

ライダーによる大気モニター法の概要

森實 有一朗¹, 安居 賢二¹, 千川 道幸^{2,3}

¹ 近畿大学大学院 総合理工学研究科

〒577-8502 大阪府 東大阪市 小若江 3-4-1

² 近畿大学 理工学部 数学物理学科

〒577-8502 大阪府 東大阪市 小若江 3-4-1

³ 近畿大学 理工学総合研究所

〒577-8502 大阪府 東大阪市 小若江 3-4-1

Review of Atmospheric Monitoring with LIDAR

Yuichiro Morizane¹, Kenji Yasui¹ and Michiyuki Chikawa^{2,3}

¹ *Interdisciplinary Graduate School of Science and Technology, Kinki University,
3-4-1, Kowakae, Higashi-Osaka, Osaka 577-8502, Japan*

² *Department of Physics, Kinki University,
3-4-1, Kowakae, Higashi-Osaka, Osaka 577-8502, Japan*

³ *Research Institute for Science and Technology, Kinki University,
3-4-1, Kowakae, Higashi-Osaka, Osaka 577-8502, Japan*

(Received December 25, 1999)

Abstract

One of most mysterious phenomena in cosmic ray physics is existence of ultra high energy particles above 10~20eV. It is very useful technique to observe such cosmic ray events by means of detecting the air fluorescence light from the number of cascade shower particles induced by high energy cosmic ray interaction. The emitted fluorescence light attenuates its intensity during propagation to the detector due to interacting with the air molecules, aerosol and so on. The transmittance of atmosphere needs to correct received the light intensity to the original intensity one.

In this review, we will report some general methods to obtain the transmittance of atmosphere using so-called "LIDAR" in meteorological observation. The relevant topics of new cosmic ray experiment will also be reported.

Key words: LIDAR, Cosmic Ray, Atmospheric Monitoring, Atmospheric Fluorescence

1 Introduction

ライダー（レーザーレーダー）は、1960 年にレーザーが発明されると、これを用いて大気、地形、海洋などの情報を得るための遠隔測定法として開発された。以前はサーチライトが用いられていたが、レーザーが開発されてからは光に比べ直進性が良く指向性が良いためレーザーが使われるようになった。図 1 に示すように、ライダーによる測定方法は、観測するターゲットにレーザーを照射し、そのターゲットからの反射光（散乱光）を測定することによって、ターゲットの情報を得る。また、ターゲットで

ある散乱体の形状、性質、大きさなどにより散乱の仕方が異なるため、ライダーはいくつかの種類に分類されている。ターゲットからの反射光強度を求めるには、ライダー方程式を用いて行う。

このレビューでは、宇宙線観測手法の一つである“大気蛍光による宇宙線観測”の概要を紹介し、またそこで必要となる大気透明度の測定を行うために、気象などの分野で用いられているライダーの一般的な概要を紹介する [1][2][3][4][13]。

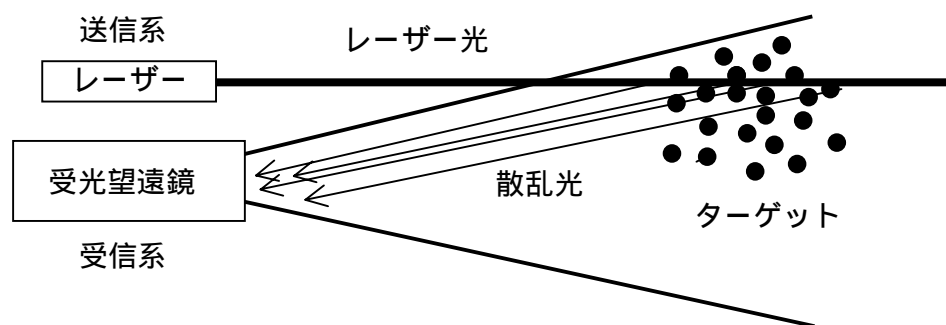


図 1：ライダー装置

レーザー光をターゲットに照射し、その散乱光を望遠鏡で受光することによりターゲットの情報を得る。

2 大気蛍光による宇宙線観測

宇宙線の発見は、1912 年ピクトルヘスが気球で地上 5000m まで上がり宇宙線からの放射線を捕らえたのが始まりである。それ以来、宇宙線の研究が始まり、地上、山、地下、飛行機や人工衛星など様々な場所や、方法で宇宙線が検出されてきた。そして研究を重ねるに従って、未知の粒子や、より高いエネルギーを持った宇宙線が観測されるようになり、そのために、観測方法も様々なものへと改良されてきた。宇宙線の観測方法というのは、宇宙線を何かの物質と相互作用させ、その時に起こる反応現象により宇宙線を検出する。古くからある代表的な宇宙線観測装置としては霧箱、原子核乾板などがある。比較的良く用いられている宇宙線の観測装置にシンチレーションカウンターがある。これは荷電粒子などの放射線が、物質を通過中にその物質内の電子を励起し、それによる電離損失によって失ったエネルギーの一部が光として放出される、シンチレーションと呼ばれる現象を用いた検出方法である。観測には、衝突するとシンチレーション光を発するシンチレーターという蛍光物質を用いるが、シンチレーション光は微弱な光であるため、光電子倍增管で増幅

することにより電気信号として取り出し、宇宙線を観測する。シンチレーターには、NaI (Tl), CsI, KI などの無機結晶、アントラセンのような有機結晶、ポリスチレンやポリビニルトルエンなどの有機固体や、液体、気体を用いている。この中でも有機固体であるプラスチックシンチレーターが比較的良く使用されている。

宇宙線観測において頻度の少ない事象を出来るだけ多く捕らえようとするには、宇宙線の観測面積を広げるという方法が一番効果的である。なぜなら、例えばある宇宙線が 1km^2 当たり 100 年間に一個の頻度でしか観測できないとしても、観測面積をその 100 倍の 100km^2 にすれば 1 年に一個の頻度で観測できると期待されるからである。そのため、図 2 に示すように、宇宙線の観測面積は年々広がってきている。しかし、観測面積が広大になってくると遠方まで観測視野を広げなければならないため、プラスチックシンチレーターと PMT の組み合わせの廉価版ではあるが、有効面積の小さな検出器を地上に展開して用いる従来の方法では、観測が難しくなってきた。そこで、新たな宇宙線の観測方法として、大

気蛍光法が K.Greisen, 菅, 棚橋, 尾崎らによって提唱され, 後にユタ大学の J.Cassiday, E.C.Loh らによって実用化され, 実際に観測に用いられる様になった.

この大気蛍光による宇宙線観測とは図 3 に示すように, シンチレーターに地球大気を用いる. これは, 宇宙から到来してきた放射線 (荷電粒子や α 線) である宇宙線が成層圏で大気分子と相互作用し, それによって生じた空気シャワー中の荷電粒子が窒素や酸素などを励起して等方的に放射するシンチレーション光を観測する事によって宇宙線を検出する方法である. 宇宙線エネルギー値は, このシンチレーション光の縦方向発達をカロリメトリックな解析を行うことによって決定する. カロリメトリックな解析方法とは, ある一次宇宙線の粒子がエネルギーを失って止まるまでに放出した二次宇宙線のエネルギーを足し合わせることで, 元の宇宙線のエネルギーを求めようとするものである. しかし, この観測方法では蛍光を利用しているため, 蛍光発生点である空気シャワーから受信望遠鏡への伝播中に存在する大気分子やエアロゾル (浮遊粒子状物質) などによって減衰する蛍光量を補正しなければならない. そこでライダーの技術を用いることにより, 大気透明度を測定して, 減衰した蛍光の光量を補正し, 元の宇宙線のエネルギーを求める.

この大気蛍光を用いた宇宙線観測を最初に採用したプロジェクトは, ユタ大学が中心となっているグループで, 1982 年にフライズアイ (Fly's Eye) を建設し, その後フライズアイ から 3.5km 離れたところに, フライズアイ (Fly's Eye) を建設した [7]. そして, これらの技術を用いて, アデレード大学, コロンビア大学, イリノイ大学, ニューメキシコ大学, そしてユタ大学による共同研究プロジェクトである, 高分解能フライズアイ (HiRes: High Resolution Fly's Eye) がある [8].

そして, 次世代の計画として, 東京大学宇宙線研究所が中心となって行うプロジェクトに, テレスコープアレイ計画 (Telescope Array Project) がある [9]. この計画は 10^{20} eV という超高エネルギーをもった宇宙線を検出するために計画されたプロジェクトであり, 1997 年から本格運用にむけての準備研究を行っており, 2003 年に完成する予定である. テレスコープアレイ計画では, 約 6000km^2 (関東平野の広さに匹敵) の広大な観測面積を有することにより, 10^{20} eV のエネルギーを持った宇宙線の検出頻度を上げる. これは, 現在世界最大の観測面積を誇る宇宙線観測装置である AGASA [12] の 60 倍の観測能力を得ることになる. テレスコープアレイ観測装置は,

1 ステーション当たり 2 段に設置された 42 台の口径 3m の反射望遠鏡から構成されており, 8 ステーションを約 30km 間隔で配置することによって宇宙線を観測する. 複数のステーションで観測する事によって有効観測面積が広くなり, また宇宙線によって発生した空気シャワーの発達状況を立体的にとらえることが可能となり, 宇宙線の到来方向, 元素組成などのより高精度で詳細な解析が実現する. そこで, 宇宙線観測面積拡張のため広大な面積の大気モニターを行う必要があり, このための一つの手段として直進性が良く指向性が良いレーザーを用いた遠隔測定法を用いる.

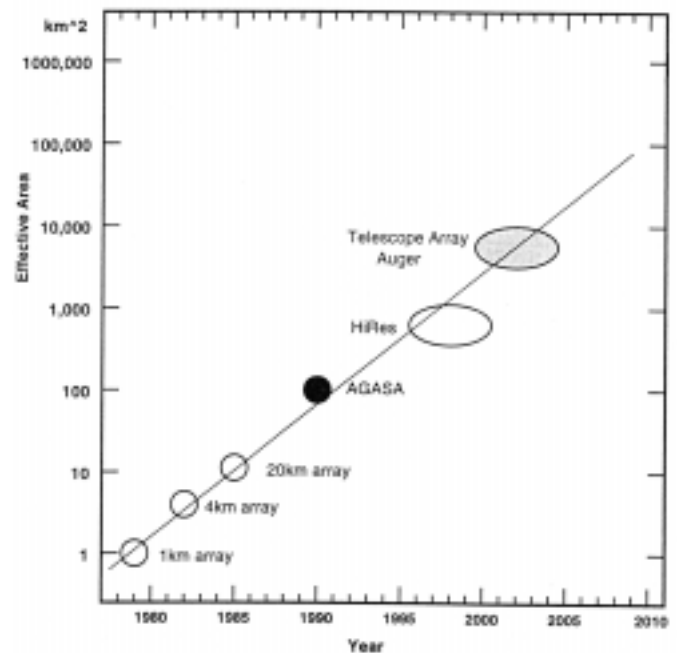


図 2: 宇宙線観測計画

宇宙線観測面積が広がっていく推移を示した図.

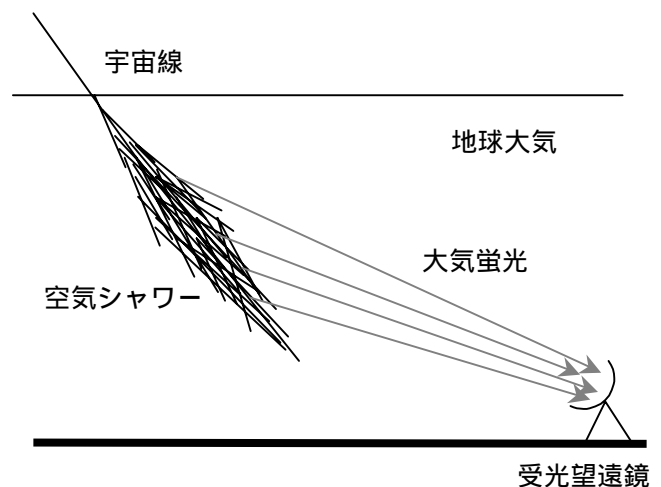


図 3: 大気蛍光による宇宙線観測

宇宙線による空気シャワーからの大気蛍光を受信望遠鏡で捉えることにより宇宙線を観測する.

3 ライダー

3.1 リモートセンシング

大気、地形、海洋などの情報を得るための技術としてリモートセンシングがある。リモートセンシングとは、電磁波が物質と相互作用する際に物質によって散乱、吸収、放射などの異なった反応を示すことを利用して、大気、地形、海洋などの情報を得る遠隔測定法である。リモートセンシングの応用分野としては、土地利用、地質、農業、林業、海洋、漁業、災害などの調査や、間接的にしかできない地球外天体の調査、地球規模の広大な範囲に渡るような大気汚染、海洋汚染、地球温暖化といった環境変化を観測する手段として用いられている。

リモートセンシングの装置としては主に二つに分けられ、情報を収集する装置であるセンサーとセンサーを搭載する台であるプラットフォームから構成されている。センサーの種類としては、光学センサーとして、画像センサー、イメージングスペクトルメーター、高スペクトル分解能センサー、ライダーなどがあり、電波センサーとして、合成開口レーダー、マイクロ波散乱計、マイクロ波光度計、マイクロ波放射計といったものが挙げられる。プラットフォームには、固定タイプとして地上設置型、移動タイプとして気球、模型飛行機、航空機、人工衛星などといったものがある。

3.2 ライダー

大気の状態を観察するためには、リモートセンシングにおけるライダーを用いる。ライダー（LIDAR: Light Detection And Ranging）は、レーザーレーダー（laser radar）とも呼ばれており、レーダー（RADAR: Radio Detection And Ranging）が電波を用いるのに対し、ライダーはレーザーを観測物体であるターゲットに照射し、その時の反応現象を利用して観測する。反応現象とは、光を物体に照射すると散乱、吸収などの反応をすることで、散乱と呼ばれる過程内容には、光の反射・屈折・透過、光の波動性による回折・干渉の複合過程などがある。光の散乱は、散乱する物質が照射された電磁波の波長に対して大きい小さいかに大きく起因する。光の波長と同じ程度の大きさの粒子に光が当たり、その進行方向を変える現象を光散乱と呼び、光の波長が短いほど著しい。光散乱には、粒子密度によって

単一散乱と多重散乱がある。単一散乱はすべての粒子が入射光に直接さらされ、入射光が1回だけ各粒子で散乱される。多重散乱は粒子密度が大きく、粒子相互間で繰り返し多数回の散乱が起こる場合である。雲による光の散乱はこの一例である。光散乱はまた、波長変化を伴わない弾性散乱と伴う非弾性散乱に分けられる。弾性散乱にはレイリー散乱とミー散乱があり、非弾性散乱にはラマン散乱がある。これらのことより、ここの物体は形状や大きさなどによって異なった散乱をするため、ターゲットについての情報を得ることができる。そして、散乱反応の違いにより、ミーライダー、レイリーライダー、ラマンライダー、共鳴散乱ライダー、蛍光ライダー、ドップラーライダー、差分吸収ライダーなどがある。ライダーによって測定できるデータとしては、ターゲットとライダー間の距離、ターゲットの形状、密度、移動速度などが得られる。

ライダーの基本的な装置の構成は図1に示すように、レーザーを発射する送信系と、レーザーによるターゲットからの反射光を集光する受信系から構成されている。送信系であるレーザー装置からレーザーを大気に向けて照射すると、大気中に存在するエアロゾルや大気分子により散乱され、受信系である受信望遠鏡でターゲットからの散乱光強度を受信する。

3.3 ライダー方程式

ターゲットから反射、散乱してくる受信光強度を求めるには、次式のライダー方程式を用いる。

$$P(R) = c\beta(R)\exp\left[-2\int_0^R \{\alpha(R) + N(R)\sigma\}dR\right]/R^2 \quad (1)$$

ここで、 R は距離、 c はライダーの装置定数、 $\beta(R)$ は後方散乱係数、 $\alpha(R)$ は消散係数、 σ は分子の吸収断面積、 $N(R)$ は分子濃度である。また、(1) 式において次式の部分は、大気の透過率を表している。

$$T(R) = \exp\left\{-\int_0^R \alpha(R)dR\right\} \quad (2)$$

(1) 式において、後方散乱係数 $\beta(R)$ と、消散係数 $\alpha(R)$ の2つの未知数があるため、この式のみでは厳密には解くことができない。そこで、この β と α の関係を仮定する方法が考えられた。Klett は β 、 α にべき乗の関係を仮定し、遠方で境界条件を与えて微分方程式を解く方法を提案し、安定な解を得た。

また、Fernald はミー散乱成分とレイリー散乱成分に分けて、それぞれ α と β の比例関係を仮定する解法

を示した。この方法は比較的消散係数の小さい大気の場合、良好な結果を与えることが知られている。

4 ライダー手法

4.1 ミーライダー

大気の散乱を取り扱う場合、観測対象の高度によって大気中に存在する構成物質の比率が異なるため、考慮すべき事柄が変わってくる。ミーライダーでは、対流圏、成層圏下部を観測対象の高度とし、この高度では散乱要素として、大気中に存在するエアロゾルなどによるミー散乱、大気構成分子によるレイリー散乱などが挙げられるが、この高度では主にミー散乱が強く影響してくる。ミーライダーでは、分子による吸収の項が無視できるために(1)は次式のように表せる。

$$P(R) = c\beta(R)\exp\left[-2\int_0^R \alpha(R) dR\right] / R^2 \quad (3)$$

ミーライダーにおける後方散乱係数は、エアロゾルなどによる後方散乱係数 β_a と、空気分子による後方散乱係数 β_m を足しあわせた物を考慮する必要がある。

ミー散乱 (Mie scattering) とは、半径が光の波長の $1/10$ あるいはそれ以上の球形粒子による散乱で、エアロゾルや雲粒による太陽光の散乱がこれにあたる。ミー (Mie, G, 1908) が、均質電媒質球に平面電磁波が入射する場合のマクスウェル方程式の厳密解として得たミー散乱の理論は、粒子が小さい場合および大きい場合の極限として、それぞれレイリー散乱および幾何光学理論をふくんでいる。ミー散乱の 1 つの特徴は、前方散乱が卓越し、この傾向は粒子が大きくなるほど顕著になる。

ミーライダーの用途として次のようなものもある。成層圏のエアロゾルは火山によって大きく変化するため、この観測は世界初のライダーの例として取り上げられている。また、極域でのオゾンホールの原因となる極域成層圏雲の観測もライダーが用いられている。

4.2 レイリーライダー

高度 30km の成層圏上部から 90 km の中間圏圏界面付近の領域では、エアロゾルがほとんど存在しないため、大気分子によるレイリー散乱のみを考慮すればよく、そのためこの高度領域での大気観測をレ

イリーライダーと呼ぶ。

レイリー散乱 (Rayleigh scattering) とは、半径が光の波長の $1/10$ 以下の微粒子による光の散乱で、空気分子による太陽光の散乱、雲や雨などの水滴によるマイクロ波の散乱などがこれにあたる。レイリー散乱は一樣な媒質中に微粒子がランダムに存在しているときに特に重要で、その場合には全散乱波の強度は、おのこの微粒子による散乱波の強度の和で与えられる。等方的に分布した微粒子による偏光していない光については次のレイリー公式が成り立つ。

$$\frac{\text{散乱波強度}}{\text{入射波強度}} = \frac{8\pi^4 N \alpha^2 (1 + \cos^2 \theta)}{\lambda^4 r^2} \quad (4)$$

ここで、 N は微粒子の数、 α は分極率、 θ は散乱角、 λ は波長、 r は散乱体から観測点までの距離である。レイリー散乱は、入射光によって微粒子に電場が作用し、微粒子内に電気双極子モーメントが誘起されることによると考えられる。その特徴は、散乱波の強度が微粒子の数に比例し、微粒子の形に依存しないことである。また、散乱係数は光の波長の 4 乗に逆比例し、波長の増加とともに急速に減少する。散乱光強度は $1 + \cos^2 \theta$ に依存し、前方 (散乱角 0°) 及び後方 (散乱角 180°) を 1 とすると、側方 (散乱角 90°) では 0.5 の前後対称の角度分布を示す。

レイリーライダーを用いることによって、大気分子の密度・温度を測定することができるため、これらの情報から中間圏の内部重力波、潮汐の大気波動の研究などに用いられている。

4.3 ラマンライダー

ラマンライダーとは、大気分子の振動ラマン散乱や回転ラマン散乱を利用するライダーである。ラマン散乱とは、分子によって散乱された後に波長がそれぞれの分子の回転振動準位によるラマンシフトを受けた散乱光が出てくる非弾性散乱である。その性質を利用することによって、1 波長のライダーで様々な分子を同定することができる。これにより大気微量分子の測定が可能であるが、ラマン散乱の散乱断面積は、レイリー散乱より数桁小さいためこの測定への応用は難しい。実際に利用されている測定は、水蒸気分布の測定や気温の測定に限られている。レーザーとしては、ラマン散乱の散乱断面積が波長

の4乗に逆比例するため紫外領域のレーザーが用いられている。

4.4 共鳴散乱ライダー・共鳴蛍光ライダー

共鳴散乱ライダーは、高度 100 km の中間圏圏界面付近に存在するナトリウム、カリウム、鉄等の金属原子層を観測するのに用いられている。共鳴散乱では、散乱断面積がレイリー散乱やラマン散乱に比べて格段に大きいため微量な物質の検出が可能となる。そこで金属原子層の生成過程や、金属原子をトレーサーとして中間圏上部の波動の観測や温度の観測に利用されている。

共鳴蛍光ライダーは、分子、高分子やそれらの液体において、散乱光が分子の回転振動準位の分だけずれた蛍光を発して遷移ことにより、入射光とは異なった各分子特有の蛍光スペクトラムを持つことを利用したものである。共鳴蛍光ライダーは海洋中のクロロフィルや海面の油膜などの海洋観測に利用されている。

また、これら共鳴散乱、共鳴蛍光はレーザー光の波長が分子や原子の吸収線波長と一致する場合に観測されるため、この観測に用いるレーザー波長は観測したい原子の吸収線に同調させなくてはならない。

4.5 ドップラーライダー

ドップラーライダーは、風向風速を測定するために用いられており、風により移動する散乱体において、散乱光の周波数のドップラーシフトを測定する

5 Summary

このようなライダーは次の様なことに利用されている。ミーライダーを用いることによって、エアロゾルをトレーサーとして大気構造を可視化して観測することができ、また、エアロゾルの分布パターンの移動を用いることによって風向風速を測定できる。その他にも、対流圏のエアロゾルの定常的な観測、黄砂の観測、成層圏の高度 20km 付近における火山噴火などによって形成されているエアロゾル層の観測、極域成層圏での極成層圏雲と呼ばれるオゾンホールに深く関わっているエアロゾルの観測、人工衛星からのセンサーで観測できない低高度での雲の観測といったものに利用されている。また、大気成分の測定には差分吸収ライダーが有効であり、排煙中の汚染物質や工場周辺の汚染気体や有毒ガスの漏えい検知、対流圏や成層圏のオゾンの観測などに利用

ことによって求めることができる。ドップラーライダーにはコヒーレント方式と、インコヒーレント方式がある。コヒーレント方式は受信光の検出にヘテロダイン検出方式 (heterodyne detection 又は coherent detection) を用いており、インコヒーレント方式はエタロンなどを使って周波数シフトを測定する検出方式である。

風の観測においては、その観測高度により大気組成分子が異なるために、観測高度が対流圏の時には主にコヒーレント方式が用いられ、成層圏の時はインコヒーレント方式が用いられている。

4.6 差分吸収ライダー

差分吸収ライダー (DIAL: Differential Absorption Lidar) とは、分子ごとにそれぞれ違った吸収をするという性質を用いることにより、気体成分の測定をする。測定には、測定対象である物体の吸収が大きい波長と小さい波長のレーザーを用いて行う。そして、この2波長のレーザーによる受信光の比である差分吸収により、測定対象分子の密度を測定する。DIAL は、大気汚染などの濃度分布、対流圏の水蒸気観測や地上から成層圏までのオゾンなどの大気微量成分の測定などに使用されている。

されている。また、水蒸気の観測には差分吸収ライダーとラマンライダーが有効であり、気温の測定においては高度 30km ~ 90km の成層圏、中間圏はラマン散乱を用いることによって、対流圏はラマン散乱を用いることによって観測し、気圧の測定には大気中の酸素の吸収スペクトルの気圧依存性を差分吸収ライダーによって測定する。

このように、ライダーによって知ることの出来る情報としては、大気中における風向風速、気温、湿度、汚染物質の濃度分布などがあるが、ライダーは観測する対象物によって散乱の仕方が異なるという性質を利用することによってターゲットの情報を得ている。しかし、これらの方法は気象などの分野で一般に使われている方法であり、蛍光を用いた宇宙線観測の分野にはそのまま利用することが出来ない。

なぜなら，一般的なライダーというのは，ターゲットが何であるのかがあらかじめ分かっており，その分かっている成分についての濃度や分布がどのようになっているのか，ある気体に含まれている分子成分の割合がどれくらいであるか，といったことを主に測定するからである．宇宙線観測におけるライダー利用の目的は，大気の透明度測定であるが大気の状態は刻一刻と変化しているため大気分子，雲，エアロゾルなどが大気に占める割合はその状況によって異なってくるため，一般的なライダーでは不十分

でありこれをもとにして改良していかななくてはならない．そのために，我々は大気透明度測定のために様々な実験を行っており，一般的なライダーで使用するターゲットからの散乱光は，後方散乱しか使用しないが，それを拡張して大角度散乱光まで含めて大気透明度を求めようとしている．これについては [10][11] で詳しく述べている．また，現在はまだ試行錯誤の段階であるため，今後これらの方法を用いて大気透明度測定の方法を確立し，大気蛍光法による宇宙線観測に利用できるよう研究を続けていく．

References

- [1] 田幸敏治，辻内順平，南茂夫，板部敏和：光測定ハンドブック p.335，朝倉書店（1994）
- [2] 下田晴久，他：地球の観測，p.35，岩波書店（1996）
- [3] 竹内延夫：レーザーレーダーとその応用，光学，16（1987）
- [4] 杉本伸夫，竹内延夫：レーザーレーダーによる大気計測，応用物理，63（1994）
- [5] トーマス・オハロラン，ピエール・ソコルスキー，吉田滋：パリティ，Vol.13，No.10（1998）
- [6] 福井崇時：粒子物理計測学入門，共立出版株式会社（1992）
- [7] R.M.Baltrusaitis et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A240（1985）410-428
T.Abu-Zayyad, et al., 1999, Proc.26th ICRC(Salt Lake city, 1999)OG.4.5.02
L.R. Wiencke, et al., 1999, Proc.26th ICRC(Salt Lake city, 1999)OG.4.5.11
- [8] <http://sunshine.chpc.utah.edu/research/cosmic/hires/collaboration.htm>
R.Gray et al., et al., 1999, Proc.26th ICRC(Salt Lake city, 1999)OG.4.5.04
Georgianna Martin, et al., 1999, Proc.26th ICRC(Salt Lake city, 1999)OG.4.5.06
T.Abu-Zayyad, et al., 1999, Proc.26th ICRC(Salt Lake city, 1999)OG.4.5.08
J.R.Mumford et al., 1999, Proc.26th ICRC(Salt Lake city, 1999)OG.4.5.10
- [9] <http://www-ta.icrr.u-tokyo.ac.jp>
Aoki, T., et al., 1999, Proc.26th ICRC(Salt Lake city, 1999)OG.4.5.03
- [10] Hayashida, N., et al., 1999, Proc.26th ICRC(Salt Lake city, 1999)OG.4.5.05
Chikawa, M., et al., 1999, Proc.26th ICRC(Salt Lake city, 1999)OG.4.5.17
- [11] Tracey Tessier, et al., 1999, Proc.26th ICRC(Salt Lake city, 1999)OG.4.5.18
Matthews, J.A.J., et al., 1999, Proc.26th ICRC(Salt Lake city, 1999)OG.4.5.19
- [12] <http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/as/project/agasa.html>
- [13] <http://www.nies.go.jp/index-j.html>