

南極氷床ニュートリノ検出器におけるレーダー法の開発研究

Research and development of radar method in neutrino detector at Antarctic ice sheet

千葉 雅美¹⁾ 上條 敏生¹⁾ 矢吹 文昭¹⁾ 谷川 孝浩¹⁾ 内海 倫明²⁾ 谷内 康行²⁾
藤井 政俊³⁾ 秋山 英俊⁴⁾

Masami CHIBA Toshio KAMIJO Fumiaki YABUKI Takahiro TANIKAWA

Michiaki UTSUMI Yasuyuki TANIUCHI Masatoshi FUJII Hidetoshi AKIYAMA

¹⁾首都大学東京 ²⁾東海大学 ³⁾島根大学 ⁴⁾成蹊大学

(概要)

超高エネルギーニュートリノ検出器の開発研究に於いて巨大岩塩鉱山を検出媒質として利用するために、2MeVの電子ビームを435MHz岩塩充填導波管に照射すると共に電波信号を導入し電子ビーム照射領域からの電波反射を測定しました。さらに南極氷床を検出媒質として利用可能性を調べる為に氷充填可能な435MHz同軸管を開発し、氷の代わりに岩塩を充填して高感度の電波反射測定に成功しました。両者共に電波反射エネルギーは照射した電子ビームの加速電圧と電流の積の2乗に比例することが観測されました。

キーワード：

超高エネルギーニュートリノ、電波反射、レーダー、岩塩、氷、誘電率

1. 目的

超高エネルギーニュートリノは宇宙空間を満たしている宇宙背景輻射(温度3Kの黒体輻射の光子と超高エネルギー宇宙線との衝突で定常的に生成されることが確実視されています。この超高エネルギーニュートリノ(約 10^{18} eV)の検出器の開発研究を目的にしています。飛来頻度が $1/(\text{km}^2 \cdot \text{day})$ と低い為、巨大質量(50Gt)の検出媒質が必要となります。超高エネルギーニュートリノ検出方法の新しい方法として我々は放射光X線を利用した研究で導波管中の電離された岩塩標的へ放射光X線とマイクロ波の照射を行い電波反射効果を発見しました。さらに日本原子力研究開発機構高崎量子応用研究所1号加速器に於いて2MeV電子ビームにより自由空間に設置された10cm立方体岩塩標的及び岩塩充填導波管で435MHzに於いて電波反射効果が再現されました。

米国グループのCote Branche岩塩鉱山(ルイジアナ州)やHockley岩塩鉱山(テキサス州)の最近の測定電波減衰長は100MHzで約100mと短く利用するには不十分であることが判明しました。ドイツのAsse鉱山試料の我々の試料挿入孔封鎖型振動空洞共振器による測定では十分な電波減衰長がありました。既に閉山が決まっています。適当な鉱山が現在のところ見つかりません。電波反射原因が局所的な温度上昇に伴う誘電率の局所的増加であるならば、他の誘電体においてもこの効果がおきることが推測されます。南極の氷床は巨大誘電体検出媒質候補として有効です。南極氷床の電波減衰長は300-600MHzでは電波減衰長が1km以上と測定されていて検出媒質として利用可能な程長いです。本研究では氷でも電波反射効果があるかどうかを実験する為の実験装置を製作し、装置が期待通りに働くことを氷の代わりに岩塩からの電波反射測定で確かめます。

2. 方法

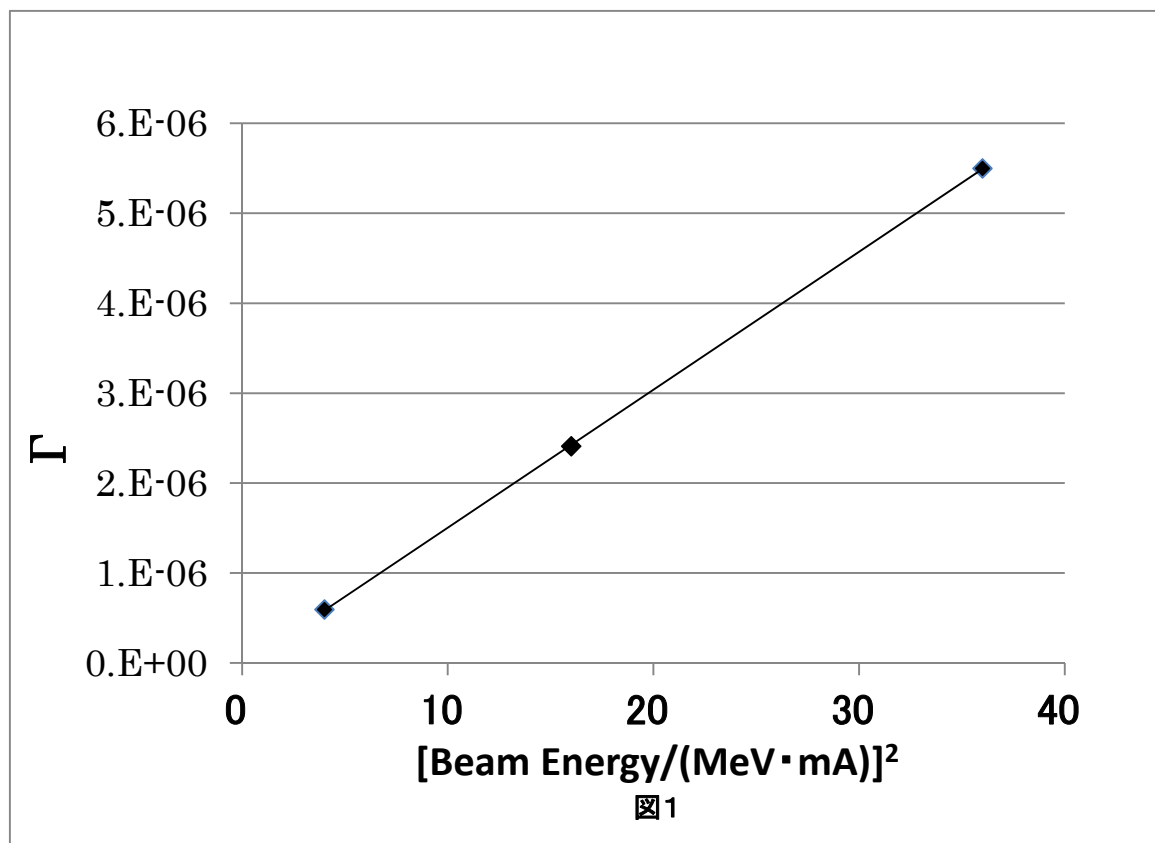
従来から米国や我々で計画してきた電波検出法（アスカラヤン効果あるいは干渉チェレンコフ効果）は超高エネルギーニュートリノが岩塩と反応時に発生する電波を検出します。発生電波電力は岩塩中の電波減衰長の長い低周波数では小さいので 100-500MHz 程度での検出が必要となります。この周波数ではドイツ Asse 鉱山でも減衰長が 300m 程度で、電波検出アンテナの 300m 間隔の設置には 100 本の深さ 3km の井戸を掘削する高額な費用を必要とします。電波反射効果を媒質中でレーダー法として利用可能ならば減衰長が 1km にもおよぶ場合は大きな媒質体積を井戸なしで氷床面設置のアンテナで済むことになります。その結果、検出器建設費用の主要部分である井戸掘削費用を大幅に削減することが可能となります。超高エネルギーニュートリノ反応に伴って反応生成物であるシャワーが紡錘形に発生します。水中ではシャワーの長さ約 10m、直径は約 20cm となり、この直径が電波の四分の一波長(400MHz)程度の時に紡錘軸の垂直方向へ反射強度が干渉性によって高くなります。この周波数では南極氷床中で電波減衰長が 1km 以上あり好都合です。

岩塩充填導波管に加えて、新たに直径 2cm の岩塩充填同軸管を新たに製作しました。これは岩塩を充填していますが、氷充填へ変更可能なもので今回の実験ではこの装置で岩塩に対する電波反射率を測定し同軸管による測定が行えるかどうかを調べました。連続した高周波信号を岩塩充填同軸導波管へ供給し、その反射信号を受信しながら電子ビームを 1 分間、岩塩充填同軸管の直径 2cm の開放端面へ照射しました。電子ビームシャッターの開閉により照射時間を制御しました。電子ビームの加速エネルギーと電流を幾つかの値に変化させてデータを収集しました。送信電波周波数は 435MHz で -10dBm の電力です。同軸管の信号端子に於ける送信信号と受信信号はサーキュレータで分離します。極微弱な信号を受信するために、高周波ブリッジ回路を利用したゼロ位法で電子ビームを照射しないときの出力をゼロに調整しました。電子ビームを照射したときの 1 秒毎の電波反射信号を通常のスペクトロアナライザで測定し、1.28 ミリ秒毎の短時間の変化を測定する為にはリアルタイムスペクトロアナライザにデータを取得しました。一方では信号を増幅、検波してデータロガーに岩塩温度を記録する熱電対信号と同時に記録しました。

3. 研究成果

宇宙の高エネルギー状態を調べる上で超高エネルギー宇宙線（主に陽子）は宇宙背景輻射(温度 3K の黒体輻射の光子)との衝突でエネルギーを失い約 1.5 億光年(宇宙サイズの約 1%) 以遠の情報をもたらしません。超高エネルギー γ 線の情報はさらに近距離の情報のみです。超高エネルギーニュートリノのみが宇宙全体の超高エネルギー状態の情報をもたらしてくれますが、未だに検出されていません。それは飛来頻度が $1/(\text{km}^2 \cdot \text{day})$ と低く巨大質量の検出媒質を必要とするためです。巨大検出媒質中で発生した超高エネルギーニュートリノ反応の情報を知るには検出媒質中での減衰長の長い電波検出媒質が必要となります。

岩塩充填導波管と新たに製作した岩塩充填同軸管に於いて図 1 のように電子ビームの加速電圧と電流の積、即ち電子ビームエネルギーの 2 乗に電波反射エネルギー「 Γ 」が比例して増加することを確かめることが出来ました。岩塩温度は電子ビームの加速電圧と電流の積に比例して増加することが測定されました。岩塩の誘電率は温度に比例して増加することが知られています。フレネル反射の公式から反射エネルギーは微小誘電率変化量の 2 乗に比例して増加しますので、電波反射効果は電子ビーム照射による岩塩の温度上昇に伴う誘電率の変化による誘電率境界からの反射が原因であると結論しました。



スペクトロアナライザによる測定では岩塩充填導波管に対して岩塩充填同軸管の電波反射効率 Γ は100倍改善し、約 10^{19} eVの電子ビームエネルギー照射を検出可能となりました。最終的な結論を得る為にはさらに詳細が解析を必要としますが、リアルタイムスペクトロアナライザによる1.28ミリ秒毎の短時間データのフーリエ解析周波数弁別法による雑音除去で電子ビームの走査による400Hzの照射の1パルスによる電波反射が測定されている可能性があり、その場合は約 10^{16} eVのエネルギー照射まで測定可能となります。

4. 結論・考察

KEK PF-AR リングからの放射光X線をXバンド導波管にあけたX線導入小孔を通して内部の小さな岩塩標的($2 \times 2 \times 10 \text{mm}^3$)へ照射したときに9.4GHzマイクロ波の反射が測定されました。岩塩充填同軸管による測定ではこの時と同じく約 10^{19} eVの電子ビームエネルギー照射を高感度検出可能となりました。電子ビームの照射エネルギーの2乗に電波反射エネルギーが比例することから、レーダー法は高いエネルギーでの測定に適した方法であることが確かめられました。さらに岩塩充填同軸管の岩塩を氷へ置き換えて、外部から冷却するシステムを構築して次の実験に臨みます。以上の実験結果は以下の引用文献に記されています。

5. 引用(参照)文献等

Masami Chiba, Toshio Kamiyo, Fumiaki Yabuki, Osamu Yasuda, Hidetoshi Akiyama, Yuichi Chikashige, Hiromi Kataoka, Tadashi Kon, Yutaka Shimizu, Yasuyuki Taniuchi, Michiaki Utsumi, and Masatoshi Fujii, Radar for Detection of Ultra-High-Energy Neutrinos Reacting in a Rock Salt Dome, *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research*, **AXXX**(2010)XXX-XXX, doi:1016/j.2010.11.165.)S233-S235.

2010年12月24日オンライン出版されました。紙ベースは近々出版されます。