Ćwiczenie O2: Techniki Lidarowe

prowadzący:

mgr Stanisław Chudzyński dr Wojciech Skubiszak Ten dokument jest przewodnikiem do ćwiczenia "Techniki Lidarowe".

Celem ćwiczenia jest poznanie realnych systemów lidarowych, zasady ich działania oraz zapoznanie się ze sposobem interpretacji i wykorzystania uzyskanych danych pomiarowych.

W **części pierwszej** omówione są podstawowe pojęcia i prawa oraz dwa zasadnicze (użyte w tym ćwiczeniu) typy lidarów wraz z niezbędnymi objaśnieniami.

W **części drugiej** jest opis ćwiczenia i przykłady opracowania danych eksperymentalnych.

ZNAJOMOŚĆ CZĘŚCI I, II ORAZ INSTUKCJI BHP JEST OBOWIĄZKOWA.

Część trzecia zawiera materiał uzupełniający; mamy nadzieję, że pomoże on w zrozumieniu tematyki poruszonej w obu pierwszych częściach. Tutaj zamieszczono również opis innych rodzajów lidarów.

Najważniejszą z punktu widzenia tego ćwiczenia publikację Warszawskiej Grupy Lidarowej można znaleźć w **części czwartej**. Zamieszczono w niej również wykaz wszystkich wykonanych w Pracowni Lidarowej Zakładu Optyki IFD UW prac doktorskich, magisterskich i licencjackich. Tutaj zamieszczono również **INSTUKCJĘ BHP** oraz aktualne normy zanieczyszczeń atmosfery.

Życzymy przyjemnej lektury. Uwagi krytyczne można kierować na adresy internetowe autorów.

SPIS TREŚCI

CZĘŚĆ I

- §1.1. Oddziaływanie światła z materią
- §1.2. Lidar

§1.3. Przeliczanie jednostek

CZĘŚĆ II

- §2.1. Wyznaczanie objętościowego współczynnika rozproszenia wstecznego β_{π}
- §2.2. Wyznaczanie koncentracji zanieczyszczeń na podstawie mapy otrzymanej za pomocą lidaru DIAL

CZĘŚĆ III (materiały uzupełniające)

- §3.1. Techniki pomiarowe zanieczyszczeń
- §3.2. Co to jest przekrój czynny?
- §3.3. Co to jest kąt bryłowy?
- §3.4. Prawo Lamberta Beera

CZĘŚĆ IV

- §4.1. Instrukcja BHP
- §4.2. Spis prac doktorskich i magisterskich
- §4.3. Publikacja "Lidarowe pomiary rozkładu koncentracji NO2 w rejonie Turowa"
- §4.4. Normy

CZĘŚĆ I

§1.1. Oddziaływanie światła z materią

Coraz częściej stosowane w badaniach zanieczyszczenia atmosfery lidary działają w oparciu o zjawisko rozproszenia światła¹. W ogólności wyróżnia się sześć najczęściej wykorzystywanych w technikach lidarowych procesów oddziaływania światła z materią: - rozpraszanie Mie;

- Tozpraszanie Mie,
- rozpraszanie Rayleigha;
- rozpraszanie rezonansowe;
 rozpraszanie ramanowskie;
- fluorescencie;
- absorpcję.

Procesy te odpowiadają różnym sposobom oddziaływania fotonów wyemitowanych w impulsie laserowym z cząsteczkami znajdującymi się w atmosferze (rys.1).



Rys. 1. Procesy oddziaływania światła z materią.

Kiedy rozmiary badanych cząsteczek są znacznie mniejsze od długości padającej fali mamy do czynienia z **rozpraszaniem Rayleigh'a**. Przekrój czynny (pojęcie przekrojów czynnych zostanie omówione później) na to rozpraszanie jest odwrotnie proporcjonalny do czwartej potęgi długości fali, więc można się spodziewać, że najbardziej efektywnie rozpraszane będą fale krótkie. Jednak ze względu na bardzo małe przekroje czynne rzędu 10⁻²⁷ cm² (w porównaniu z przekrojami czynnymi np. na

¹ Rozpraszanie – oddziaływanie światła z materią, którego wynikiem jest zmiana kierunku jego rozchodzenia się; rozpraszanie światła może zachodzić bez zmiany długości fali (elastyczne rozpraszanie światła) lub z jej zmianą (nieelastyczne rozpraszanie światła) – "Encyklopedia fizyki", PWN, Warszawa 1974.

rozpraszanie Mie, które są rzędu 10⁻⁸cm²) rozpraszanie Rayleigha ma dominujący wpływ jedynie w czystej atmosferze dla małych długości fal.

Wspomniane już **rozpraszanie Mie** zachodzi na cząstkach, których rozmiary są porównywalne (lub większe) z długością fali światła oddziałującego z nimi. Mogą to być cząstki kurzu, pyłu, aerozoli lub kropelki wody. Z punktu widzenia technik lidarowych, ze względu na duże przekroje czynne rozpraszanie to odgrywa dominującą rolę.

Najmniejsze znaczenie z rozproszeń elastycznych ma **rozpraszanie rezonansowe**, w którym padający foton powoduje wzbudzenie atomu lub cząsteczki, po czym następuje emisja zaabsorbowanego wcześniej fotonu bez zmiany jego długości fali. Bardziej prawdopodobne są tu bowiem przejścia bezpromieniste do stanu podstawowego, zachodzące podczas zderzeń międzycząsteczkowych (w troposferze ciśnienie wynosi ok. 1013 hPa). Termin "przejście bezpromieniste" oznacza że atom lub cząsteczka przechodzą do nowego stanu bez emisji lub absorpcji fotonu np. w wyniku zderzenia z innym atomem lub cząsteczką.

Rozpraszanie Ramana jest rozpraszaniem nieelastycznym ze względu na zmianę częstości fali w stosunku do promieniowania padającego. Rozróżnia się dwa typy rozpraszania Ramana. Pierwszy to rozpraszanie stokesowskie, w którym cząsteczki wzbudzone do poziomu wirtualnego wracają emitując foton do wyższego stanu rotacyjno – oscylacyjnego, co oznacza, że emitowany foton ma mniejszą energię, a długość jego fali przesuwa się w kierunku czerwieni w stosunku do fotonu przed rozproszeniem. Natomiast jeśli cząsteczka przed aktem absorpcji była już we wzbudzonym stanie rotacyjno – oscylacyjnym stanu podstawowego, wtedy może wystąpić rozpraszanie antystokesowskie, w którym emitowany foton jest bogatszy w energię, gdyż po emisji cząsteczka przechodzi do niższego poziomu oscylacyjno – rotacyjnego stanu podstawowego, a przesunięcie długości fali następuje w stronę błękitu. Dzięki przesunięciom długości fali fotonów odpowiadającym poziomom rotacyjno – oscylacyjnym, istnieje możliwość identyfikacji związków, gdyż ich widma Ramana są dobrze znane i charakterystyczne. Jednak ze względu na mały przekrój czynny lidar ramanowski ma zasięg rzędu kilkuset metrów.

Z fluorescencją mamy do czynienia gdy następuje wzbudzenie cząsteczki do poziomu elektronowego, bezpromieniste przejście do niższego poziomu oscylacyjnego cząsteczki i na koniec promieniste przejście cząsteczki do niższego poziomu elektronowego. Fluorescencja odgrywa dużą rolę między innymi przy lidarowych pomiarach roślin. Laser, umieszczany w samolocie, służy jako źródło światła indukujące fluorescencję, czyli wywołujące emisję promieniowania przez oświetlone z góry rośliny. Natężenie oraz rozkład spektralny docierającej do detektora fluorescencji pozwala na identyfikację roślin, a nawet określenie ich stanu "zdrowia".

Ostatnim omawianym procesem jest **absorpcja** (np. w obszarze widzialnym cząsteczka pochłaniając foton zostaje wzbudzona z niższego stanu elektronowego do wyższego). Jeśli wysłana wiązka światła została dostrojona do linii absorpcyjnej, przekrój czynny dla absorpcji będzie maksymalny, a następujące wtedy osłabienie sygnału rozproszonego do tyłu będzie proporcjonalne do ilości absorbenta, znajdującego się na drodze światła. Ma to podstawowe znaczenie w technice DIAL, która omawiana będzie w dalszej części instrukcji.

§1.2. LIDAR

§1.2.1. WSTĘP

LIDAR (LIght Detecting And Ranging) jest urządzeniem do zdalnego monitorownia atmosfery i zbiorników wody. W szerszym znaczeniu oznacza zdalne sondowanie za pomocą światła dowolnych obiektów również w skali laboratoryjnej. U podstaw tej techniki leży zjawisko rozpraszania światła.

Wyobraźmy sobie dobrze określoną wiązkę światła (np. laserowego) wysłaną w atmosferę. Jest ona scharakteryzowana przez następujące parametry: rozmiary poprzeczne i rozbieżność oraz położenie w przestrzeni, <u>skład spektralny</u>, <u>stan polaryzacji</u> i <u>moc</u> lub <u>energię</u> impulsu gdy jest to wiązka impulsowa. Zjawisko rozpraszania powoduje, że obserwujemy światło w kierunkach innych niż wysłana wiązka – pochodzące od tych obszarów atmosfery przez które ona przechodzi.

Parametry wiązki rozproszonej (lub wiązek!) są porównywane z odpowiednimi parametrami wiązki sondującej i stąd wyciągamy informację o stanie atmosfery. Rozważmy warstwę gazu o grubości I na którą z lewej strony pada równoległa wiązka światła.



Rys. 2

 $\beta_{\pi} = \sigma_{\pi} \cdot N; \quad \beta = \sigma \cdot N; \quad \alpha = \sigma_a \cdot N; (N - koncentracja molekuł, \sigma - przekrój czynny na dane oddziaływanie, <math>\alpha$ - współczynnik absorpcji, β - objętościowy współczynnik rozpraszania; dokładne znaczenie symboli, patrz część III, §2)

Natężenie światła przechodzącego opisuje równanie Lamberta – Beera, natomiast natężenie światła rozproszonego do tyłu (szczególnie interesujące dla techniki lidarowej) opisuje równanie lidarowe znacznie bardziej skomplikowane niż tutaj przedstawiona forma skrócona. Trzeba zauważyć, że straty w wiązce przechodzącej są wywołane tak absorpcją jak i rozpraszaniem oraz, że sygnał lidarowy jest tym silniejszy im większe rozproszenie.

Równanie lidarowe wiąże sygnał lidarowy z parametrami atmosfery, np. w β_{π} jest zawarta informacja o rodzaju aerozolu poprzez σ_{π} oraz o jego ilości poprzez N. Sygnał lidarowy zdobywamy eksperymentalnie, a odpowiedni algorytm winien umożliwić obliczenie N i określić rodzaj aerozolu. Analogiczna procedura obowiązuje dla każdego typu lidaru co jest zupełnie logiczne.

Wyróżnia następujące lidarów: się typy rozproszeniowe (jedno i wieloczęstotliwościowe) do badań aerozolu, DIAL (Differential Absorption Lidar) przeznaczone do poszukiwań zanieczyszczeń gazowych np. ozonu, NO₂, fluorescencyjne zwane FLIDAR (Fluorescence Lidar) o bardzo szerokim spektrum zastosowań i lidary koherentne zwane dopplerowskimi do mierzenia szybkości wiatru. Często pojawiają się nazwy wskazujące specyficzną własność urządzenia. Lidar ramanowski jak sama nazwa wskazuje działa na zasadzie detekcji widma ramanowskiego atmosfery.

§1.2.2. LIDAR ROZPROSZENIOWY

W uproszczeniu lidar zbudowany jest z lasera, odbiornika (teleskop + detektor promieniowania) oraz komputera do sterowania pomiarem i archiwizacji danych (rys.3). Zastosowanie lasera impulsowego daje możliwość generacji silnych impulsów o krótkim czasie trwania, co pozwala na uzyskiwanie lepszej czułości i przestrzennej zdolności rozdzielczej otrzymywanych wyników.



Rysunek 3. Schemat lidaru.

Za pomocą pryzmatu wiązka promieniowania laserowego kierowana jest w atmosferę, gdzie ulega rozproszeniu (we wszystkich kierunkach) na różnego rodzaju cząstkach. Ta część sygnału świetlnego, która uległa rozproszeniu do tyłu, zbierana jest za pomocą teleskopu i ogniskowana na fotodetektorze (najczęściej jest to fotopowielacz lub fotodioda). Sygnał z fotodetektora zamieniany jest na postać cyfrową przez przetwornik analogowo-cyfrowy, przesyłany do pamięci komputera a następnie analizowany przez dedykowany program komputerowy.

§1.2.3. LIDAR ABSORPCJI RÓŻNICOWEJ (DIAL – DIfferential Absorption Lidar)

Jego budowę, zasadę działania, a także sposoby zastosowania opisano na przykładzie lidaru DIAL typ 510 M, który znajduje się w Zakładzie Optyki IFD UW. Urządzenie to składa się z:

- nadajnika (laser, peryskop)
- odbiornika (teleskop, filtry, fotopowielacz)
- układu akwizycji danych (oscyloskop cyfrowy, komputer).

Blokowy schemat lidaru i rozmieszczenie podzespołów przedstawia rysunek 4. Zwraca uwagę rozbudowany nadajnik, który oprócz strojonego lasera zawiera układy powielania częstości optycznych (kryształy nieliniowe). Dzięki temu dysponujemy przestrajalnym źródłem promieniowania ultrafioletowego i niebieskiego, a nie tylko podczerwonego. Specjalny modulator (*Q-switch* – ang.), umożliwia skrócenie czasu akcji laserowej przy niezmienionej energii co znacznie podwyższa moc impulsu laserowego – praca z tzw. impulsem gigantycznym.



Rysunek 4. Blokowy schemat układów lidaru 510 M.

DIAL jest jedną z najdoskonalszych technik wykorzystywanych do badania zanieczyszczeń atmosfery, której celem jest selektywne wykrywanie obecności i określanie koncentracji różnego rodzaju substancji gazowych.

Zasadę działania tej techniki w oparciu, o którą działa także lidar 510M, ilustruje rysunek 5.

W celu uzyskania informacji selektywnej, która pozwoli określić rodzaj wykrywanych zanieczyszczeń, stosuje się tu na przemian dwie wiązki laserowe różniące się nieznacznie długością fali (do kilku nanometrów). Pierwsza z nich (λ_{on}) dostrojona jest do maksimum pasma absorpcji poszukiwanej substancji gazowej, stanowiącej zanieczyszczenie atmosfery, natomiast druga (λ_{off}) nie jest (lub jest bardzo słabo) przez tą substancję absorbowana i jako wiązka odniesienia pozwala określić zawartość aerozolu w danej chwili w atmosferze. Kryteria doboru obu długości fal(λ_{off} i λ_{on}):

- a. jak największa różnica wartości współczynników absorpcji dla obu fal; jednak warunki eksperymentu wymagają poszukiwania takich miejsc w widmie, gdzie lokalne zmiany tych współczynników są niewielkie co oznacza dσ/dλ = 0;
- jak najmniejsza różnica długości fal, aby zminimalizować różnicę współczynników rozpraszania wstecznego;
- c. bezwzględne unikanie kolizji wybranych linii z pasmami absorpcji innych związków obecnych w atmosferze.

Na rysunku 5a pokazano schematycznie badany teren. Rozchodząca się w atmosferze wiązka laserowa rozpraszana jest we wszystkich kierunkach. Część tego sygnału będąca wynikiem rozproszenia do tyłu dociera do teleskopu, gdzie jest ogniskowana i przez filtr optyczny przesyłana do fotopowielacza. Sygnał z fotopowielacza wizualizowany jest za pomocą oscyloskopu w postaci wykresu natężenia prądu w czasie (rysunek 5b). Laser wysyła krótkie impulsy światła o typowym czasie trwania 20 ns, co odpowiada rozdzielczości przestrzennej ok. 3 m. Rozdzielony w czasie sygnał echa dostarcza zatem informacji o cząstkach w atmosferze w obszarze oświetlonym wiązką. Kiedy koncentracja pyłu lub aerozolu zwiększa się, jak w przypadku smugi dymu A i B, rejestrowany sygnał wzrasta w stosunku do sygnału od czystej atmosfery. Sygnały echa na obu długościach fali mierzone są równocześnie w funkcji odległości. Jeśli gaz, który chcemy wykryć, znajduje się w obszarze

penetrowanym przez wiązkę świetlną (jak w smudze B na rys.5a), pojawia się różnica natężeń obu sygnałów (rys.5b).



Rysunek 5. Symulacja techniki DIAL. Przyjęto, że oba impulsy mają tę samą energię. Pominięto tło i szumy. a) - sytuacja terenowa, b) - unormowane sygnały lidarowe dla obu wiązek laserowych, c) – procedura wyznaczania koncentracji absorbera.

Wynika ona z tego, że rezonansowa wiązka światła λ_{on} jest wtedy znacznie silniej absorbowana. Po wykonaniu operacji matematycznych zaznaczonych na rysunku 5c otrzymamy równanie wyrażające koncentrację monitorowanej substancji poprzez wielkości sygnałów lidarowych i różnicę wartości przekrojów czynnych na absorpcję dla obu długości fal.

Obróbka sygnału lidarowego wymaga uwzględnienia poprawek, związanych z błędami systematycznymi i statystycznymi. Po ich uwzględnieniu dzięki odpowiedniemu programowi pomiary przeprowadzone dla różnych wiązek światła możliwe są do przedstawienia jako mapy obrazujące rozkład stężenia określonej substancji. W zależności od wykonanego pomiaru, sposobu prezentacji i obróbki, uzyskujemy pionowy rozkład koncentracji (wraz z wartościami uśrednionymi dla danej wysokości) lub rozkład przestrzenny w płaszczyźnie przemiatania wiązką laserową tzw. mapę.

Przykłady takich map przedstawione będą w dalszej części pracy.

Istnieje także możliwość uzyskania obrazu przestrzennego (3D) rozkładu zanieczyszczeń, jednak odbywa się to kosztem wydłużenia czasu pomiarowego.

Zasadę tworzenia mapy na podstawie kilkunastu kierunków wysyłania impulsów wyjaśnia rysunek 6.



Średnica wiązki wzrasta z 40 mm do 80 mm na przestrzeni 1,5 km! Objętość sondowana wzdłuż jednego kierunku wynosi 4 000 litrów! Objętość sondowana detektorami punktowymi (np. Horiba system) wynosi zaledwie 0,5 litra przy tym samym czasie uśredniania.

Rysunek 6. Schemat tworzenia mapy.

Mając pomiary wykonane wzdłuż wielu kierunków dokonuje się interpolacji w obszarach nie sondowanych wiązką lasera.

Zawartość wykrywanych w atmosferze substancji gazowych wyraża się w *ppm* (part per million, czyli 1:10⁶) w przypadku emisji oraz w *ppb* (part per billion, czyli 1:10⁹) w przypadku imisji. Wyrażone w ten sposób koncentracje są równoważne z dokładnością do rzędu wielkości *mg/m*³ (*ppm*) lub $\mu g/m^3$ (*ppb*). Dokładniejsze przeliczenie wymaga uwzględnienia parametrów związanych z temperaturą, ciśnieniem i masą cząsteczkową składników atmosfery.

Poniżej podajemy wyprowadzenia wzorów na przeliczenie jednostek.

§1.3. PRZELICZENIE JEDNOSTEK W UKŁADACH GAZOWYCH

§1.3.1. Symbole pomocnicze:

Α	_	liczba Avogadra (liczba molekuł w 1 <i>molu</i> materii) w [mol^{-1}]
μ	_	masa molowa w [<i>g</i> · <i>mol</i> ⁻¹]
m _{cz}	_	masa jednej cząsteczki w [g]
т	_	masa gazu (w objętości V) w [g]
Ν	_	koncentracja molekuł gazu (monitorowanego) w [m ⁻³]
No	_	koncentracja molekuł powietrza w [m ⁻³]

Wzory pomocnicze:

$$m_{cz} = \frac{\mu}{A}, \qquad (1)$$

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T = \frac{m}{\mu} \cdot R \cdot T ; \qquad (2)$$

gdzie p, V, i T znane symbole, R – stała gazowa, n – ilość moli gazu (masa gazu w molach). Np. masa powietrza w objętości V (p, T zadane) to:

$$m = N_0 \cdot V \cdot m_{cz0} = N_0 \cdot V \cdot \frac{\mu_0}{A}; \qquad (3)$$

gdzie, μ_o – masa molowa (średnia) powietrza, m_{cz0} – (średnia) masa cząsteczki powietrza.

§1.3.2. Definicja koncentracji w jednostkach "ppm".

$$c[ppm] = \frac{N}{N_0} \cdot 10^6; \tag{4}$$

gdzie N_o jest zależne od p i T. N_o oznacza całkowitą koncentrację molekuł powietrza – wszystkich składników atmosfery.

Obliczymy No wykorzystując (2) i (3):

$$p \cdot V = \frac{m}{\mu_0} \cdot R \cdot T = N_0 \cdot V \cdot \frac{\mu_0}{A} \cdot \frac{1}{\mu_0} \cdot R \cdot T, \text{ skąd po przekształceniach mamy:}$$

$$N_0 = \frac{p \cdot A}{R \cdot T};$$
(5)

Jak widać, jest to jednostka koncentracji względnej. Chodzi o odniesienie do parametrów atmosfery (ciśnienia i temperatury, a tym samym koncentracji całkowitej) w chwili pomiaru. O ile łatwo jest te dane zdobyć przy pomiarach punktowych (termometr i barometr wystarczą!) o tyle przy pomiarach zdalnych, a w szczególności lidarowych jest to pewien problem. Rozwiązuje się go z pomocą meteorologów lub za pomocą... technik lidarowych.

§1.3.3. Zamiana jednostek.

Koncentracja gazu (zanieczyszczenia) w [µg/m³] jest niczym innym jak masą właściwą tego gazu.

$$c\left[\frac{\mu g}{m^{3}}\right] = \frac{N \cdot V \cdot m_{cz} \left[\mu g\right]}{V} = N \cdot m_{cz} \left[\mu g\right] = N_{0} \cdot c\left[ppm\right] \cdot 10^{-6} \cdot m_{cz} \left[\mu g\right] =$$
$$= c\left[ppm\right] \cdot \frac{p \cdot A}{R \cdot T} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\mu}{A} \cdot 10^{6} = c\left[ppm\right] \cdot \frac{p \cdot \mu}{R \cdot T},$$

gdzie kolejno wykorzystano wzór (4), (5), (1), a czynnik 10^6 pochodzi stąd, że masa molowa z definicji wyrażona jest w [*g/mol*], a tu potrzebna jest w [*µg/mol*]. Zatem nasz wzór ma postać:

$$c\left[\frac{\mu g}{m^3}\right] = c\left[ppm\right] \cdot \frac{p \cdot \mu}{R \cdot T},\tag{6}$$

gdzie *p* i *T* w jednostkach układu SI, μ w [*g/mol*], R = 8,31 [*J/K·mol*]. Stała gazowa podana jest z dokładnością do trzech cyfr znaczących.

Ponieważ 1 [ppm] = 10³ [ppb], to można ten wzór napisać jak niżej:

$$c\left\lfloor\frac{\mu g}{m^3}\right\rfloor = c\left[ppb\right] \cdot 10^{-3} \cdot \frac{p \cdot \mu}{R \cdot T}$$
(7)

Koncentracja w jednostkach [*ppm*] i [*ppb*] to koncentracja względna. Ma ona swoją zaletę, ponieważ przykładowo 5 $\mu g/m^3$ chloru w troposferze i stratosferze to nie to samo. Koncentracja w [*ppb*] w obu sytuacjach będzie odpowiednio 1,7 i 5,2! (μ = 70,9 *g/mol* dla Cl₂, ciśnienie atmosferyczne odpowiednio 10⁵ oraz 0,25·10⁵ *Pa*, temperatura 288 i 222 *K*).

<u>Uwaga!</u>

Przy wyprowadzaniu tych wzorów traktowano atmosferę jako jednorodny gaz o fikcyjnej masie molowej μ_o . Jednak można wykazać, że otrzymane zależności są prawdziwe dla mieszaniny gazów. (We wzorach ostatecznych μ_o nie występuje). Można to wykonać we własnym zakresie.

Jeżeli w powyższych rachunkach są niedokładności/niejasności prosimy o ich wskazanie w opisach.

CZĘŚĆ II

§2.1. Wyznaczanie objętościowego współczynnika rozpraszania wstecznego β_{π} .

W pierwszej części ćwiczenia zapoznamy się z prostym, laboratoryjnym, jednoczęstotliwościowym, mono-statycznym lidarem do obserwacji aerozolu. Schemat lidaru i doświadczenia pokazuje poniższy rysunek. Bez trudu zauważymy, że jak każdy lidar tak i ten z trzech składa się części:

- 1. nadajnika (tutaj laser azotowy, λ = 337,1 *nm*),
- układu detekcyjnego (w jego skład wchodzi m.in. teleskop i detektor światła u nas fotopowielacz RCA 931A),
- 3. układu akwizycji danych (tutaj oscyloskop cyfrowy).

Rola każdego podukładu jest intuicyjnie zrozumiała, a szczegóły będzie można poznać w trakcie ćwiczenia.



Rys. 7

Zadaniem studenta jest zapoznanie się z budową lidaru, wykrycie chmury wodnej (obłoku) i obserwacja jego zachowania oraz wyznaczanie objętościowego współczynnika rozproszenia wstecznego β_{π} dla obłoku. Zastosowano tutaj różnicową technikę pomiaru. Na drodze wiązki lasera znajduje się sztuczny obiekt (siatka) o znanym współczynniku rozproszenia wstecznego (i małej absorpcji) i oczywiście badany obłok. Jeżeli zarejestrujemy sygnał od obu obiektów to z łatwością wyznaczymy β_{π} obłoku. Sygnał lidarowy S_{wo} od chmury wodnej w naszym eksperymencie ma postać jak poniżej.

W tym wzorze występują charakterystyczne czynniki: η to czułość spektralna detektora, k – wzmocnienie wzmacniaczy, g – czynnik geometryczny uwzględniający różne niedoskonałości układu lidarowego (w tym błędy eksperymentatora – studenta), P – rozkład mocy w impulsie laserowym, β_{π} – objętościowy współczynnik rozproszenia wstecznego obłoku,

$$S_{wo} = \eta \cdot k \cdot g \cdot P \cdot e^{-\varepsilon \cdot R} \cdot \beta_{\pi} \cdot l \cdot \frac{A}{R^{2}} \cdot e^{-\varepsilon \cdot R} =$$
$$\eta \cdot k \cdot g \cdot P \cdot e^{-2\varepsilon R} \cdot \beta_{\pi} \cdot l \cdot \frac{A}{R^{2}} \approx \eta \cdot k \cdot g \cdot P \cdot \beta_{\pi} \cdot l \cdot \frac{A}{R^{2}}$$

A – powierzchnia zwierciadła głównego teleskopu, ε – ekstynkcja atmosfery między lidarem a obszarem sondowanym, R – odległość lidar - obłok, l – grubość obłoku. Tylko ten ostatni czynnik jest "nowością" wynikającą z warunków laboratoryjnych. Czynnik A/R^2 to kąt bryłowy w jakim zbieramy światło rozproszone. Wreszcie warto zwrócić uwagę na 2 w wyrażeniu $e^{-2\cdot\varepsilon \cdot R}$. TRZEBA UMIEĆ UZASADNIĆ JEJ POCHODZENIE!

Omawiany wzór nie jest identyczny z podanym w publikacji lub na wykładzie z dwóch powodów: obiekt sondowany jest mniejszy od długości przestrzennej impulsu laserowego oraz ekstynkcja w laboratorium na dystansie 15 m jest naprawdę zaniedbywalna nawet w trakcie sprzątania.

Podobne równanie lidarowe napiszemy dla siatki (obiektu referencyjnego, odniesienia):

$$S_0 \approx \eta \cdot k \cdot g \cdot P \cdot B_{\pi} \cdot \frac{A}{R_0^2}$$
, jednak tutaj zamiast iloczynu $\beta_{\pi} \cdot l$ musimy użyć

"powierzchniowego" współczynnika rozproszenia wstecznego B_{π} ponieważ rozproszenie ma miejsce tylko na powierzchni siatki. Stąd wymiar B_{π} jest [sr^{-1}], gdy β_{π} ma wymiar [$m^{-1} \cdot sr^{-1}$]. B_{π} musi zostać podany przez asystenta!

Podzielmy oba równania stronami i otrzymamy wzór roboczy:

$$\frac{S_{wo}}{S_0} = \left[\frac{R_0}{R}\right]^2 \cdot \frac{\beta_{\pi} \cdot l}{B_{\pi}};$$

Aby znaleźć β_{π} musimy wyznaczyć wielkość sygnałów lidarowych S, odległości do obiektów *R* oraz znać wartość *l* i B_{π} .

Zatem przystępujemy do akcji i w jej wyniku otrzymujemy wydruki pomiarowe w formie jak niżej – są to obrazy ekranu oscyloskopu cyfrowego. Mamy poniżej trzy przykłady: W1, W2 i W3.

Przykładowe rezultaty pomiarów różnią się między sobą. I tak W1 reprezentuje średnią z 64 pomiarów (mode average). W2 to pomiar pojedynczy (mode sample). Wreszcie W3 to jednoczesny zapis 256 pomiarów dokonany tak, że widzimy tylko obwiednię wszystkich zapisów (mode envelope). Ten ostatni rodzaj pomiaru umożliwia pewne wnioskowanie statystyczne o własnościach obłoku. Widać, że rozrzut pomiaru sygnału odniesienia jest znacznie mniejszy niż rozrzut pomiaru echa od obłoku. **UZASADNIJ DLACZEGO.**

Na każdym wydruku znajduje się informacja o czułości oscyloskopu, szybkości podstawy czasu, sposobie mierzenia i oczywiście rezultaty pomiarów. Obserwujemy trzy znaczące piki. Licząc od lewej, pierwszy jest tak zwanym impulsem prowadzącym gdyż powstaje w momencie błysku lasera. Od tego impulsu mierzymy czas; można powiedzieć że na osi czasu w tym miejscu zaczyna się eksperyment. Następny pik pochodzi od siatki, to nasz sygnał odniesienia S_o. Musimy zmierzyć jego wielkość. Należy zauważyć, że zero na osi napięć czyli sygnałowej (pionowej) znajduje się u góry ekranu tak jak pokazuje znak strzałki z lewej. Odczytu napięcia dokonuje się za pomocą skali podanej na wydruku, wynosi ona 200 mV na dużą działkę (czyli 40 mV na najdrobniejszą). Zatem na W1 znajdujemy S_o = 260 mV. Nie należy podawać zbyt "dokładnych" wartości. Dokładność odczytu nie przekracza 1/4 małej działki czyli ok. 10 mV. Trzeci pik pochodzi od obłoku i również mierzymy jego wielkość.



W3

Jednak tutaj jakość pomiaru jest lepsza. Mianowicie po raz drugi w tym eksperymencie zastosowano technikę różnicową. Najpierw zarejestrowano i zapamiętano sygnał lidarowy przy braku obłoku co wyznaczyło poziom zera! Następnie wykonano pomiar i oczywiście S_{wo} będzie różnicą między napięciem w ekstremum, a tak wyznaczonym zerem. Akurat tutaj "zero eksperymentalne" prawie pokrywa się z "zerem oscyloskopu". Musimy też zmierzyć odległości od lidaru do mierzonych obiektów. Oś czasu (pozioma) ma podaną skalę 10 ns na dużą działkę. To pozwala na odczyt opóźnienia echa siatki względem impulsu prowadzącego. Opóźnienie sygnału od obłoku "oblicza" oscyloskop automatycznie dokonując pomiaru czasu między dwoma ustawionymi przez uczestników kursorami. Dla W1 czas ten oznaczony jako Δ wynosi 59 ns. Znając opóźnienia sygnałów wyznaczamy odległości badanych obiektów od lidaru. **POMYŚL JAK?**

§2.2. Wyznaczanie koncentracji zanieczyszczeń na podstawie mapy otrzymanej za pomocą lidaru DIAL

Typowa mapa zanieczyszczeń, otrzymana za pomocą lidaru typu DIAL jest przedstawiona na rys. 9.





Na rysunku przedstawiono przestrzenny rozkład koncentracji SO₂. Kolor oznacza wartość koncentracji (w prawym górnym rogu umieszczono barwną skalę). Na obu osiach zaznaczono odległości od lidaru w metrach (pionowo – do przodu, poziomo – lewo/prawo od lidaru). Linie ciągłe oznaczają kierunki pomiarów.

Odczytajmy przykładowe wartości koncentracji. Na rys. 9 zaznaczono trzy punkty:

- 1 granica między blado i ciemno niebieskim,
- 2 koncentracja maksymalna,
- 3 granica między zielonym i żółtym.

Na pasku skali należy odnaleźć barwy odpowiadające punktom pomiarowym i odczytać (w *mm*) ich położenie licząc od zera. Cały pasek ma długość 22 *mm*. Oznacza to, że 22 *mm* odpowiada koncentracja 63 *ppb*. Granica między blado i ciemno niebieskim leży w odległości 2 *mm* od zera, a granica między zielonym i żółtym w odległości 6 *mm*. Korzystając z proporcji wyznaczamy koncentracje:

stąd:

$$c_1 = \frac{2 \cdot 63}{22} \left[\frac{mm \cdot ppb}{mm} \right] = 5,73 \, ppb$$

Postępując analogicznie obliczamy koncentrację c_3 – jest ona równa 17,2 *ppb.* c_2 odczytujemy bezpośrednio z paska skali – jest ona równa 63 *ppb.*

Należy przeliczyć *ppb* na $\mu g/m^3$. Przyjmujemy: R = 8,31 $J \cdot K^{-1} \cdot mol^1$, T = 293 K, p = 101300 *Pa* i μ = 64 $g \cdot mol^1$. Korzystając ze wzorów (6) i (7) (część I, §3):

$$c\left[\frac{\mu g}{m^3}\right] = c\left[ppb\right] \cdot 10^{-3} \cdot \frac{p \cdot \mu}{R \cdot T};$$

$$c\left[\frac{\mu g}{m^{3}}\right] = c[ppb] \cdot \frac{101300}{8,31 \cdot 293} \cdot \mu \cdot 10^{-3} = c[ppb] \cdot 41, 6 \cdot 10^{-3} \cdot \mu,$$

i dla SO₂ otrzymujemy następujący przelicznik jednostek:

$$c_{SO_2}\left[\frac{\mu g}{m^3}\right] = c[ppb] \cdot 41, 6 \cdot 64 \cdot 10^{-3} = c[ppb] \cdot 2,6624$$

Z uwagi na dokładność danych doświadczalnych, nie przekraczających 1%, współczynnik przeliczeniowy zaokrąglamy do trzech cyfr znaczących. Z tych samych powodów wzięliśmy tylko trzy cyfry znaczące w przypadku stałej gazowej.

$$c_{SO_2}\left[\frac{\mu g}{m^3}\right] = c[ppb] \cdot 2,66$$

Ponieważ dokładność odczytu z mapy wynosi co najwyżej 0,5 *mm*, wyniki zaokrąglamy do trzech, dwóch lub nawet jednej cyfry znaczącej. W podanym przykładzie 0,5 *mm* przy odczycie 2 *mm* daje błąd względny 25%, a przy odczycie 22 *mm* – zaledwie 2,5%.

 $c_1 = 6 \text{ ppb} = 15,96 \ \mu g/m^3 \approx 16 \ \mu g/m^3;$ $c_2 = 63,0 \ \text{ppb} = 167,58 \ \mu g/m^3 \approx 168 \ \mu g/m^3;$ $c_3 = 17 \ \text{ppb} = 45,22 \ \mu g/m^3 \approx 45 \ \mu g/m^3.$

Ostatecznie otrzymujemy:

C ₁	6 ppb	16 µg/m³
C ₂	63,0 <i>ppb</i>	168 µg/m³
C 3	17 ppb	45 µg/m³

CZĘŚĆ III

MATERIAŁY UZUPEŁNIAJĄCE

§3.1. Techniki pomiarowe zanieczyszczeń

Historycznie, najwcześniejszymi sposobami wykrywania różnego rodzaju substancji gazowych w powietrzu były metody organoleptyczne, m.in. zmysł węchu. Ich czułość, a przede wszystkim obiektywność, jest jednak ograniczona, nie mówiąc już o tym, że w przypadku substancji bezbarwnych i bezzapachowych są one w ogóle nieprzydatne. Dalej omówimy nowoczesne techniki pomiarowe.

§3.1.1. Metody polegające na analizie chemicznej próbek

Do metod ciągle udoskonalanych i szeroko rozpowszechnianych do dzisiaj należą metody chemiczne, polegające na odpowiednim wykorzystywaniu określonych reakcji chemicznych.

Jedną z najstarszych metod określania występowania ozonu jest reakcja utleniania jonów jodu w roztworze co obrazuje poniższa reakcja:

$$2H^+ + 2I^- + O_3 \implies I_2 + O_2 + H_2O$$

W wyniku tej reakcji bezbarwne jony l⁻ przechodzą w obojętny jod l₂ o brązowym zabarwieniu. Zmiana koloru świadczy więc o istnieniu ozonu w badanej próbce.

Inną metodą, o wiele dokładniejszą jest elektrochemiczna metoda z wykorzystaniem jodku potasu (KI). Jeżeli przez wodny roztwór jodku potasu przepuścimy strumień powietrza zawierającego ozon to z roztworu wydzieli się czysty jod cząsteczkowy co obrazuje poniższa reakcja:

$$2\mathsf{KI} + \mathsf{O}_3 + \mathsf{H}_2\mathsf{O} \ \Rightarrow \ 2\mathsf{KOH} + \mathsf{I}_2 + \mathsf{O}_2$$

Natomiast jeśli w roztworze tym zanurzymy dwie elektrody i przyłożymy niewielkie napięcie, to w pobliżu katody utworzą się jony jodu przemieszczające się do anody, gdzie reaktywują się cząsteczki jodu. Jeśli uniemożliwimy powrót nowo utworzonych cząsteczek jodu do roztworu, a spowodujemy osadzenie się ich na anodzie to natężenie przypływającego przez roztwór prądu będzie proporcjonalne do zawartości ozonu.

Metody chemiczne są wprawdzie bardzo proste, mają jednak ten zasadniczy niedostatek, że utlenianie jodku potasu zachodzi nie tylko w wyniku reakcji z ozonem, lecz również z innymi utleniaczami, obecnymi w powietrzu atmosferycznym, takimi jak NO₂ lub SO₄. Dla uniknięcia sztucznego zawyżenia gęstości ozonu, spowodowanego obecnością np. dwutlenku siarki, stosuje się w ozonometrze filtr z porolitu, zawierającego piasek kwarcowy i wełnę szklaną, nasyconą trójtlenkiem chromu.

Z kolei metoda chemiluminescencji łączy ze sobą metody chemiczne i fizyczne. Polega ona na wykorzystaniu reakcji chemicznych, w których wyniku powstają związki zdolne do wyemitowania światła. W pierwszym etapie mamy do czynienia z reakcją chemiczną, w wyniku której powstają związki zdolne do wyemitowania światła (związki w stanie wzbudzonym optycznie). Charakterystyczne promieniowanie w danym zakresie widmowym świadczy o istnieniu poszukiwanej substancji. Przykładem może być rozpowszechniona metoda wykrywania NO, który poddany działaniu ozonu wchodzi w następujące reakcje:

$$NO + O_3 => NO_2^* + O_2$$

 $NO_2^* => NO_2 + hv (590 - 3000 nm.)$

Czułości osiągane powyższymi metodami można też uzyskać stosując metodę fluorescencyjną, polegającą na wzbudzeniu próbki światłem o odpowiednio dobranej długości fali, a następnie obserwowaniu fluorescencji przesuniętej w kierunku fal dłuższych. W przypadku SO₂, gdzie technika ta jest szeroko stosowana, do wzbudzenia stosuje się linię 213,8 nm (lampa cynkowa) lub 228,8 nm (lampa kadmowa), zaś fluorescencję obserwuje się w zakresie od 220 do 400 nm.

§3.1.2. Zdalne pomiary

1. **DOAS**

Do zdalnych metod fizycznych badania atmosfery zaliczamy metodę wykorzystującą zjawisko absorpcji, zwaną DOAS (Differential Optical Absorption Spectroskopy) (rys. 4). Różnicowa optyczna spektroskopia absorpcyjna DOAS jest techniką pomiarową szczególnie nadającą się do pomiarów stężeń zanieczyszczeń gazowych powietrza.



Rys. 4. Schemat działania monostatycznego systemu DOAS.

Polega ona na pomiarze całkowitej absorpcji przez określony gaz, przy odpowiednio dobranych dwóch długościach fal promieniowania (jedna pochłaniana przez szukaną substancję i odniesienia). Wiązka światła wysyłana jest do atmosfery w żądanym kierunku (bliskim poziomego). Pomiar odbywa się na dystansie nawet do kilkunastu kilometrów i polega na analizie otrzymanego widma absorpcyjnego. Źródłem wiązki świetlnej jest wysokociśnieniowa lampa ksenonowa, emitująca promieniowanie z zakresu światła ultrafioletowego poprzez widzialne, aż do bliskiej podczerwieni. Lampa umieszczona jest w ognisku zwierciadła parabolicznego nadajnika. Tak uformowana wiązka po odbiciu od reflektora zwrotnego trafia na zwierciadło paraboliczne odbiornika, gdzie jest ogniskowana na końcówce światłowodu. Wspomnianym światłowodem światło podąża do jednostki centralnej systemu pomiarowego – optoanalizatora. W swojej obudowie mieści on spektrometr sprzężony z komputerem, wyjścia cyfrowe i analogowe oraz układ zasilania w energię elektryczną. Spektrometr jest końcowym adresatem powracającej wiązki świetlnej. Stosując w nim siatkę dyfrakcyjną mamy

możliwość selekcji tych zakresów promieniowania, które odpowiadają mierzonym zanieczyszczeniom powietrza.

Koncentrację badanej substancji (ilość cząsteczek w jednostce objętości) w technice DOAS określa się na podstawie analizy zmiany natężenia wiązek w wyniku absorpcji opisanej prawem Lamberta – Beera:

$$c = \frac{\ln \frac{I_{OFF}}{I_{ON}}}{\Delta l \Delta \sigma}$$
(1)

gdzie:

 I_{on} to natężenie fali absorbowanej, I_{off} – natężenie fali nieabsorbowanej, Δl - droga absorpcji, $\Delta \sigma$ (cm²) - różnica przekrojów czynnych na absorpcję.

Główną wadą stosowania tej metody jest fakt, iż koncentracja ta jest uśredniona po dużym obszarze Δl . Natomiast zaletą jest możliwość uzyskania bardzo wysokich czułości (do 1ppt = 10⁻¹²).

2. SPEKTROMETR DOBSONA

Metoda spektrofotometryczna jest stosowana w urządzeniach światowej sieci monitoringu całkowitej ilości ozonu w atmosferze. Pierwszy spektrofotometr w 1924 roku zbudował Dobson, a pomiar względnego natężenia promieniowania słonecznego w dwóch różnych długościach fal opierał się na wykonaniu zdjęć fotograficznych Słońca. W miarę rozwoju płyta fotograficzna zastąpiona została fotopowielaczem. Pomiar polega na zredukowaniu natężenia promieniowania słonecznego fali o większej długości, dla której współczynnik absorpcji przez ozon jest mniejszy, do poziomu natężenia krótszej długości fali z danej pary. Osłabienie to uzyskuje się za pomocą klina optycznego, którego położenie odpowiada określonemu osłabieniu wiązki. Wartość

	Pary	Średnia
	fal	długość
		fali [<i>nm</i>]
А	krótka	305,50
А	długa	325,40
В	krótka	308,80
В	długa	329,10
С	krótka	311,45
С	długa	332,40
D	krótka	317,60
D	długa	339,80

Tabela 1. Długości fal stosowane w spektrofotometrze Dobsona.

osłabienia odczytuje się ze sprzężonej z klinem optycznym tarczy rejestracyjnej. Znając wzajemne osłabienie wiązek, można wyznaczyć ilość ozonu. Pomiary koncentracji ozonu tą metodą wykonywane są w czterech parach długości fal A, B, C, D zestawionych powyżej (tabela 1).

3. LIDARY

Zdalne pomiary wykonuje się oczywiście również lidarem. Dwa rodzaje lidarów wykorzystanych w tym ćwiczeniu zostały opisane wcześniej w części I, §2. Poniżej zamieszczamy krótki przegląd stosowanych lidarów.

- Lidar rozproszeniowy jest najbardziej rozpowszechnionym typem lidaru przystosowanym głównie do badania różnego rodzaju aerozoli, dymów kominowych, deszczy czy chmur, pyłu wulkanicznego. Jedynym wykorzystywanym tu procesem jest rozproszenie, a w szczególności rozproszenie Mie ponieważ obiektami rozpraszającymi są przede wszystkim duże cząstki. Układ wysyła silne impulsy laserowe, a następnie rejestruje stosunkowo silny sygnał powrotny będący wynikiem rozproszenia na aerozolach, pyłach czy chmurach znajdujących się w atmosferze (dokładniej część I, §2).
- Lidar absorpcji różnicowej typu DIAL umożliwia selektywne wykrywanie i określanie koncentracji związków chemicznych występujących w atmosferze w postaci par lub gazów (dokładniej, patrz część I, §2).
- Lidar ramanowski pozwala na selektywne wykrywanie substancji gazowych stanowiących zanieczyszczenie atmosfery i ich koncentracji np.: SO₂, NO, CO, H₂S, CH₄, C₂H₂. Wykorzystuje on zjawisko przesunięcia długości fali promieniowania rozproszonego na cząsteczkach gazu w wyniku nieelastycznej wymiany energii między cząsteczką i padającym fotonem (rozproszenie Ramana). Ponieważ przesuniecie to jest różne dla różnego typu cząsteczek i dla każdej z nich dokładnie znane, możemy jednoznacznie zidentyfikować te cząsteczki. Na podstawie analizy widma światła rozproszonego, pojedynczy impuls laserowy jest już w stanie dostarczyć nam pełnej informacji o wszystkich obecnych w atmosferze substancjach gazowych. Zaletą tego lidaru jest bardzo prosta metoda jego kalibracji polegająca na porównaniu natężenia linii ramanowskich różnych substancji gazowych z natężeniem linii odpowiadającej cząsteczce azotu, czyli gazu o dokładnie znanej zawartości procentowej w atmosferze. Jednakże ze względu na bardzo mały przekrój czynny na rozpraszanie ramanowskie zasięg lidaru jest stosunkowo niewielki (do kilkuset metrów), a znacznie zwiększa się tylko w stosunku do podstawowych składników atmosfery, takich jak N₂, O₂, H₂O. Z tego powodu nadają się one do detekcji zanieczyszczeń o koncentracji rzędu ppm, a pomiary w większości przypadków trzeba wykonywać w nocy ze względu na zbyt silne tło światła słonecznego.
- Lidar fluorescencyjny wysyła impulsy laserowe o długości fali dopasowanej do przejścia absorpcyjnego badanej substancji. Skuteczność lidaru zależy od wydajności fluorescencji. Lidary te są użyteczne do badania pokrywy roślinnej oraz badań górnych warstw stratosfery. Nie nadają się one natomiast do badań w troposferze, gdzie procesy zderzeniowego wygaszania wzbudzonych cząsteczek eliminują fluorescencję.
- Lidar dopplerowski działa w oparciu o pomiar dopplerowskiego przesunięcia częstości promieniowania laserowego, rozproszonego przez poruszające się z prędkością wiatru cząsteczki aerozolu. Może on służyć zatem do pomiaru prędkości wiatru, a także dynamiki różnego rodzaju turbulencji atmosferycznych. Bardzo nieznaczne przesunięcia częstości stwarzają dość istotne problemy pomiarowe. Nawet dla bardzo silnego wiatru o prędkości 100 km/h przesunięcie linii widmowej w bliskim nadfiolecie jest rzędu zaledwie 100 MHz. Dlatego lidary dopplerowskie wymagają laserów o bardzo wąskiej i stabilnej linii co umożliwia heterodynową detekcję polegającą na mieszaniu sygnałów i pomiarze częstości różnicowej. W lidarach tego typu często wykorzystuje się laser na CO₂, który ma dużą moc oraz wąską i stabilną linię.



§3.2. Co to jest przekrój czynny?

Wyobraźmy sobie walec o podstawie S i długości *l*. Znajduje się w nim pewna ilość obiektów (atomów, molekuł, cząstek – jednym słowem cokolwiek) o koncentracji *N* [*m*⁻³] oddziaływujących ze światłem (patrz część I, §1). Na lewą podstawę pada równoległa wiazka światła.

Ubywa z niej fotonów np. na skutek rozpraszania. <u>Ilość "znikających" fotonów</u> w elementarnej warstwie o grubości *l* jest proporcjonalna do ilości padających fotonów, do koncentracji atomów *N* oraz do *l* i *S*, a współczynnik proporcjonalności nazywa się <u>przekrojem czynnym</u> σ . Jest on miarą prawdopodobieństwa rozproszenia fotonu o określonej długości fali przez jeden atom (molekułę itd.) określonego rodzaju.

Wymiar tej wielkości jest $[m^2]$ – trochę to dziwne, ale bez trudu daje się udowodnić poprzez analizę wymiarową równania opisującego ubytek fotonów: $\frac{\Delta n_f}{n_s} = \sigma \cdot l \cdot S$; gdzie

 n_f liczba fotonów padających na rozpatrywany walec o małej grubości l, a Δn_f liczba usuniętych z wiązki fotonów. $\Delta n_f/n_f$ jest także prawdopodobieństwem rozproszenia fotonu.

Możemy rozpatrywać nie tylko rozproszenie całkowite (we wszystkich kierunkach), ale i rozproszenie fotonu pod określonym kątem, np. 180° (π). Mówimy wtedy o <u>różniczkowym przekroju czynnym</u> σ_r . Jest on miarą prawdopodobieństwa rozproszenia fotonu o określonej długości fali pod określonym kątem – tutaj π , przez jeden atom określonego rodzaju. Jego wymiar to [$m^2 \cdot sr^{-1}$]. Gdyby wartość σ_r nie zależała od kąta rozproszenia to jest jasne, że zachodziłoby $\sigma = 4 \cdot \pi \sigma_r$ (co otrzymamy po scałkowaniu σ_r po kątach).



Przekrój czynny ma prostą interpretację geometryczną. Utwórzmy ułamek: $\sigma N \cdot l \cdot S/S$ i zauważmy, że $N \cdot l \cdot S$ to ilość atomów w objętości $l \cdot S$. Ponieważ wymiar przekroju czynnego jest $[m^2]$, to licznik oznacza

pewną powierzchnię utworzoną przez przekroje czynne atomów znajdujących się w objętości walca, natomiast ułamek $\sigma N \cdot l$ mówi nam jaka część powierzchni S została nimi "przesłonięta". Taki ułamek natężenia światła (taki ułamek liczby fotonów) ubył z wiązki padającej!

To jest miła interpretacja ale słuszna tylko dla małych strat światła czyli dla małych koncentracji lub cienkich warstw lub małych przekroi czynnych o czym dalej.

Łatwo zauważyć, że wyrażenie $\sigma N \cdot l$ jest wykładnikiem w prawie Lamberta-Beera, jeżeli podstawimy $\sigma N = \beta$, gdzie β - objętościowy współczynnik rozpraszania (dla określonej długości fali i określonej substancji).

Analogicznie napiszemy takie zależności dla współczynnika absorpcji α oraz objętościowego współczynnika rozpraszania wstecznego β_{π} . Ten ostatni jest szczególnie ważny w teorii lidaru.

$$\beta_{\pi} = \sigma_{\pi} \cdot N; \qquad \beta = \sigma \cdot N; \qquad \alpha = \sigma_{a} \cdot N;$$

gdzie: β_{π} - objętościowy współczynnik rozproszenia wstecznego,

 σ_{π} - przekrój czynny (różniczkowy) na rozproszenie do tyłu,

 β - objętościowy współczynnik rozproszenia (całkowitego),

 σ - przekrój czynny na rozproszenie (całkowite),

 α - współczynnik absorpcji,

 σ_a – przekrój czynny na absorpcję.

Wymiar α oraz β jest $[m^{-1}]$, wymiar β_{π} jest $[m^{-1} \cdot sr^{-1}]$, wymiar σ_a i σ jest $[m^2]$, wymiar σ_{π} jest $[m^2 \cdot sr^{-1}]$. W wykładniku prawa Lamberta-Beera pojawia się tylko α lub β , albo oba łącznie.

Użyteczność pojęcia przekroju czynnego polega na tym, że charakteryzuje on własności jednego atomu (molekuły, ...) gdy współczynniki absorpcji itd. opisują całą próbkę. Te pierwsze są wygodniejsze do porównywania własności substancji.

Poniżej są podane przykładowe wartości przekroi czynnych:

 $\sigma_a = 1 \cdot 10^{-18} \text{ cm}^2$ na absorpcję światła o długości fali 286.9 *nm* przez molekułę SO₂; $\sigma_{\pi} = 2,15 \cdot 10^{-28} \text{ cm}^2 \cdot \text{sr}^{-1}$ na rozproszenie Rayleigh`a do tyłu w powietrzu na linii 694,3 *nm* (wartość średnia na jedną molekułę powietrza).

§3.3. Co to jest kąt bryłowy?

Ważnym i wygodnym pojęciem jest kąt bryłowy. Poniższy rysunek wyjaśnia poglądowo jego definicję i miarę.

Kątem bryłowym nazwiemy przestrzeń ograniczoną stożkiem o wierzchołku w punkcie O i o nieograniczonej wysokości. Ta uproszczona definicja kąta bryłowego jest dla nas wystarczająca. Stożek ten na kuli o promieniu R i środku w O odcina czaszę o powierzchni A. Miarą kąta bryłowego jest wielkość: A/R². Jednostką jest stereoradian (skrót *sr*).



Jeżeli za powierzchnię A przyjąć cała $4\pi R^2$ powierzchnie kuli czvli to odpowiadający jej kąt bryłowy nosi nazwę pełnego kata bryłowego i jak widać jest równy 4π (stereoradianów). Kąt bryłowy półpełny 2π (*sr*) odcina półkulę, a rozwartość odpowiadającego mu stożka wynosi π (radianów) czyli 180°. Jeżeli rozważymy stożek o rozwartości 120° czyli (2/3) $\cdot \pi$ (radianów) to odpowiadający mu kat bryłowy wyniesie π (stereoradianów). Bardzo często w tym zapisie kątów pomija się jednostki, zatem trzeba uważać aby nie pomylić np. 2π stereoradianów z 2π radianów. Ten ostatni, to kat pełny ale płaski! Czy widać tu analogię do miary łukowej kąta płaskiego? Powyższe ma bardzo proste i

powszechne zastosowanie praktyczne.

Lampa błyskowa aparatu fotograficznego jest praktycznie punktowym źródłem światła emitującym je w kącie bryłowym bliskim π . Popatrzmy jak zmienia się oświetlenie z odległością od lampy. Ponieważ energia błysku jest ustalona z góry i całe światło znajduje się wewnątrz kąta bryłowego (ciągle tego samego) to oświetlenie musi

maleć jak R^{-2} bowiem powierzchnia oświetlana rośnie jak R^2 . Zasada zachowania energii wymaga aby iloczyn powierzchni i oświetlenia (równy energii błysku) pozostał stały. Ilustruje to poniższy rysunek. Powierzchnie stałego oświetlenia oznaczono dla odległości 2 i 4 *m* od lampy L. Oświetlenie w odległości 4 *m* jest czterokrotnie mniejsze niż w odległości 2 *m* od niej.



Aby więc otrzymać poprawne zdjęcie grupy osób na "party" należy je ustawić w jednym rzędzie tak jak na lewym rysunku a nie w jednym szeregu jak po prawej.



Pamiętajmy, że układ detekcyjny lidaru zbiera tym więcej światła rozproszonego im większa powierzchnia zwierciadła teleskopu i im bliżej obiektu rozpraszającego jest lidar, czyli im większy kąt bryłowy w którym teleskop odbiera światło (czynnik A/R^2 we wzorze lidarowym!).

Zwierciadło teleskopu lidaru 510M ma średnicę 40 cm. Zatem przy obserwacji smugi kominowej fabryki z odległości 1,2 km kąt bryłowy w którym zbieramy światło wynosi: $\pi \cdot 0,2^2/1200^2$ [sr] $\approx (1/36) \cdot \pi \cdot 10^{-6}$ [sr] $\approx 87 \cdot 10^{-9}$ [sr]. Zakładając, że światło jest rozpraszane izotropowo, wnioskujemy że zaledwie $87 \cdot 10^{-9}$ [sr]/ $4 \cdot \pi$ [sr] $\approx 7 \cdot 10^{-9}$ energii rozproszonej w smudze dociera do lidaru!

§3.4. Prawo Lamberta – Beera

Rozważmy elementarną warstwę gazu o koncentracji atomów $N [m^{-3}]$ i o grubości



 Δl [*m*] (co oznacza, że zamierzamy z grubością warstwy zejść aż do zera), na którą z lewej strony pada jednorodna i równoległa wiązka światła o natężeniu *I* [*W*·*m*⁻²] i powierzchni przekroju *S* [*m*²]. Atomy rozpraszają światło (co zaznaczono schematycznie) powodując zmniejszenie mocy wiązki przechodzącej. Możemy śmiało założyć, że zmiana mocy wiązki (strumienia światła) $S \cdot \Delta l$ będzie proporcjonalna do ilości oddziaływujących ze światłem atomów, czyli do $N \cdot \Delta l \cdot S$ oraz do natężenia światła *l*. Zatem napiszemy:

$$S \cdot \Delta l = -\sigma \cdot l \cdot N \cdot \Delta l \cdot S,$$

gdzie:

minus oznacza, że moc wiązki maleje w miarę przemieszczania się w głąb warstwy, a σ – współczynnik proporcjonalności zwany **przekrojem czynnym** na jeden atom na proces rozproszenia światła.

Gdyby za ubytek mocy wiązki był odpowiedzialny inny proces, np. absorpcja, wtedy wprowadzilibyśmy "sigmę" na jeden atom na proces absorpcji. Możemy tak postępować z opisem każdego rodzaju oddziaływania światła z materią.

Powyższe równanie można przekształcić do postaci:

$$\frac{dI}{I} = -\sigma \cdot N \cdot dl,$$

przy czym zastosowano standardową notację matematyczną (Δl zamieniono na dl oraz Δl na dl). Otrzymane równanie różniczkowe (w każdym poradniku matematycznym podaje się jego opis) ma rozwiązanie postaci:

$$I_T = I_o \cdot e^{-\sigma \cdot N \cdot l},$$

gdzie I_{T} natężenie światła w wiązce po przejściu warstwy o grubości l, a I_{o} natężenie początkowe, na początku rozpatrywanej warstwy o grubości l.

Ponieważ wykładnik musi być bezwymiarowy, stąd wymiar σ jest [m^2]. Przekroje czynne są miarą prawdopodobieństwa zajścia danego procesu dla jednego atomu i dlatego są bardzo użyteczne.

Powyższe prawo znane pod nazwą prawa Lamberta – Beera jest powszechnie wykorzystywane np. w pomiarach zanieczyszczeń środowiska. Jego ważną formą dla małych absorpcji jest wyrażenie:

$$I_T \approx I_o \cdot (1 - \sigma \cdot N \cdot l).$$

Otrzymuje się je przez rozwinięcie pełnej formuły w szereg Taylora i zachowanie pierwszego wyrazu rozwinięcia. Prawo Lamberta – Beera często jest formułowane w innej postaci. Wprowadza się inne współczynniki, ale wszystkie dają się między sobą przeliczyć. W szczególności wykładnik (bez znaku): $\sigma \cdot N \cdot l$ nosi nazwę absorbancji i, jak widać, oznacza *ln (l_o/l_T)*. Więcej o tym prawie można dowiedzieć się na ćwiczeniu **O1**. Tutaj zasygnalizujemy pewne problemy powstające przy jego wyprowadzaniu i stosowaniu:

- czy istnieje równoległa wiązka światła (wykład prof. T. Stacewicza, <u>http://info.fuw.edu.pl/~ajduk/wyklady/fmos.pdf</u>)?
- czy pomiary na dużych dystansach można uznać za nieskończenie szybkie (tj. czy próbka gazu nie zmienia się w trakcie pomiaru)?
- o co czynić gdy za osłabienie wiązki światła odpowiada kilka procesów naraz?
- czy to prawo może obowiązywać bez żadnych ograniczeń dla każdej koncentracji badanej substancji?

CZĘŚĆ IV

W Zakładzie Optyki Instytutu Fizyki Doświadczalnej UW od 1996 roku istnieje Pracownia Lidarowa. Prowadzi ona badania naukowe i dydaktyczne z szeroko pojętej dziedziny ochrony środowiska. W jej dorobku są publikacje, z których jedną (o NO₂ nad kopalnią) załączamy. Pozostałe dostępne są z portalu uniwersyteckiego lub w bibliotece. Ponadto załączamy wykaz prac doktorskich i magisterskich.

Zamieszczono tutaj również **INSTUKCJĘ BHP** oraz aktualne normy zanieczyszczeń atmosfery.

§4.1. Ogólna instrukcja BHP (L1) przy pracy z laserami i urządzeniami laserowymi.

- 1. Każdy użytkownik winien przed uruchomieniem lasera (lub urządzenia laserowego) ustalić klasę lasera i podstawowe dane o nim, przede wszystkim długość emitowanej fali oraz moc lub energię.
- 2. Każdy użytkownik jest zobowiązany zapoznać się z instrukcją obsługi (lasera i urządzenia laserowego).
- 3. Należy przestrzegać nakazów i zakazów zawartych w instrukcji obsługi danego typu lasera oraz zwracać uwagę na plakaty i napisy ostrzegawcze w laboratorium.
- Bez względu na klasę lasera zabrania się patrzenia w wiązkę laserową (tj. zaglądania do otworu wyjściowego lasera z którego jest emitowana wiązka); dotyczy to także wiązki odbitej.
- 5. Zabrania się zabaw wiązkami laserowymi polegających na oświetlaniu ludzi, a także materiałów niebezpiecznych np. łatwopalnych, reaktywnych (nie wolno puszczać tzw. "zajączków").
- 6. W czasie ustawiania eksperymentu należy pracować przy włączonym pełnym oświetleniu ponieważ zmniejsza to znacznie niebezpieczeństwo napromieniowania oczu.
- 7. Obowiązkiem eksperymentatora jest zbudowanie blokady wiązki laserowej (wszystkich wiązek) opuszczającej obszar eksperymentu, za pomocą odpowiednich ekranów absorbujących i rozpraszających.
- 8. Należy (o ile to możliwe) prowadzić wiązki laserowe na poziomie różnym od poziomu oczu.
- 9. Bezwzględnie należy używać właściwych środków ochrony indywidualnej (np.: gogli) zaleconych w normie PN-91/T-06700, odpowiednich dla każdej klasy laserów.
- 10. Należy stosować się do zaleceń głównego użytkownika urządzenia laserowego oraz poleceń władz dziekańskich/instytutowych dotyczących spraw BHP.
- 11. Nie wolno pracować z laserami jeżeli stosowało się leki typu atropina (jakiekolwiek wpływające na wielkość źrenic i odruch zamykania oczu).
- 12.W przypadku napromieniowania <u>natychmiast</u> skorzystać z pomocy lekarskiej i zgłosić wypadek przełożonemu/asystentowi.

§4.2. Spis prac doktorskich i magisterskich

• Zakończone prace magisterskie studentów Fizyki Środowiska

Wykorzystanie lidaru absorpcji różnicowej (DIAL) do detekcji wybranych zanieczyszczeń powietrza – Adam Czyżewski (IX 1997) Opiekun: prof. dr hab. Krzysztof Ernst

Lidar różnicowy, budowa i teoretyczne metody analizy danych – Kamil Stelmaszczyk (IX 1997) Opiekun: dr hab. Tadeusz Stacewicz

Kalibracja lidaru typu DIAL – Ewa Wiśniewska (IX 1998) Opiekun: prof. dr hab. Krzysztof Ernst

Badanie emisji dwutlenku siarki i dwutlenku azotu z elektrowni Hagenwerder i Turów za pomocą lidaru absorpcji różnicowej – lwona Sylwia Stachlewska (IX 1998) Opiekun: prof. dr hab. Krzysztof Ernst

Badanie koncentracji ozonu w rejonie Szklarskiej Poręby za pomocą lidaru różnicowego – Beata Suska (IX 1998) Opiekun: dr hab. Tadeusz Stacewicz

Badanie aerozoli atmosferycznych przy pomocy lidaru – Aleksander Pietruczuk (IX 1999) Opiekun: dr hab. Tadeusz Stacewicz

Przystosowanie lidaru typu DIAL do pomiarów aerozoli – Katarzyna Kołacz (IX 2000) Opiekun: prof. dr hab. Tadeusz Stacewicz

Badanie absorpcji metodą CRDS – Łukasz Kilianek (IX 2000) Opiekun: prof. dr hab. Tadeusz Stacewicz

Pomiary absorpcji składników atmosfery metodą CRDS – Małgorata Kmieciak (IX 2001) Opiekun: prof. dr hab. Tadeusz Stacewicz

Komputerowy model lidaru – Grzegorz Flisiak (IX 2002) Opiekun: prof. dr hab. Tadeusz Stacewicz

• Zakończone prace magisterskie studentów MSOŚ

Zmiany poziomu zanieczyszczeń atmosferycznych na obszarze "Czarnego Trójkąta" w ostatnim dziesięcioleciu – Sebastian Jałocha (I 1999) Opiekun: dr Wojciech Skubiszak

Zanieczyszczenie atmosfery w rejonie Elektrowni Turów – Marcin Karolak (I 1999) Opiekun: dr Wojciech Skubiszak

• Zakończone prace licencjackie studentów Fizyki Środowiska

Rodzaje lidarów: zalety i ograniczenia w ich zastosowaniu – Joanna Nawrocka (I 2002 Opiekun: dr Wojciech Skubiszak

• Aktualnie wykonywane prace magisterskie studentów Fizyki Środowiska

Kontroler lidaru wieloczęstotliwościowego – Akadiusz Nawrocki Opiekun: prof. dr hab. Tadeusz Stacewicz

• Aktualnie wykonywane prace licencjackie studentów Fizyki Środowiska

Lidar absorpcji różnicowej (DIAL) - Małgorzata Czyżewska Opiekun: dr Wojciech Skubiszak

• Proponowane prace magisterskie studentów Fizyki Środowiska

Lidar wieloczęstoliwościowy do badania aerozolu atmosferycznego Opiekun: prof. dr hab. Tadeusz Stacewicz

Badanie rozkładu rozkładu aerozolu w atmosferze za pomocą lidaru z laserem YaG Opiekun: prof. dr hab. Tadeusz Stacewicz

• Zakończone prace doktorskie z Fizyki Środowiska

Wykorzystanie lidaru do badań ozonu i aerozolu atmosferycznego – mgr Artur Szymański (2000) Promotor: prof. dr hab. Krzysztof Ernst

Analiza Sygnałów lidarowych – Kamil Stelmaszczyk (2002) Promotor: prof. dr hab. Tadeusz Stacewicz

Badanie absorpcji metodą CRDS - Adam Czyżewski (2002) Promotor: prof. dr hab. Tadeusz Stacewicz

• Aktualnie wykonywane prace doktorskie z Fizyki Środowiska

Lidar wieloczęstoliwościowy do badania aerozolu atmosferycznego – Grzegorz Karasiński Promotor: prof. dr hab. Tadeusz Stacewicz §4.3.

LIDAROWE POMIARY ROZKŁADU KONCENTRACJI NO₂ W REJONIE TUROWA

Stanisław CHUDZYŃSKI, Adam CZYŻEWSKI, Krzysztof ERNST, Wojciech SKUBISZAK, Tadeusz STACEWICZ, Kamil STELMASZCZYK Instytut Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu Warszawskiego, ul. Hoża 69, 00-681 Warszawa

STRESZCZENIE

W czasie dwóch kampanii pomiarowych, prowadzonych w rejonie Turowa w latach 1997 i 1998, do wykrywania zanieczyszczeń atmosfery wykorzystano ruchome laboratorium lidarowe (typu DIAL) Zakładu Optyki Instytutu Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu Warszawskiego. Dokonano pomiarów przestrzennego rozkładu koncentracji NO₂. Maksymalna, zmierzona wartość koncentracji NO₂ wynosiła około 160 ppb (~ 300 µg/m³) i nie przekraczała dopuszczalnej 30 – min. normy z 1998 roku (500 µg/m³). Otrzymano znaczne koncentracje nad kopalnią i skrzyżowaniem dróg lokalnych. Nie stwierdzono natomiast występowania NO₂ nad drogą Zgorzelec - Bogatynia.

LIDAR – akronim od LIght Detection And Ranging (ang.) DIAL – akronim od Differential Absorption Lidar (ang.) NO₂

1. Metoda pomiaru techniką DIAL

1.1. Dobór parametrów lidaru

W latach 1997 i 1998 w rejonie Turowa prowadzono kampanie pomiarowe. Do badań zanieczyszczeń atmosfery wykorzystano ruchome laboratorium lidarowe Zakładu Optyki Instytutu Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu Warszawskiego. Lidar ten pracuje w oparciu o technikę DIAL - czyli technikę pomiaru różnicowego^{1,2}. Technika ta wymaga jednoczesnego wysłania dwóch impulsów o odpowiednio dobranych długościach fal: absorbowanej λ_{on} i nie absorbowanej λ_{off} . Kryteria doboru to:

- d. jak największa różnica wartości współczynników absorpcji dla obu fal; jednak warunki eksperymentu wymagają poszukiwania takich miejsc w widmie, gdzie lokalne zmiany tych współczynników są niewielkie $(d\sigma/d\lambda = 0)$;
- e. jak najmniejsza różnica długości fal, aby zminimalizować różnicę współczynników rozpraszania wstecznego;
- f. bezwzględne unikanie kolizji wybranych linii z pasmami absorpcji innych związków obecnych w atmosferze.

Na rysunkach 1 i 2 przedstawiono widmo absorpcji dwutlenku azotu w obszarze UVA i krótkofalowym VIS. W oparciu o te najnowsze dane spektralne³ dobrano następujące długości fal: absorbowanej $\lambda_{on} = 398,3$ nm i nie absorbowanej $\lambda_{off} = 397,5$ nm (patrz rys. 1). Taki wybór pozwolił zminimalizować skutki ewentualnych efektów związanych z odstrojeniem się częstotliwościowym lasera.



Wykonano szereg skanów poziomych. Na każdy składało się 9 kierunków pomiarowych po 1000 impulsów. Kąt elewacji wynosił 10^0 dla każdego kierunku. Impulsy laserowe o energii około 1,5 mJ (na wyjściu lasera) wysyłano naprzemiennie z częstością 10 Hz na długościach fal λ_{on} i λ_{off} . Czas trwania pomiaru dla jednego kierunku trwał ok. 2 min,

Rys. 1 Widmo absorpcji dwutlenku azotu w wybranym obszarze UVA³.



Rys. 2 Widmo absorpcji dwutlenku azotu w obszarze VIS (krótkofalowym) i UVA³.

całego skanu – 20 min. Użyta wiązka laserowa miała średnicę 50 mm, co gwarantowało 100% wydajność zbierania sygnału rozproszeniowego, ponieważ pole widzenia teleskopu lidarowego było znacznie większe od rozbieżności kątowej wysyłanej wiązki (1,25 mrad wobec ca 0,01

mrad). Akwizycję danych prowadzono za pomocą 8 bitowego przetwornika AD o częstotliwości próbkowania 400 Ms/s.

1.2. Mapy koncentracji w technice DIAL

Przykładową mapę⁴ przestrzennego rozkładu koncentracji NO₂ przedstawia rys. 3. Na mapach tych, na obu osiach naniesiono odległości od układu pomiarowego. Wartości koncentracji NO₂ odpowiadają zamieszczonej przy rysunkach dziesięciostopniowej skali barw. Widoczna jest typowa plamistość ze "środkiem ciężkości" w lewej stronie rozkładu.



Rys. 3 Przykładowy rozkład koncentracji NO2 nad KWB Turów ('98)

Zastosowany tutaj układ współrzędnych zdefiniowano jak na rys. 4 – odległości ujemne wskazują na prowadzenie pomiaru na lewo od osi lidaru.



Rys 4. Definicja przyjętego układu współrzędnych.

2. Topografia i warunki meteorologiczne

Pomiary prowadzono w następujących warunkach meteorologicznych:

- 05.08.1997 Wiatr dość silny (ponad 4 m/s) z kierunku północno-wschodniego. Po zachodzie Słońca sporadyczna, słaba turbulencja. Z upływem czasu spadek prędkości wiatru. Kierunek bez zmian. Nieliczne chmury kłębiaste. Silna nocna warstwa inwersyjna. Pomiary wykonano w godz. 11 – 20.
- 18.08.1998 Silny wzrost konwekcji. Powietrze suche. Silna turbulencja. Wzrost warstwy dobrze wymieszanej (późnym popołudniem). Wiatr bardzo słaby z kierunku południowego. Większe przejaśnienia. Wysoki pułap chmur. Pomiary wykonano w godz. 18 – 20.

Oprócz badań zanieczyszczeń atmosfery bezpośrednio nad i za Elektrownią Turów, prowadzono również badania w najbliższej okolicy, w tym w rejonie Kopalni Węgla Brunatnego Turów.

W 1997 roku, z uwagi na tematykę i inne warunki topograficzne, badania ograniczono do skrzyżowania dróg, gdzie prawie zawsze obserwowano długotrwałe "korki". Między lidarem (położenie Lidar `97) a badanym obszarem znajdowała się Elektrownia Turów.

W 1998 roku przebadano część terenu Kopalni Węgla Brunatnego Turów - stare wyrobisko, którego eksploatację zakończono jeszcze przed II wojną światową i już wtedy wykorzystano jako wewnętrzne składowisko nadkładu oraz produktów odsiarczania i spalania. Obecnie jest ono częściowo zalesione. Obszar badań sięgnął także skraju odkrywki. Lidar (położenie Lidar `98) był usytuowany względem odkrywki tak jak pokazano schematycznie na rys. 5. Znajdował się on między kopalnią a elektrownią.



Rys. 5. Schemat ustawienia lidaru w rejonie kopalni KWB "Turów". Pokazano położenie wiązki laserowej względem wyrobiska.

3. Rezultaty

W celu ułatwienia analizy i dyskusji otrzymanych wyników na topograficzną mapę terenu naniesiono przetworzone mapy rozkładu koncentracji NO₂ - rys. 6. Zaznaczono dwa położenia lidaru i obszary objęte pomiarami. Kątowa rozpiętość skanów ograniczona była istniejącą zabudową.



Rys. 6. Mapa topograficzna okolic Turowa z naniesionymi pomiarami koncentracji NO₂.

Przetwarzanie polegało na sumowaniu poszczególnych skanów, obliczeniu średniej koncentracji w małych obszarach, a następnie zastosowaniu filtru, czyli swoistego poziomu dyskryminacji. W miejscach gdzie koncentracja spadała poniżej pewnej wartości odcięcia (w naszym przypadku - 20 ppb) przyjęto logiczną wartość 0. W pozostałych przypadkach wartość 1. Tak otrzymana jednobitowa mapa jest pokazana na rys. 6. Powyższa procedura umożliwia jednoznaczną ocenę sytuacji tj. stwierdzenie obszarów występowania zanieczyszczenia.

Otrzymano znaczne koncentracje nad kopalnią i skrzyżowaniem dróg lokalnych. Maksymalna, zmierzona wartość koncentracji NO₂ wynosiła około 160 ppb (~ $300 \ \mu g/m^3$) i nie przekraczała dopuszczalnej 30 – min. normy z 1998 roku ($500 \ \mu g/m^3$). Nie stwierdzono natomiast występowania NO₂ nad drogą Zgorzelec - Bogatynia.

Otrzymany wynik świetnie wpasowuje się w topografię terenu i jak się okazuje rozmieszczenie źródeł NO₂. I tak, obecność NO₂ została wykryta nad obszarem o wielkiej intensywności ruchu kołowego - obszar I (korki drogowe na drodze lokalnej) a także nad terenem pracy ciężkich maszyn drogowych – obszar IIA. Obecność NO₂ w obszarze IIB

związana jest z potężnym ruchem kołowym w odkrywce. (Zasięg lidaru obejmował granicę odkrywki w owym czasie). Obecność NO₂ nad kopalnią odkrywkową budzi zdumienie, bowiem chemicy nie przewidują takiej możliwości (wiele prywatnych informacji). Jednak wykryta obecność zanieczyszczeń powietrza daje się objaśnić intensywnym transportem – ogólnie uznanym i udokumentowanym źródłem powstawania dwutlenku azotu.

Wspomniana wyżej droga Zgorzelec - Bogatynia, choć o dość dużym natężeniu ruchu kołowego (gdyż prowadzi do przejścia granicznego oraz zapewnia komunikację kopalni z elektrownią i miastem) ze względu na swe położenie jest dość dobrze wentylowana. Nadto samochody poruszają się tam z dużą szybkością, zatem emitują mało i w krótkim czasie.

4. Źródła NO₂ w atmosferze.

Naturalna produkcja – nie jest dokładnie znana, ponieważ metody pomiarowe dają wynik globalny tj. NO_x , gdzie NO_x oznacza sumę NO i NO_2 , a w rzeczywistości również innych związków azotowych powstających w powietrzu. Wiadomo, że w całkowitej ilości emitowanych związków azotu NO ma największy udział. Stąd oszacowanie dotyczy produkcji azotu (różnego od naturalnego)⁵.

Antropogeniczna produkcja – głównym źródłem jest transport kołowy oraz elektrownie cieplne. Udział NO₂ w emisji silników spalinowych wynosi ca 10% całkowitej produkcji NO_x.

Procesem odpowiedzialnym za przemianę NO w NO₂ są reakcje fotochemiczne zachodzące w atmosferze zanieczyszczonej węglowodorami i, oczywiście, tlenkiem azotu. Termiczne utlenianie nie wchodzi w grę chyba, że u samego wylotu komina elektrowni. Dodatkowo dwutlenek azotu pozostaje w równowadze z ozonem, będąc wyłącznym źródłem jego powstawania w troposferze.

Natomiast jedynymi procesami niszczenia NO₂ są reakcje fotolizy prowadzącej do powstawania ozonu oraz przemiany prowadzące do powstania HNO₃, soli amonowych i innych związków⁵.

W naszym przypadku jest oczywiste, że źródłem produktów niezbędnych do syntezy dwutlenku azotu jest transport samochodowy, o którym mowa powyżej.

5. Podsumowanie

Chociaż występowanie dwutlenku azotu nad odkrywką było zaskoczeniem, to jednak jego obecność daje się objaśnić czynnikami antropogenicznymi. Należy sądzić, że panujące w czasie pomiarów warunki pogodowe o charakterze trwałym (duże nasłonecznienie i wilgotność powietrza) stymulowały transformację tlenku azotu do dwutlenku azotu. Taka sytuacja pogodowa ułatwiła również przypisanie obszarów skażonych do źródeł emisji zanieczyszczenia pierwotnego, którym są tlenek azotu i węglowodory.

6. Literatura

- 1. R. M. Measures, "Laser Remote Sensing Fundamentals and Applications", J. Wiley & Sons, New York, 1984, Reprint Edition 1992 (by Krieger Publishing Company, Malabar, Florida)
- S. Chudzyński, K. Ernst, T. Stacewicz, A. Szymański, "Ruchomy układ lidarowy typu DIAL budowa i zasada działania", POL-IMIS `97, Materiały, Wydawnictwo PZITS nr 727, Szklarska Poręba, czerwiec 1997
- 3. J. P. Burrows, "NO₂ absorption spectra", Public Domain University Bremen, Germany (prywatna informacja od prof Patrica Rairoux, FUB)
- 4. I. Stachlewska, "Badanie emisji dwutlenku siarki i dwutlenku azotu z elektrowni Hagenwerder i Turów za pomocą lidaru absorpcji różnicowej", Praca magisterska, Uniwersytet Warszawski, 1998
- 5. J. H. Seinfeld and S. N. Pandis, "Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change", J. Wiley & Sons, 1998

§4.4. Normy

POLSKIE NORMY POZIOMÓW SUBSTANCJI W POWIETRZU

Wg rozporządzenia Ministra Ochrony Środowiska, Zasobów Naturalnych i Leśnictwa z dnia <u>28 kwietnia 1998 r.</u> (Dz. U. Nr 55, poz. 355)

Lista substancji zanieczyszczających, dopuszczalne wartości stężeń tych substancji w powietrzu oraz czas ich obowiązywania (wybór z załącznika nr 1)

Lp.	Naz	zwa tancii	Dopuszczalne wartości stężeń w [μg/m³] w odniesieniu do okresu					
	Cube	lanoji	30 min. ¹⁾ 24 godz. ²⁾ r		roku ³⁾			
1		2	3	4	5			
2	Benzen		20*	10	2,5			
4	Dwutlenek	azotu	500	150	40			
5	Dwutlenek	siarki	500	150	40			
Ū	Dwaterier	Sidiriti		125 od 2005 r.	30 od 2005 r.			
158	Toluen ^{g)}		100	50	10			
9	Pył zawies	zony	350*	150	75			
				125	50			
10 Pył zawies PM10 ^{c)}		zawieszony 10 ^{c)} 280*		50 od 2005 r	30 od 2005 r.			
				00 00 2000 1.	20 od 2010 r.			
Nazwa substancji		Dopuszo [µg/m³]	czalna wartos w odniesieni	ść stężenia w u do 8 godz. ¹⁾				
Ozon		110						

Lista substancji zanieczyszczających, dopuszczalne wartości stężeń tych substancji w powietrzu na obszarach parków narodowych (wybór z załącznika nr 2)

L.p.	Nazwa substancii	Dopuszczalne wartości stężeń w [μg/m³] w odniesieniu do okresu					
	ou solurioj.	30 min. ¹⁾ 24 godz. ²⁾		roku ³⁾			
1	2	3	4	5			
1	Dwutlenek azotu	90	50	20			
2	Dwutlenek siarki	150	75	15			
3	Fluorowodór	3	0,4	0,02			
4	Ozon	150	65	-			

Wg Rozporządzenia Ministra Środowiska z dnia 6 czerwca 2002 r. (Dz. U. z dnia 27 czerwca 2002 r. Nr 87, poz. 796)

DOPUSZCZALNE POZIOMY NIEKTÓRYCH SUBSTANCJI W POWIETRZU DLA TERENU KRAJU, CZAS ICH OBOWIĄŻYWANIA, OZNACZENIE NUMERYCZNE TYCH SUBSTANCJI, OKRESY, DLA KTÓRYCH UŚREDNIA SIĘ WYNIKI POMIARÓW, DOPUSZCZALNE CZĘSTOŚCI PRZEKRACZANIA TYCH POZIOMÓW ORAZ MARGINESY TOLERANCJI (wybór z załącznika nr 1)

Lp.	Nazwa substancji (numer CAS) ^{a)}	Okres uśredniania wyników pomiarów	Dopuszczalny poziom v substancji w powietrzu w [µg/m ³]		Dopuszczalna częstość przekraczania dopuszczalnego poziomu w roku kalendarzowym ^{b)}			Margines tolerancji [%] [µg/m ⁻³]							
							2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	od 2010
1	2	3	4		5		6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	Benzen(71-43-2)	rok kalendarzowy	5 ^{c)}		-		<u>100</u> 5	<u>100</u> 5	<u>100</u> 5	<u>100</u> 5	<u>80</u> 4	<u>60</u> 3	<u>40</u> 2	<u>20</u> 1	0
	Dwutlenek azotu	jedna godzina	200 ^{c)}		18 razy		<u>40</u> 80	<u>35</u> 70	<u>30</u> 60	<u>25</u> 50	<u>20</u> 40	<u>15</u> 30	<u>10</u> 20	<u>5</u> 10	0
2	(10102-44-0)	rok kalendarzowy	40 ^{c)}		-		<u>40</u> 16	<u>35</u> 14	<u>30</u> 12	<u>25</u> 10	<u>20</u> 8	<u>15</u> 6	<u>10</u> 4	<u>5</u> 2	0
	Tlenki azotu ^{d)} (10102-44-0, 10102-43-9)	rok kalendarzowy	40 ^{e)} do 31.12.2002	30 ^{e)} od 1.01.2003	-		0	0	0	0	0	0	0	0	0
		jedna godzina	350 ^{c)}		24 razy		<u>25,8</u> 90	<u>17,2</u> 60	<u>8,6</u> 30	0	0	0	0	0	0
3	Dwutlenek siarki (7446-09-5)	24 godziny	150 ^{c)} do 31.12.2004	125 ^{c)} od 1.01.2005	3 razy		0	0	0	0	0	0	0	0	0
		rok kalendarzowy	40 ^{e)} do 31.12.2002	20 ^{e)} od 1.01.2003	-		0	0	0	0	0	0	0	0	0
		osiem godzin ^{g)}	120 ^{c)g)}		60 dni ^{h)} do 31.12.2004	25 dni ^{h)} od 1.01.2005	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	Ozon (10028-15-6)	okres wegetacyjny (1 V - 31 VII)	24.000 ^{e)i)} µg/m ³ xh do 31.12.2009	18.000 ^{e)i)} μg/m ³ xh od 1.01.2010	-		0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	Pył zawieszony	24 godziny	50 ^{c)}		35 razy		<u>30</u> 15	<u>20</u> 10	<u>10</u> 5	0	0	0	0	0	0
	^o PM10 ^j	rok kalendarzowy	40 ^{c)}		-		<u>12</u> 4,8	<u>8</u> 3,2	<u>4</u> 1,6	0	0	0	0	0	0

Objaśnienia:

a) oznaczenie numeryczne substancji wg Chemical Abstracts Service Registry Number,

b) w przypadku programów ochrony powietrza, o których mowa w art. 91 ustawy z dnia 27 kwietnia 2001 r. - Prawo ochrony środowiska (Dz. U. <u>Nr 62, poz.</u> 627 i <u>Nr 115, poz. 1229</u> oraz z 2002 r. <u>Nr 74, poz. 676</u>) częstość przekraczania odnosi się do poziomu dopuszczalnego wraz z marginesem tolerancji,

c) poziom dopuszczalny ze względu na ochronę zdrowia ludzi,

d) suma dwutlenku azotu i tlenku azotu w przeliczeniu na dwutlenek azotu,

e) poziom dopuszczalny ze względu na ochronę roślin,

f) suma metalu i jego związków w pyle zawieszonym PM10,

g) maksymalna średnia ośmiogodzinna spośród średnich kroczących, obliczanych ze średnich jednogodzinnych w ciągu doby; każdą tak obliczoną średnią 8-godzinną przypisuje się dobie, w której się ona kończy; pierwszym okresem obliczeniowym dla każdej doby jest okres od godziny 17.00 dnia poprzedniego do godziny 01.00 danego dnia; ostatnim okresem obliczeniowym dla każdej doby jest okres od godziny 16.00 do 24.00 tego dnia,

h) liczba dni z przekroczeniem poziomu dopuszczalnego w roku kalendarzowym uśredniona w ciągu kolejnych trzech lat; w przypadku braku danych pomiarowych z trzech lat dotrzymanie dopuszczalnej częstości przekroczeń sprawdza się na podstawie danych pomiarowych z co najmniej jednego roku,

i) wyrażony jako AOT 40, które oznacza sumę różnic pomiędzy stężeniem średnim jednogodzinnym wyrażonym w µg/m³ a wartością 80 µg/m³, dla każdej godziny w ciągu doby pomiędzy godziną 8.00 a 20.00 czasu środkowoeuropejskiego, dla której stężenie jest większe niż 80 µg/m³; wartość tę uznaje się za dotrzymaną, jeżeli nie przekracza jej średnia z takich sum obliczona dla okresów wegetacyjnych z pięciu kolejnych lat; w przypadku braku danych pomiarowych z pięciu lat dotrzymanie tej wartości sprawdza się na podstawie danych pomiarowych z co najmniej trzech lat; w przypadku gdy w serii pomiarowej występują braki, obliczaną wartość AOT 40 należy pomnożyć przez iloraz liczby możliwych terminów pomiarowych do liczby wykonanych w tym okresie pomiarów,

j) stężenie pyłu o średnicy aerodynamicznej ziaren do 10 μm (PM10) mierzone metodą wagową z separacją frakcji lub metodami uznanymi za równorzędne,

k) maksymalna średnia ośmiogodzinna, spośród średnich kroczących, obliczanych co godzinę z ośmiu średnich jednogodzinnych w ciągu doby. Każdą tak obliczoną średnią 8-godzinną przypisuje się dobie, w której się ona kończy; pierwszym okresem obliczeniowym dla każdej doby jest okres od godziny 17.00 dnia poprzedniego do godziny 01.00 danego dnia; ostatnim okresem obliczeniowym dla każdej doby jest okres od godziny 16.00 do 24.00 tego dnia.

Wg Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 5 grudnia 2002 r. (Dz. U. z 2003 r. Nr 1, poz. 12)

WARTOŚCI ODNIESIENIA DLA NIEKTÓRYCH SUBSTANCJI W POWIETRZU DLA TERENU KRAJU, OZNACZENIE NUMERYCZNE TYCH SUBSTANCJI ORAZ OKRESY, DLA KTÓRYCH UŚREDNIONE SĄ WARTOŚCI ODNIESIENIA, Z WYŁĄCZENIEM OBSZARÓW PARKÓW NARODOWYCH I OBSZARÓW OCHRONY UZDROWISKOWEJ (wybór wg załącznika nr 1)

Lp.	Nazwa substancji (dla niektórych substancji podano w nawiasach ich nazwy	Oznaczenie numeryczne substancji	Wartości odniesienia w mikrogramach na metr sześcienny (µg/m³) uśrednione dla okresu			
	zwyczajowe)	(numer CAS)	1 godziny	roku kalendarzowego		
16.	Benzen	71-43-2	30	5		
70.	Ditlenek azotu (dwutlenek azotu)	10102-44-0	200	40		
72.	Ditlenek siarki (dwutlenek siarki)	7446-09-5	350	30		
151.	Toluen	108-88-3	100	10		
137.	Pył zawieszony PM10	-	280	40		
133.	Ozon - jako zanieczyszczenie pierwotne	10028-15-6	150	-		

DOPUSZCZALNE POZIOMY NIEKTÓRYCH SUBSTANCJI NA OBSZARACH PARKÓW NARODOWYCH, OZNACZENIE NUMERYCZNE TYCH SUBSTANCJI ORAZ OKRESY, DLA KTÓRYCH UŚREDNIA SIĘ WYNIKI POMIARÓW (załącznik nr 3)

Lp.	Nazwa substancji (numer CAS) ^{a)}	Okres uśredniania wyników pomiarów	Dopuszczalny poziom substancji w powietrzu w [µg/m ³]
1	Dwutlenek siarki (7446-09-5)	rok kalendarzowy	15
2	Tlenki azotu ^{b)} (10102- 44-0, 10102-43-9)	rok kalendarzowy	20

Objaśnienia:

^{a)} oznaczenie numeryczne substancji wg Chemical Abstracts Service Registry Number, ^{b)} suma dwutlenku azotu i innych tlenków azotu w przeliczeniu na dwutlenek azotu.

ALARMOWE POZIOMY NIEKTÓRYCH SUBSTANCJI, OZNACZENIE NUMERYCZNE TYCH SUBSTANCJI ORAZ OKRESY, DLA KTÓRYCH UŚREDNIA SIĘ WYNIKI POMIARÓW (załącznik nr 4)

Lp.	Nazwa substancji (numer CAS) ^{a)}	Okres uśredniania wyników pomiarów	Alarmowy poziom substancji w powietrzu w [µg/m ³]
1	Dwutlenek azotu (10102-44-0)	jedna godzina	400 ^{b)}
2	Dwutlenek siarki (7446-09-5)	jedna godzina	500 ^{b)}
3	Ozon ^{c)} (10028-15-6)	jedna godzina	240

Obiaśnienia:

^{a)} oznaczenie numeryczne substancji wg Chemical Abstracts Service Registry Number,

^{b)} wartość występująca przez trzy kolejne godziny w punktach pomiarowych reprezentujących jakość powietrza na obszarze o powierzchni co najmniej 100 km² albo na obszarze strefy zależnie od tego, który z tych obszarów jest mniejszy,

^{c)} wartość progowa informowania społeczeństwa o ryzyku wystąpienia poziomów alarmowych wynosi 180 µg/m³.