《マイレビュー》

宇宙線ミュー粒子と半導体光検出器

科学分析支援センター　中村　市郎

総合科学支援センターが平成 15 年 4 月に設立されて 9 年目になる. 設立と同時に物理学科から移ってきたわけであるが, ちょうどその頃石渡先生と一緒に遣っていた半導体光検出器の開発について述べる. 光半導体の分野はこれまでやってきた宇宙線研究とは全く違う専門外の分野であるが, なぜ専門外のことを始めたか, その辺のいきさつから述べる.

1. 宇宙線ミュー粒子について

地上に降り注ぐ宇宙線で一番多いのはミュー粒子で, 次に電子, 中性子などである. このミュー粒子の研究に私が関わったのは 70年代で, 宇宙線としてのミュー粒子の研究（1TeV=10^{12}eV 領域のスペクトラムの測定や, 1 次宇宙線分布の研究など）と素粒子であるミュー粒子の物質との相互作用の研究があった. 加速器のエネルギーが上昇すると共に, 相互作用の研究は加速器を用いた実験に席を譲ることになるが, 当時はまだ 1TeV 以上の加速器はなかった. 宇宙線ミュー粒子の研究は主に電磁石を用いたミュー粒子スペクトラムの測定で当時 1TeV 位までが限界であった. その頃, 全国共同利用研究所である東大宇宙線研究所に, 10TeV 以上の超高エネルギー・ミュー粒子のエネルギーを測定する巨大な電磁石の建設がはじまり, それに参画することになった. 多くの人の努力で, 世界ではじめて数 10TeV までのミュー粒子のスペクトラムを観測した. 同時にミュー粒子の核相互作用研究も行われた. 我々が観測したミュー粒子のスペクトラムはかなりの論文に引用された.

近年はミュー粒子そのものより, ニュートリノが研究対象として脚光あびている. その訳は, まだ解明されていない大きなテーマの 1 つに, 宇宙線の源の問題がある. 実際 10^{20}eV に及ぶ宇宙線が観測されているが, その加速機構は何か？それが天体の激しい活動で行われるとすると, どの天体から宇宙線が来るのかを調べなければならない. ところが電荷をもった宇宙線は銀河磁場で方向が曲げられてしまうので, 宇宙線源を知るためには中性の粒子を観測しなければならない. それに適しているのがニュートリノと γ 線である. このような超高エネルギー・ニュートリノやγ線はどのようにして発生するか. 高エネルギーに加速された陽子や原子核が物質と衝突すると多数の中間子が発生する. 荷電中間子は崩壊してミュー粒子とミュー・ニュートリノを発生する. さらにミュー粒子は崩壊して, 電子と電子・ニュートリノとミュー・ニュートリノが発生する.

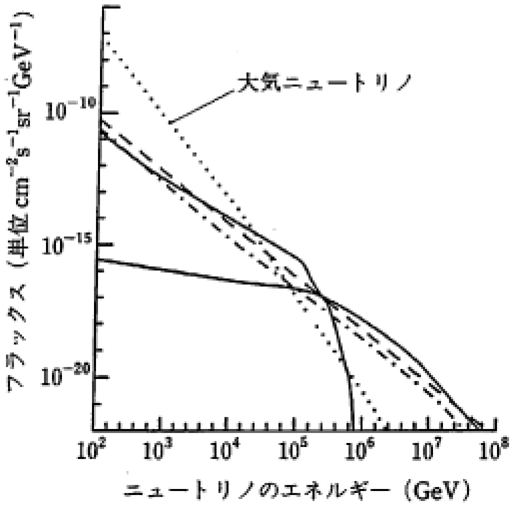
$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \qquad \pi^- \rightarrow \mu^- + \overline{\nu_\mu}$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \overline{\nu_\mu} \qquad \mu^- \rightarrow e^- + \overline{\nu}_e + \nu_\mu$$

超高エネルギー陽子・原子核の崩壊で, そのエネルギーの一部を受け継いで超高エネルギー・ニュートリノが発生する. このほか, 宇宙空間ではパイ中間子の光発生という現象でも超高エネルギーパイ中間子が作られる. ではどのような天体が超高エネルギー・ニュートリノ発生源の候補になるか？

候補としては, X 線連星系, 超新星残骸, 活動銀河核などが考えられているが, 最も可能性のあるのは活動銀河核であろう. それはセイファート銀河と呼ばれ,中心部が特に明るく輝いている銀河がある. ごく小さな中心部だけで銀河円盤全体と同じくらい輝き, その明るさは太陽の 10 億倍から 1 兆倍に達する. またクエーサーと呼ばれ, 非常に遠方にあり, 一見星のように見えるが, 太陽の 1 兆倍から 100 兆倍の巨大な放射を行っている. 両方ともそのスペクトルが似ていることから, 同じ機構で巨大なエネルギーを放射していると考えられ, 活動銀河核または

AGN(Active Galactic Nuclei)と呼ぶ. 現在一般的になっているAGNの姿は, 中心に超巨大質量のブラックホールがあって, その周りをブラックホールに飲み込まれるガスの回転円盤が取り巻いているものである. ブラックホールのつくる巨大な重力場をガスが落下すると, ポテンシャルエネルギー解放され, そのエネルギーが放射に変換される. 太陽の 10 兆倍の放射エネルギーをまかなうには年に太陽 6 個分の質量をブラックホールに吸い込ませればよいだけだそうである. このような激しい活動をするAGNの回転ガス円盤中には強い衝撃波が発生し, 統計的加速で粒子が10^{18}〜10^{19}eVまで加速されると考えられている. 加速された陽子は高密度に存在する光子と衝突してパイ中間子を作り, 先ほどの過程でニュートリノを発生すると考えられている. ニュートリノのフラックスには種々の理論的予言がある. (右図参照) [1].



AGNからの超高エネルギーニュートリノのスペクトル。それぞれの曲線は異なる理論の予言を示す。比較のため、大気ニュートリノのフラックスも示す。[*High Energy Neutrino Astrophysics*, edited by V. J. Stenger *et al*.（World Scientific, Singapore, 1992）より。]

図1 ニュートリノの強度

ニュートリノは電気的に中性であり, ニュートリノの検出は物質と反応して発生する電子やミュー粒子を検出することで得られる. ミュー・ニュートリノは物質と反応して, ミュー粒子を作る.

$$\nu_\mu + \mathrm{N} \rightarrow \mu + \text{anything}$$

したがって, ミュー粒子のエネルギーと進行方向を検出することで, ニュートリノのエネルギーや到来方向を推定出来る. 高エネルギー・ニュートリノはフラックスが少なく, 物質との反応する確率が極めて低いのが特徴である. たとえば, KAMIOKANDE が観測しているような 1GeV 以下ニュートリノは地球でさえ何も反応せず通過してしまう. ただ, 反応の確率はエネルギーと共に上昇するので, 超高エネルギー・ニュートリノになると地球と反応するようになるが, それでもニュートリノを捕らえるには膨大な量の物質が必要となってくる. 例えば, 前ページの図でわかるようにフラックスも低いので 1TeV 以上のニュートリノを検出するには, 10-100 億トンの物質が必要になってくる. 自然界にあるもので, 大量にあるのは水(氷)である. さらに, ノイズとなる電子や大気ミュー粒子などを除かなければならない. KAMIOKANDE が地下深くに作られたのはそのためである. このように, 深海や深い湖底, 深い氷中などに測定器を設置する必要がある. 実際, 南極の氷中深く, あるいはバイカル湖の湖底に耐圧容器に入れた光電子増倍管を沈めて実験を行っている. ハワイ沖の深海に装置を設置する DUMAND 計画の場合には, 耐圧容器は 500 気圧以上の耐圧が必要で, 一本のワイヤーの長さが 1km で, それに 200 個の検出器(光電子増倍管)を取り付けるのでものであった. ワイヤーの数はデザインにもよるが 100 本以上で, 検出器の数は 1 万本をこえることとなる. このような装置の維持は大変である. したがって, 光検出器は高圧力下でも安定に作動し, かつ省エネルギーで可能な限りメンテナンスフリーが望ましい. そのためには光電子増倍管のようにガラスで作られた検出器でなく, 半導体の検出器が考えられる. 実際, 神岡の実験装置(Super KAMIOKANDE)では, 衝撃波で多くの光電子増倍管が破損する事故が起きた. もちろん現在稼働している南極やバイカル湖の実験では分厚いガラスの耐圧容器に入れた光電子増倍管が使われている. 以上のことから超高エネルギー宇宙線ミュー粒子やニュートリノの検出のために新しい半導体光検出器を開発することになった.

2. 半導体検出器

上述したように超高エネルギー・ニュートリノとミュー粒子の検出には荷電粒子が水中で発するチェレンコフ光を光電増倍管で捕らえる方法が用いられてきた. しかし深い海や湖, 南極などの氷の下で観測を行うには高圧力に耐え, 省電力, 長期安定なメンテナンスフリーの光検出器が必要である. かつ光電子増倍管のように10~100万倍に増幅できる検出器が必要である. このために, 半導体検出器が妥当と思われるが, 現在発売されているアバランシェ半導体光検出器は増幅度が数十倍程度で, 受光面積も小さい. それで, 増幅度が高く, 受光面積の大きい光検出器を開発しようとした. 幸い, 浜松フォトニクスの協力を得て, 研究に着手した.

この時点で, 考えられた新奇なアバランシェ光検出器は2つあり, 1つめは超格子型光検出器, 2つめはMRS型光検出器である. 超格子型光検出器は GaAs/AlGaAs を多層に配置した量子井戸型の電子増倍方式である. 一方 MRS 型は通常のアバランシェ光検出器に抵抗層を作成することで, 高電圧印加時においても, アバランシェが暴走しないように抑制する方法である. この Review では紙面の関係で MRS 型について述べたい.

MRS 型アバランシェ光検出器

本研究の目的は, チェレンコフ光などの微弱光における高感度かつ高速応答性にすぐれた半導体光検出器の開発である. 一般に, 光検出器としては光電子増倍管, フォトダイオード(PD), アバランシェフォトダイオード(APD)などがある. 光電子増倍管は高感度, 高速応答性に優れているが, 低消費電力, 長期安定性の面では, 半導体のほうが優れている. しかし, 現状の APD では増幅度が 100 倍程度と, 微弱光検出には不十分である. また, アバランシェ増倍過程は, pn 接合にブレークダウン電圧以上の逆バイアスがかかると制御不能になる. したがって, 通常の APD ではブレークダウン電圧以下で動作させなければならない. さらに, APD は印加電圧に対する安定性が悪く, 製作するときに, 材質の高い均質性が要求される.

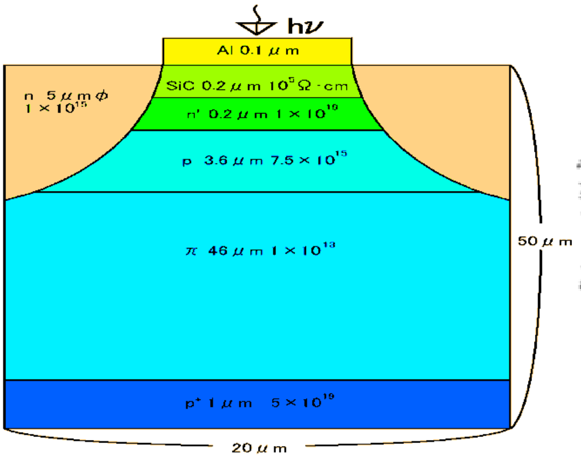


図2 MRSの模式図

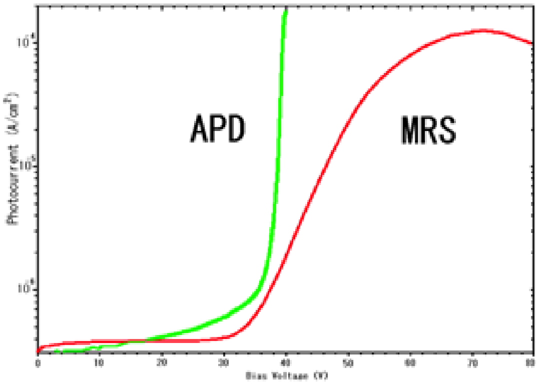


図3 APDとMRSの比較

このため, 我々は高感度, 高速応答性の半導体受光素子の候補として, Z.Y.Sadygov らによって提唱された LNF(局所負帰還型)−MRS 素子に着目した. これは, 上図のように, 金属層(Metal), 抵抗層(Resistivity-Layer), 半導体層(Semi-conductor)の3層構造から構成されている. 抵抗層と一般に不均一なドープ量を持つ半導体層との間で局所負帰還の回路を構成し, アバランシェ増倍過程を制御しようというものである. この MRS 型 APD 素子は製作するときに材質の均質性をそれほど要求せず, 電圧の安定性が非常に良い. 下記のような局所負帰還型の等価回路について計算すると上の右図のようになり, 通常の APD はブレーク電圧で急激に電流が流れノイズが増える. 一方 MRS 型は徐々に増えるため電圧安定性が良い. 試作された MRS 型 APD 素子の I-V 特性を測定し, さらに素子の温度依存性, 光量依存性について測定を行い, LNF 型 MRS 素子の特性および有用性について検討した.

Sadygovらが提唱しているMRS型APDの基本的な構造は, 半導体基盤, 抵抗層, 金属電極である. 半導体基

盤には 1～10Ωcm 程度の抵抗率を持つ p 型 Si を用いる. 抵抗層としては抵抗率が 10^6～10^8Ωcm の炭化珪素, 酸化チタン, 水素化珪素などの半絶縁体を用い, 厚さは 0.1μm オーダーとする. 金属電極はニッケルまたはアルミニウムで作る.　ここで同じ半導体基板上に作られた APD と MRS を考え両者の特性を比較する. アバランシェ増倍過程の増倍率 M は二つの素子とも, 半導体に掛かるバイアス電圧 Vb との関係として Miller の実験公式によって与えられ, MRS, APD それぞれは

$$M = \frac{1}{1-(V_{b.MRS}/V_B)^n} \qquad (1)$$

$$M = \frac{1}{1-(V_{b.APD}/V_B)^n} \qquad (2)$$

で表される. $V_{b,MRS}$ と $V_{b,APD}$ は APD と MRS の半導体における表面ポテンシャル(バイアス電圧), V_B は半導体のブレーク電圧であり, n は 1～4 の間で変化する経験的なパラメータである.　APD の場合は素子に供給される電圧を V とすると $V_{b,APD}$＝V である.　MRS の場合は半導体中にて生成される電流密度を I_g, 受光面積を S, 抵抗層の抵抗を R_r として $V_{b,MRS}$＝V－I_g・S・M・R_r である. 半導体のブレークダウン電圧 V_B は Sze らが求めた実験公式を用いると,

$$V_B = 60 \times \left(\frac{E_g}{1.1}\right)^{\frac{3}{2}} \times \left(\frac{10^{16}}{N_a}\right)^{\frac{3}{4}} \quad \text{(Volts)} \qquad (3)$$

と記述される.

ここで E_g は半導体のバンドギャップエネルギー(eV)で, N_a は p 層のアクセプター密度(cm^{-3})であり, 上の(1)~(3)式の I_g , E_g, N_a は定数としている.

しかし, 実際の半導体では常に不均一性が存在する. 受光領域の不均一性は生成された電流密度 I_g, バンドギャップ E_g, ブレークダウン電圧 V_b などのばらつきを引き起こす. ここで, ドープした不純物密度の不均一性があるときの APD, MRS に対する影響を考える. 今, S＝1 mm^2 の等しい受光面を持った APD と MRS を考える. APD, MRS どちらとも Na の異なる二つの領域からなるものとする. 一つ目の領域は N_{a1}＝$1.6\times10^{16} cm^{-3}$ の不純物濃度を持ち, 面積が $S_1 = 0.999mm^2$ の領域とする. そして二つ目の領域は $N_{a2} = N_{a1} + 0.01 \times N_{a1}$ の不純物濃度を持ち, 面積が $S_2 = 0.001mm^2$ の領域とする. ここで, 受光面積 S の全体が均一な不純物濃度 N_{a1} を持つ場合と, 均一な不純物濃度 N_{a2} を持つ場合の各々についてと図 4 の等価回路から APD と MRS の二つに対して増倍率 M 対供給電圧 V の関係を求めると図 3 の結果が得られる. ここで Si 結晶は高純度のものとして E_g＝1.1eV としている. 計算に用いた Rr の値は 100Ω とした. 図では APD に対して MRS の三つの主な利点が示されている.

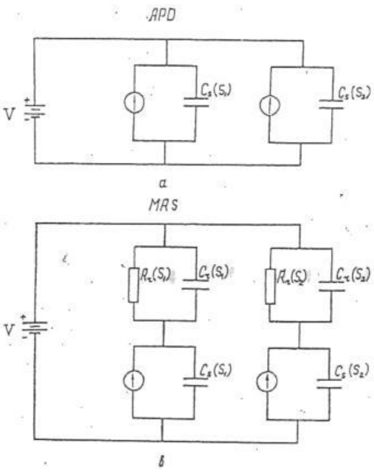


図 4　等価回路

○　MRS 構造では電圧 V に対して増倍率 M は緩やかな変化しかしないという特性をもっている. これは MRS 構造では高い精度の安定化電源を必要としてない事を示している.

○　供給電圧を上げて増倍率を変化させたとき, ブレークダウン近傍では APD の領域 S_1, S_2 における増倍率はお互いに大きく離れていくのに対して, MRS の場合はブレークダウン電圧を越えても差が広がらず, むしろ増倍率はお互いに近づいていく. 増倍率の平均は

$$<M>=\frac{M_1\times S_1+M_2\times S_2}{S_1+S_2}$$

である．APD の場合は $M_1=100$, $M2=4\times10^3$ であるから，$<M>\cong104$ であり，MRS 構造の場合は $M_1=100$, $M_2=190$

○ APD の場合，半導体基板の不均一性は増倍率を大きく制限してしまう．すなわち図 3 より $M_1>116$ となる電圧 V のとき，二つ目の領域では $M_2\to\infty$ となり，制御不可能なブレークダウンが起こる．この領域の面積があまりに広いと，素子全体の品質低下に結びつく．したがって，二番目の領域の面積はあまり大きくできないので，素子全体としての＜M＞も低く押さえられてしまう．MRS 構造ではどの電圧でも M_1 と M_2 の値が近いため，このような制限はない．たとえば MRS 構造でのアバランシェ増幅の平均値が 10^2 から 10^4 まで増加したとき，M_1 と M_2 の相対的な差は

$$\frac{M_1-M_2}{<M>}$$

で 10%から 3%に減少している．

このように，MRS 構造の増幅率の平均値$< M >$は増加し最大値に近づくにしたがって相対的な差は LNF のために減少する．そしてこの差の最大値の位置は不純物濃度の不均一による V_B のばらつき具合と抵抗層の抵抗値により決定される．一方，APD は 10^3 以上の増幅率を得る事ができるが，アバランシェ増幅の相対的な差は数百パーセント以上になってしまう．MRS 構造においては，高い増倍率での安定したアバランシェ過程は素子の局所負帰還のために得られた．この LNF は領域 S_2 の抵抗層により起こったものである．すなわち，領域 S_2 では S_1 と比べて不純物濃度 Na が大きいため，ブレークダウン電圧 V_{B2} は領域 S1 のブレークダウン電圧 V_{B1} より低い．その結果として抵抗層のため半導体に加わる電位の低下が起こる．つまり，素子に供給される電圧は一定だから，抵抗層にかかる電圧が増加するため，半導体にかかる電圧は低下し，増倍率は制御される．

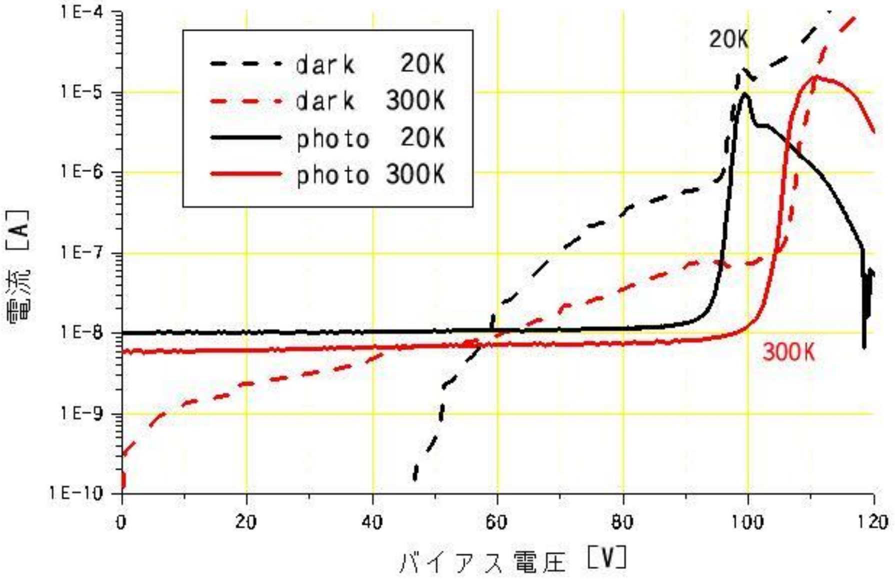


図 5　I-V 特性

図 5 はバイアス電圧と電流の測定値で暗電流, 光電流が温度でどう変化するかを表している. 図 6 は光量と光電流の関係を表している. 増倍率が低い 60V 以下では光電流が入射光量に比例しているが, 増倍率 1000 倍以上の 100V 付近では光量の依存性が弱い. これを何とか改善できないかやって来たが, 残念ながらうまくいっていない. 何か新奇なアイデアが必要である.

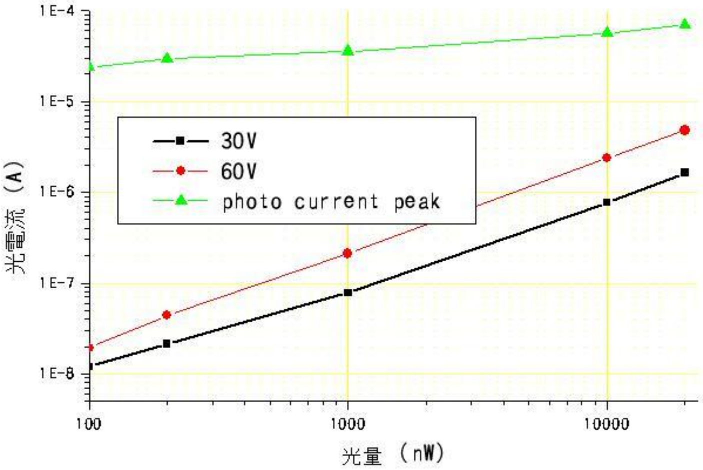


図 6 光量依存性

今後

4〜5 年前から, これまで開発されてきた放射線検出器を組み合わせて, より性能のよい検出器を作ろうという動きがあり, この考えは車のハイブリッド化と同じ流れである. そのような視点で, 最近大口径の HARD(Hybrid Avalanche Photo-Detector)が開発された[2]. 単一光電子が検出可能で, 波高分解能 11%, 時間分解能 200ps の高分解能であると報告されている. しかし, 外形は光電子増倍管と同じくガラスで作られていて, 電子の増倍のところを半導体で置き換えたものなので, 衝撃に弱く耐圧も問題である. また, 印加電圧が 10-20keV と通常の光電子増倍管の 10 倍の高電圧が必要である. 深海や氷中での実験には光電子増倍管と同じ問題が起こる. 従ってハイブリッドでなく, 電気自動車(EV)のように半導体のみで作られた光検出器が必要である.

謝辞

最初に述べたように, 科学分析支援センターの設立と同時に, 物理学科からセンターに来たのだが, 計測装置(分析機器)が物理実験, 特に宇宙線や素粒子･原子核実験で使う装置とかなり異なっていて, 戸惑った記憶がある. しかし, 測定機器の原理はほとんど物理の原理を基にしている(X 線回析, 分光器, 核磁気共鳴など)ので大枠を理解するには問題なかった. しかし, 分析機器の具体的操作や, 維持は他のスタッフにすべてやっていただき, 私はほとんどやらずに, ご迷惑を掛けてきた. この紙面を借りて, お詫びとお礼を申し上げる.

参考文献

1) ニュートリノで探る宇宙　中村健蔵著　倍風館

2) 阿部 利徳, 相原 博臣, 田中 真伸, 河合 克彦; 日本物理学会誌 66(2011)821