الحصول على معطيات دقيقة حتى مسافة *km* 2 تقريباً [12].



الشكل (12) المقطع الفعال لامتصاص الأوزون وتواترات الليزرات الموافقة[22]

يستخدم مثل هذا الليدار أيضاً، في تحديد التغيرات اليومية والسنوية لبروفيل درجة حرارة الغلاف الجوي، كتابع للارتفاع عن سطح الأرض. يستفاد من ذرات الصوديوم، الموجودة في كل مكان، كذرات واسمة (Tracer Atoms)، بسبب أن عرض دوبلر لخط الصوديوم D، المقيس بواسطة ليزر صباغي قابل للتوليف، وذي عصابة ضيقة، يعد قياساً لدرجة الحرارة [21].

مجموعة DIAL المتنقلة

تأتي أهمية مجموعات DIAL المتنقلة، من كونها تُستخدم في عمليات البحث، والقياسات العملية الحقلية في المناطق الصناعية. تُستخدم غالباً، في هذه المجموعة ليزرات Nd:YAG مع بلورات لا خطية لمضاعفة التواتر. يستفاد من المدروج الثاني، في ضخ ليزر صباغ الرودامين-6G والرودامين-110، التي تُصدر في المجال UV، قرابة 300 *nm*، وذلك لقياس الملوثات SO_2 وO_3. أما المدروج الثالث، فيستخدم لضخ ليزر

صباغ أزرق الستيبلين-1 والكومارين-102، للوصول إلى الأطـوال الموجيـة المناسـبة لدراسة NO_2 و Hg و No [17].

صممت مؤخراً مجموعة ليدار متنقل متعدد الاستعمال يعمل في المجال الممتـد مـن فوق البنفسجي إلى تحت الأحمر المتوسط يعتمد في عمله على ليـزرين Nd-YAG مـع هزاز ضوئي وسـيطي ومرسـل مـضخم ضـوئي وسـيطي (Optical Parametric Oscillator-Optical Parametric Amplification Transmitter). يستخدم هذا الليـدار في دراسة الزئبق وثاني أكسيد الكبريت وعدد من الهيدروكربونات [24].

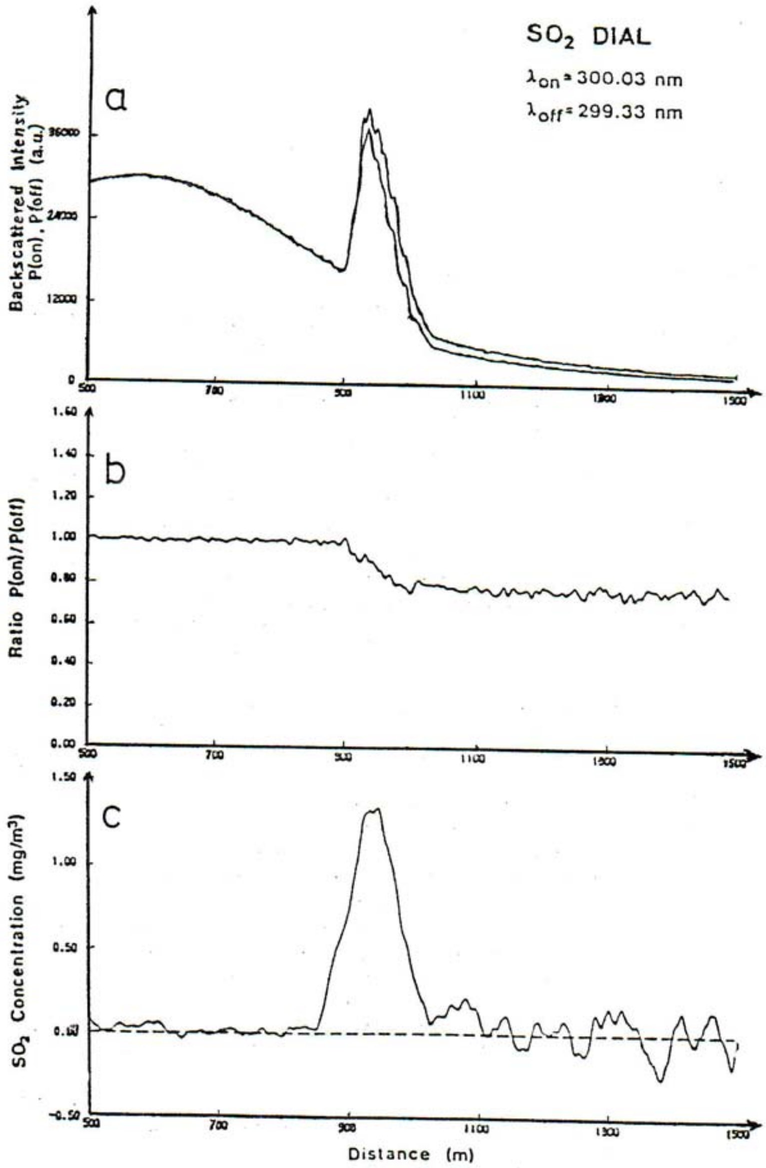
مجموعة DIAL المنقولة جواً

يراعى عند تصميم مثل هذه المجموعات، حجمها واستهلاكها للطاقة واستقرارها بحالة حدوث الاهتزازات. من ناحيةٍ أخرى، يجب إنجاز القياسات حتى فـي حالـة الحركـات السريعة، وتحقيق معدل تكرار عالٍ للنبضات، إضافة إلى تشغيل متزامن داخل التجـاوب وخارجه، أو بفاصل زمني صغير جداً يصل μs 100 [18]. يـستخدم، فـي مثـل هـذه المجموعة، ليزران Nd:YAG يعملان بشكلٍ مستقل، لإثارة الليزرات الـصباغية. تُقـسم الحزمة الليزرية إلى قسمين متساويين، يرسل القسم الأول منها باتجاه الحضيض (نظيـر الأوج)، أما القسم الثاني، فيرسل باتجاه الأوج. يستقبل الضوء المتبعثر الراجع بواسـطة تليسكوبين يعملان بالتراص (back-to-back). يمكن باستخدام مثل هذه المجموعات، رسم خرائط توزع الجسيمات، والأوزون، وبخار الماء في مناطق واسعة [15].

مراقبة بعض غازات طبقة التروبوسفير باستخدام DIAL

مـراقبـة SO_2

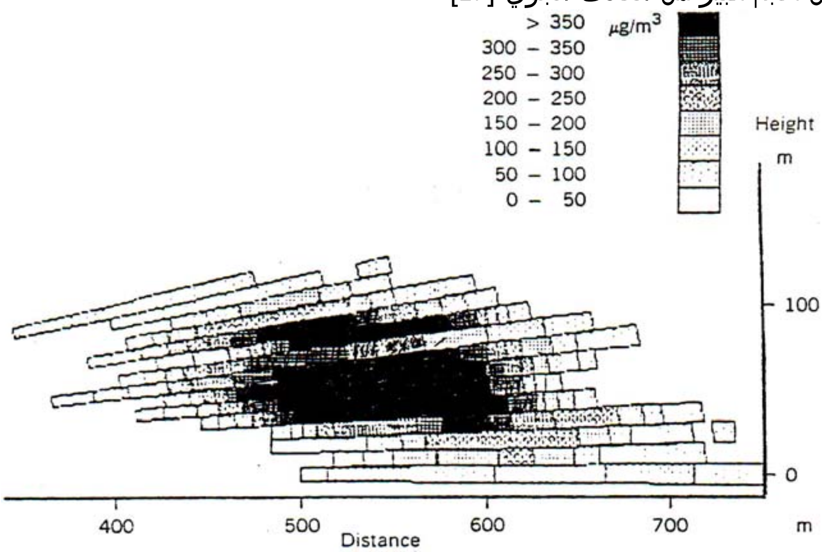
يعد غاز ثاني أوكسيد الكبريت أحد أهم الملوثات الناتجة عن احتراق الوقود. وتتعلـق كميته بمقدار الكبريت في الوقود. يتحول SO_2، في الغلاف الجوي، إلى حمض الكبريـت والكبريتات الأخرى، التي تعد المسبب الرئيسي لهطول الأمطار الحامضية. لذا، ما تـزال مراقبته موضع اهتمام الباحثين حتى يومنا هذا.



الشكل (13) قياسات DIAL للملوث SO_2، (a): منحنيات داخل التجاوب وخارجه، (b): منحني DIAL النسبي، (c): تغيرات تركيز SO_2 مع المسافة [1]

تُنجـز قياسـات DIAL علـى SO_2، باختيـار زوج الأطـوال الموجيـة λ_{on}= 300.03 *nm* و λ_{off}= 299.33 *nm* (الشكل –3(c))، الناتجة عن تـضاعف تـواتر ليزر صباغ الرودامين-6G المضخ بواسطة Nd:YAG ليـزر. يبـين الـشكل –13(a)، منحني DIAL المسجل داخل التجاوب وخارجه على مسافة تصل 1.5 *km*، حيث تظهـر على مسافة تقارب 900 *m*، سحابة من الملوث بتركيزٍ عالٍ. بينما يبين الـشكل-13(b)، منحني DIAL النسبي، والمنحني (c) يعطي تغيرات التركيز بدلالة المسافة بعـد تطبيـق معادلة الليدار. من الجدير بالذكر، أنه جرى التخاص من تبعية شـدة الـضوء المتبعثـر الراجع للمقدار $1/R^2$، باستخدام تقانة انحدار الفولطية العالية [2].

إضافة إلى المذكور آنفاً، يمكن تحديد التدفق الكلي للملوث SO_2، المنطلق من المنشآت الصناعية، بإنجاز عملية مسح شاقولي بحزمة الليدار، تتجه بعكس اتجاه الرياح القادمة من المنشأة. فبعد تسجيل منحنيات DIAL عند ارتفاعات مختلفة ومعالجتها فـي الحاسـوب، تُرسم خريطة توزع التركيز في مقطع شاقولي لسـحابة الملوث، كما في الـشكل-14. يمكن بتغيير موضع الليدار الحصول على توزع التركيز في مقـاطع شـاقولية أخـرى، والوصول إلى عملية مسح أفقي كاملة، وبالنتيجة تُرسم خريطة ثلاثية البعد لتوزع الملوث ضمن حجم كبير من الغلاف الجوي [17].



الشكل (14) تغيرات تركيز SO_2 في سحابة فوق مصنع [17]

إلى جانب ذلك، يمكن حساب التدفق الكلي F_{tot} للملوث من المنشأة، كما يأتي [3]:

$$F_{tot}(kg/s) = N_A\left[\left(kg/m^3\right)m^2\right]V_\perp(m/s) = \int_A N\, da\, V \cos\phi (kg/s)$$

حيث $V_\perp$: هي المركبة العمودية لسرعة الرياح على مستوي القياس (المقطع الشاقولي) N_A: التركيز التكاملي السطحي، ϕ: الزاوية بين اتجاه الرياح والعمود على المقطع الشاقولي للسحابة الدخانية. بحالة المثال المبين في الشكل-14، وجد أن التدفق الساعي للملوث SO_2 يساوي 230 *kg/h* [17].

إن استخدام ليدار الامتصاص التفاضلي ذي الأطوال الموجية المتعددة في قياس بروفيل التركيز الشاقولي لثاني أكسيد الكبريت أدى إلى كشف تركيز يساوي 1.2 *ppb* على ارتفاع 3000 *m* – 2400 بمقدرة فصل مكانية بلغت 300 *m* [25].

مراقبة الأوزون

يتمتع الأوزون بأهميةٍ خاصة، لأنه يكون الطبقة الواقية من الإشعاعات فوق البنفسجية الضارة UV-B القادمة من الشمس. وفي الحالات الطبيعية، يتركز الأوزون في طبقة الستراتوسفير. وإذا وجد في طبقة التروبوسفير، فإنه يعد من الملوثات الخطرة كونه مؤكسداً قوياً جداً [21].

تختلف مراقبة الأوزون في الستراتوسفير، عنها في التروبوسفير. فبحال مراقبة أوزون الستراتوسفير، من الضروري، تصميم أنظمة ليدار تصل فيها طاقة النبضة الليزرية قرابة *1J*، وقطر التليسكوب *1m*، واستخدام كاشف إلكتروني ذي حساسية عالية، لعدِّ الفوتونات [17]. من جهةٍ أخرى، لتجنب امتصاص الأوزون في الطبقات الأدنى، وخاصة في طبقة التروبوباوز، تُستخدم أطوالٌ موجيةٌ كبيرةٌ نسبياً، ليكون امتصاص الأوزون عندها أصغرياً. إضافة إلى ذلك، يجب أن يكون الفرق بين الطولين الموجيين داخل التجاوب وخارجه كبيراً، مما يتطلب تطبيق التصحيحات المناسبة على تبعثر مي ورايلي [15].

وفقاً لما تقدم، يمكن استخدام ليزر اكسيميري XeF أو XeCl (351 *nm* أو 308 *nm*)، حيث طاقة النبضة 300 *mJ* – 100، ومعدل التكرار 500 *MHz* – 100. من الضروري

الإشارة إلى إمكانية استخدام الليزر النبضي القابل للتوليـف TEA-CO2 (Transverse Electric Atmospheric) الذي يصدر في المجال من 9 μm إلى 11 μm، متوافقـاً مـع امتصاص الأوزون في هذه المنطقة من الطيف 9.5 μm [11].

أما مراقبة أوزون التروبوسفير، فتنجز باستخدام ليزر Nd:YAG مـضاعف التـواتر ثلاث مرات، يعطي ليزراً بطول موجة 266 nm، أو اكسيمير ليزر KrF يـصدر عنـد 249 nm. إلى جانب ذلك، غالباً ما يستخدم ليزر صباغ الرودامين-6G، المضخ بواسـطة ليزر Nd:YAG، بعد مضاعفة تواتره ليعطي ليزراً بطول موجة تقارب 300 nm، بطاقة نبضة تصل 200 mJ [26].

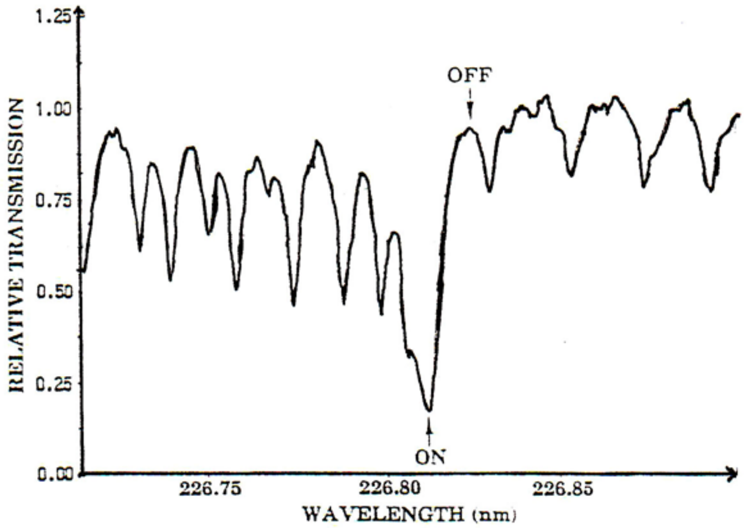
مراقبة NO_2 وNO_3 وبعض الملوثات الأخرى

ينبعث الملوث NO، في الغلاف الجوي، من عـوادم الـسيارات، ومـن الفعاليـات الصناعية المختلفة، خاصةً تلك التي تتضمن عمليات احتراق بـدرجات حـرارة عاليـة. يتأكسد NO بعد انبعاثه معطياً NO_2، الذي يتأكسد بدوره ويتفاعـل بعمليـاتٍ كيميائيـةٍ مختلفةٍ معطياً HNO_3. من ثم يعود HNO_3 إلى الأرض على شكل أمطار حمضية تسبب زيادة حمضية التربة.

يبين الشكل –8، المذكور آنفـاً، قياسـات DIAL للملـوث NO_2. للحـصول علـى $\lambda_{on} = 448.1\ nm$ و $\lambda_{off} = 446.5\ nm$ يستخدم ليزر صباغ الرودامين-6G بعد ضخه بليزر XeCl، ومن ثم مضاعفة التواتر بواسطة بلورة KDP [27]. يـسجل المنحنيـان داخـل التجاوب وخارجه ويؤخذ منحني DIAL النسبي. باسـتخدام علاقـة التركيـز الوسـطي الواردة آنفاً $N_{av}(R, R + \Delta R)$ يحسب تركيز هذا الملوث بدلالة المسافة والذي بلغ قرابة 320 $mg/m^3.m$ على بعد 1350 m من الليدار [18].

أما ما يخص NO، فيتضح من طيف امتصاصه، المبين في الشكل-15[23]، أن أكبـر قيمة لفروق الامتصاص توافق $\lambda_{on} = 226.81\ nm$ و$\lambda_{off} = 226.82\ nm$. للحصول على ليزر في هذا المجال الطيفي، يضاعف تواتر الليزر الصباغي في بلـورة KDP لتعطـي ليـزراً بطول موجة $\lambda = 575\ nm$. من ثم تمزج هذه الأشعة، مع الأشـعة الـصادرة عـن ليـزر Nd:YAG، في بلورة KDP أخرى، لتعطي بموجب ذلك إصـداراً ليزريـاً فـي المجـال

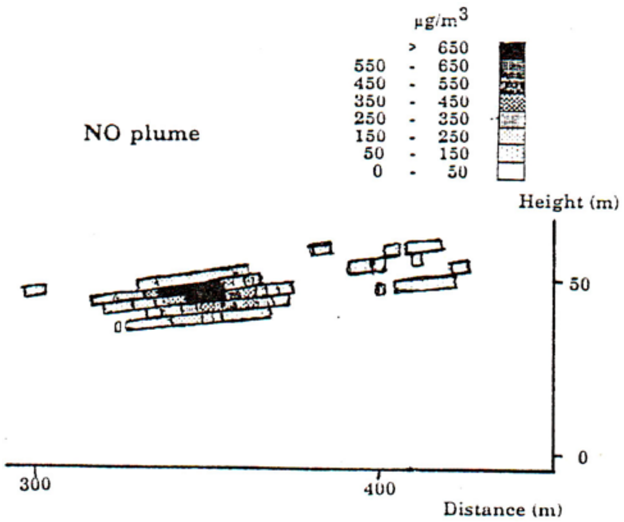
المطلوب (قرابة $\lambda \approx 226\ nm$). باستخدام مثل هذه المجموعة، أُنجزت عمليات مسح شاقولي حتى ارتفاع يساوي قرابة $75\ m$، ولمسافة أفقية بلغت $450\ m$، وذلك في سحابة تنطلق مـن مصنع حراري. يبين الشكل–16، نتائج المسح الشاقولي المنجز وفق الطريقة الموصوفة عند مناقشة الملوث SO_2، حيث بلغت أعلى قيمة لتركيز الملوث NO المقدار $650\ \mu g/m^3$ علـى بعد قرابة $345\ m$ من الليدار وعلى ارتفاع $50\ m$ عن سطح الأرض [2].



الشكل (15) طيف امتصاص NO مع الأطوال الموجية المستخدمة في نظام DIAL [23]

في الوقت الحاضر، يمكن مراقبة NO وNO_2، معاً باستخدام مجموعة DIAL المعتمِدة في المقام الأول على تضاعف تواتر الليزر الصباغي في بلورة لا خطية من النوع BBO (β- باريوم بوريت) تتميز بمردود تضاعف عالٍ جداً [28].

يبين الجدول-1 أهم الملوثات المدروسة باستخدام تقانـة DIAL، وحـدود كـشفها، والمقطع الفعال التفاضلي عند الطولين الموجيين المستخدمين لإنجاز القياسات. لقد أُعطيت حدود الكشف عند القياس على مسافة $100\ m$ من الليدار، أي بلغ طول مسار الامتصاص $200\ m$ [29].



الشكل (16) تغيرات تركيز NO في سحابة فوق مصنع [2]

الجدول (1) حدود الكشف والمقطع الفعال التفاضلي للملوثات المدروسة باستخدام تقانة DIAL

الغاز	طول الموجة	المقطع التفاضلي $atm^{-1}cm^{-1}$	حد الكشف *ppb*
NO	226 *nm*	100	5
Benzene	253 *nm*	61	8
Hg	254 *nm*	670.000	0.001
Toluene	267 *nm*	30	17
O_3	280 *nm*	30	9
SO_2	299 *nm*	25	20
NO_2	450 *nm*	10	50
HCl	3.6 *µm*	6	90
C2H4	10 *µm*	31	16

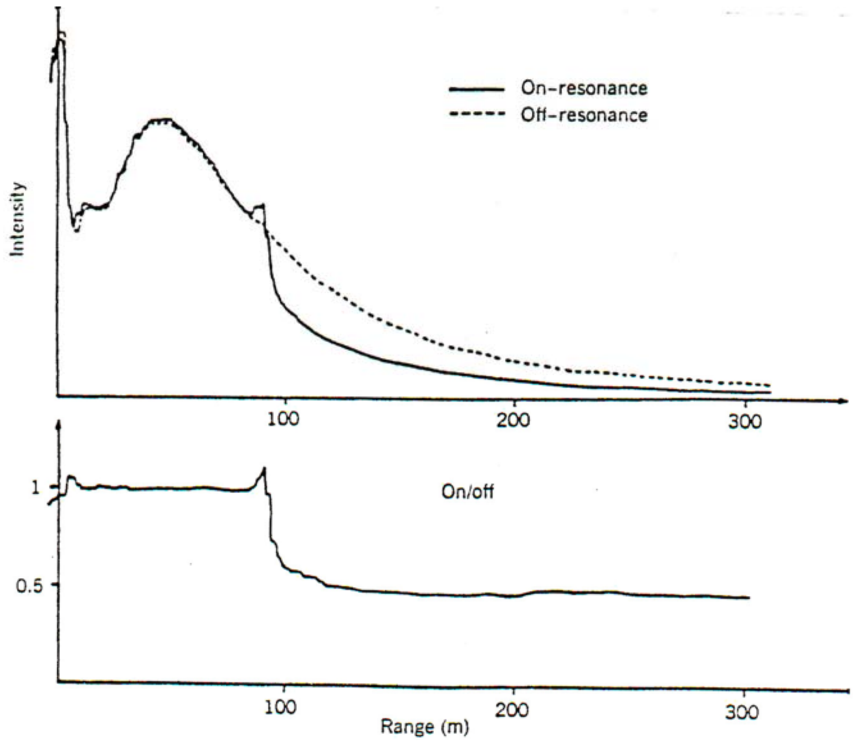
مراقبة الزئبق الذري

إن الزئبق معدن ثقيل يوجد على شكل ذرات، وهو يعد من أكثـر الملوثـات سـميةً. ينبعث الزئبق، في الغلاف الجوي من المعامل الكيميائية، ومن محطـات الطاقـة، ومـن أماكن حرق القمامة وجثث الموتى. لقد تبين أن محارق الجثث، تسبب التلـوث بـالزئبق

أكثر بكثير من محارق القمامة [19]. من ناحيةٍ أخـرى، يعـد الزئبـق مـن الغـازات الجيوفيزيائية الهامة، يستفاد منه فـي الاستـشعار عـن الخامـات الطبيعيـة، والطاقـة الجيوحرارية، والظواهر السيسمية والبركانية [30].

تختلف عمليات الكشف عن الذرات عنها بحالة الجزيئات. فبينما يترافق كـل انتقـال الكتروني في الجزيئات بعددٍ كبيرٍ من الانتقالات الاهتزازية- الدورانية مؤلفـةً شـريطاً طيفياً، فإن احتمال الانتقال الالكتروني في الذرات يتركز في خط طيفي واحـد أو علـى الأقل، بعددٍ قليلٍ من خطوط النظائر. إلا أن خطوط النظائر هذه تظهر كخط واحد، بسبب تعريض دوبلر، والتعريض الناتج عن التصادم [23]. لهذا السبب، تكون حدود الكشف في حال الزئبق الذري أصغر بقرابة 10^3 مرة عن حدود الكشف بحال الملوثات الجزيئية. فإذا كانت حدود كشف الملوثات الجزيئية من مرتبة *ppb*، فإن حدود كشف الزئبق من مرتبـة *ppt*، وهذا هو المطلوب عمليـاً، لأن التركيـز الطبيعـي للزئبـق يـساوي 0.25 *ppt* أو 2 ng/m^3 [31].

من المعروف، أن الخط التجاوبي للزئبق $6s\ ^1S_0 \leftrightarrow 6p\ ^3P_1$ يوافـق 253.65 *nm* [23]، ويتراكب مع امتصاص الأوكسجين الجزيئي في الغلاف الجوي [32]. لذلك، يقـاس هذا الخط مخبرياً، ومن ثم يسجل منحني DIAL. يبين الشكل –17، منحنيات ليدار الزئبق داخل التجاوب وخارجه ومنحني DIAL النسبي لسحابة زئبق صناعية، على بعد قرابـة 100 *m* من الليدار، حيث تظهر بوضوح الفلورة في المنحني داخل التجاوب. يستخدم غالباً في مجموعة DIAL الخاصة بمراقبة الزئبق، ليزر صباغ الكومارين-102، ذو العـصابة الضيقة في المجال 508 *nm*، بعد مضاعفة تواتره باستخدام بلورة BBO لا خطية [33].



الشكل (17) منحنيات ليدار الزئبق داخل التجاوب وخارجه لسحابة زئبق صنعيه على بعد يقارب 100 m. تلاحظ قمة إصدار الفلورة على المنحني داخل التجاوب [33].

الخـاتمـة

تعطي تقانة DIAL إمكانيات فريدة للكشف عن الملوثات في الغلاف الجوي وتحديـد تراكيزها والمواقع التي تصدر عنها. كما يمكن بهذه الطريقة رسم خرائط ثلاثيـة البعـد لتوزع الملوثات وحساب تدفقاتها الكلية من المناطق الصناعية ومناطق المدن. إضافة إلى ذلك تسمح هذه التقانة بمراقبة متحولات الرصد الجوي، وتلوث الغلاف الجوي من الفضاء الخارجي. إن استخدام طرائق DIAL في قياس تركيز الأوزون فـي الغـلاف الجـوي، وتغيراته اليومية والشهرية والسنوية تبعاً للارتفاع عند خطوط عرض مختلفـة، يعطـي

معلومات هامة عن الثقوب الأوزونية وحركيتها وتحديد أماكن نشوئها واضمحلالها. إن تطور تقانات الليزر والحاسوب، سيعطي تطوراً جديداً لهذه التقانة ويجعلها أقل كلفةً وأكثر سهولةً.

REFERENCES

1-Svanberg S. (1992) Atomic and Molecular Spectroscopy: Basic concepts and Practical Applications, 2nd ed., Springer Ser. At. Plasmas, Vol. 6. Springer – Verlag, Heidelberg.

2-Wolf, J. P., Köste, L. (1990) Remote detection of atmospheric pollutants using differential absorption Lidar technique. In Applied Laser Spectroscopy (W. Demtröder and M. Inguscio, Eds.), pp. 435 – 467 . Plenum, New York

3- Sigrist ed. M.W. (1994). Air Monitoring by Spectroscopic Techniques, John Wiely & Sons, Inc., New York.

4-Videla F.A., Schinca D.C., Tocho J.O. (2003). Alternative Method for Concentration Retrieval in Differential Optical Absorption Spectroscopy Atmospheric-Gas Pollutant Measurements. Appl. O pt.-LP, 42,No.18, 3653-61.

5-Edner, H., Ragnarson, P., Spännare, S., And Svanberg, S. (1993). Differential Optical Absorption Spectroscopy (DOAS) System For Urban Atmospheric Pollution Monitoring. Appl. Opt. 32, 326-333.

6- Kourtidis K., Ziomas I., Zerefos C., Gousopoulos A., Balis D., Tzoumaka P. (2000) Benzene And Toluene Levels Measured With A Commercial DOAS System In The Saloniki, Greece, Atm. Env. 34, 1471–1480.

7- Mount G., Rumberg B., Havig J., Lamb B., Westberg H., Yonge D.,Johnson K., Kincaid R. (2002) Measurement Of Atmospheric Ammonia At A Dairy Using Differential Optical Absorption Spectroscopy In The Midultaviolett. Atm. Env. 36, 1799–1810.

8- Mcdade I., Strong K., Haley C., Stegman J., Murtagh D., Llewellyn E. (2001) A Method For Recovering Stratospheric Minor Species Densities From The Odin/Osiris Scattered-Sunlight Measurement, Can. J. Phys.58, 891-1002.

9- Wagner T., Otten C., Peilsticker K., Pundt I., Platt U., (2000) DOAS Moonlight Observation Of Atmospheric NO_3 In The Arctic Winter, Geophys. Res. Lett. 27, 3441–3444.

10-Yoshii Y., Kuze H., Takeuchi N., (2003) Long-Path Measurement Of Atmospheric NO_2 With An Obstruction Flashlight And A Charge-Coupled-Device Spectrometer, Appl. Opt.-Lp, 42, No. 21, 4362-4368.

11- Demtroder W. (1996). Laser Spectroscopy, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany.

12- Fredriksson, K., Galle, B., Nystrom, K., and Svanberg, S. (1979) Lidar system applied in atmospheric pollution monitoring. Appl. Opt. 18,2998-3003.

13- Grant, W.B. (1987) Laser Remote Sensing Techniques. In Laser Spectroscopy And Its Applications (L. J. Radziemaski, R.W. Solarz, And J.A. Paisner, Eds.), Pp. 565-621 Dekker, New York.

14- Fredriksson, K., Lindgren, I., Svanberg, S., And Weibull, G. (1976). “Measurements Of The Emission From Industrial Smoke-Stacks Using Laser Radar Techniques, “ Rep. GIPR-121. Gutenberg Institute Of Physics, CTH, Gutenberg, Sweden.

15- Killinger, D. A., and Mooradian, A., Eds. (1983). Remote Sensing, Springer Ser. Opt. Sci Vol. 39. Springer- Verlag. Heidelberg.

16- Weibring P., Johansson Th., Edner H., Svanberg S., Sundnér B., Raimondi V., Cecchi G., Pantani L., (2001) Fluorescence Lidar Imaging Of Historical Monuments, Appl. Opt. 40, 6111.

17- Edner, H., Fredriksson, K., Sunesson, A., Svanberg, S., Uneus, L., and Wendt, W. (1987). Mobile remote sensing system for atmospheric monitoring. Appl. Opt. 26,4330-4338.

18-Fredriksson, K., Galle, B., Nystrom, K., and Svanberg, S. (1981). Mobile lidar system for environmental probing. Appl. Opt. 20,4181-4189.

19-Edner, H., Faris, G. W., Sunesson, A., Svanberg, S., Bjarnason, J. O., Kristmansdottir, H., and Sigurdsson, K.H. (1991) Lidar search for atomic mercury in Icelandic geothermal fields. J. Geophys. Res. 94D, 2977-2985.

20- Weibring P., Edner H., Svanberg S., Cecchi G., Pantani L., Ferrara R., Caltabiano T., (1998) Monitoring Of Volcanic Sulphur Dioxide Emissions Using Differential Absorption Lidar (DIAL), Differential Optical Absorption

Spectroscopy (DOAS) And Correlation Spectroscopy (COSPEC), Appl. Phys. B 67, 419.
21- Wayne, R.P. (1985). Chemistry of Atmospheres. Oxford Univ. Press (Clarendon), Oxford.
22- Molina, L. T., and Molina, M.J. (1986). Absolute absorption cross sections of ozone in the 185-to 350-nm region. J. Geophys. Res. 91D, 14501-14508.
23- Bernath P.F. (1995). Spectra of Atoms and Molecules, Oxford University Press, Inc.
24- Weibring .P, Edner H., Svanberg S., (2003) Versatile Mobile Lidar System For Environmental Monitoring. Appl. Opt.-Lp, 42, No.18, 3583-3594.
25- Fujii T., Fukuchi T., Goto N., Nemoto K., Takeuchi N., (2001) Dual Differential Absorption Lidar For The Measurement Of Atmospheric SO_2 of The Order Of Ppb, Appl. Opt.-Lp, 40, No. 6, 949-956.
26- Jones Jr.A.L., Deyoung R.J., Elsayed-Ali H.E., (2002) Compact Solid-State Dye Polymer Laser For Ozone Lidar Applications, Opt. Eng. 41, No.11, pp. 2951-2958.
27- Siegman, A.E. (1986). Lasers. University Science Books, Mill Valley, Ca.
28- Nayuki T., Fukuchi T., Cao N., Mori H., Fujii T., Nemoto K., Takeuchi N., (2002) Sum-Frequency-Generation System For Differential Absorption Lidar Measurement Of Atmospheric Nitrogen Dioxide, Appl. Opt.-Lp, 41, No.18, 3659-3664.
29- Cho J. Y. N., Newell R. E., Browell E. V., Grant W. B., Butler C. F., Fenn M. A., (2000
01) Observation Of Pollution Plume Capping By A Tropopause Fold, Geophys. Res. Lett., 28, 3243-3246.
30- Svanberg S., (2002) Geophysical Gas Monitoring Using Optical Techniques: Volcanoes, Geothermal Fields And Mines, Opt. Las. Eng. 37, 246–266.
31-Edner, H., Sunesson, A., and Svanberg, S. (1989). Atmospheric atomic mercury monitoring using differential absorption lidar techniques (I). Appl. Opt. 28, 921-930.
32-Herzberg G., (1950) Spectra of Diatomic Molecules, Van Nostrand Reinhold, New York.
33-Edner, H., Faris, G.W., Sunesson., A., and Svanberg, S. (1989). Atmospheric atomic mercury monitoring using differential absorption lidar techniques(II). Appl. Opt. 28.931-943.