

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⁾ 谷川 孝浩¹⁾ 矢野 浩之¹⁾ 矢吹 文昭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

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岩塩鉱山以外に南極氷床を検出媒質としての利用可能性を調べるために、1号加速器の2MeVの電子ビームを435MHz岩塩および氷充填同軸管の開放端に照射すると共に電波信号を導入し電波反射を測定しました。その結果、電波反射効果が岩塩のみではなく氷からも得られました。さらに電波反射の原因を解明するために反射波の位相変化を測定しました。その結果、電波反射効果は電波伝搬路中での温度上昇による位相の変化に起因することが明らかになりました。

キーワード：超高エネルギーニュートリノ, レーダー, 岩塩, 氷, 誘電率, 反射電波位相

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。本研究は超高エネルギーニュートリノ (10^{16} eV \sim 10^{20} eV) の検出器の開発研究を目的としています。これは飛来頻度が $1/(\text{km}^2 \cdot \text{day})$ と低い為、年間10事象を検出するには巨大質量 (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KEKのAR放射光X線を利用した研究で導波管中の岩塩標的へ放射光X線とマイクロ波の照射から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電子ビーム照射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に於いてこの電波反射効果が再現されました。

我々が推定している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あることが推測されます。岩塩鉱山以外に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以上と推定されていて電波反射効果が測定されれば検出媒質として利用可能です。本研究では氷に於いても電波反射効果があるかどうかを明らかにし、電波反射機構解明の為に反射電波の位相の測定を行います。

2. 方法

電波反射効果を電波減衰長が1kmにもおよぶ媒質中でニュートリノ反応シャワーからの反射をレーダー法として利用可能ならば安価な氷床面設置のアンテナで済むこととなります。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紡錘形の電子、ガンマ線、 π 、K粒子等からなるシャワーが発生します。水中ではシャワーの長さは約10mで最大直径は約20cmとなります。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。そして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。

ドライアイス冷却式の直径2cmの岩塩あるいは氷充填同軸管を製作しました。岩塩のみではなく氷充填においても電波反射率を測定しました。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2MeV, 1mAの電子ビームを1分間、同軸管の開放端面へ照射しました。電子ビームは幅約10cm、200Hzで長さ約1.2mの広い面積にスキャンされます。その内の一部約4J/sが同軸管の直径2cmの開放端面へ照射されました。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。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を用いました。高周波ブリッジ回路はNI LabViewを利用した自動制御システムとして新たに構築しました。電子ビームを照射しないときは高周波ブリッジ回路出力がゼロとなるように回路中の可変位相器と可変減衰器を自動制御しました。電子ビームを照射開始した時にゼロ自動制御を停止したときは高周波ブリッジ回路出力からの信号をリアルタイムスペクトロアナライザで取得しました。その128ミリ秒毎に得られる1024点の時系列データからFFTを行いました。実験場所での50Hzのノイズを除去した後に電波反射エネルギーを得ま

した。一方ゼロ自動制御を継続した場合は可変位相器の位相値を逐次記録し、反射電波位相を得ました。で氷温度の4熱電対電圧は同じNI LabViewシステムで記録しました。

3. 結果及び考察

氷充填同軸管に於いて図1のように電子ビームを照射すると1分で電力反射率が 5×10^{-7} まで上昇しました。同時に電子ビーム照射により氷の温度が上昇し、反射電波位相は -0.08° まで減少しました。氷の温度上昇に伴い氷の誘電率が上昇します。それに応じて電波信号の伝搬時間が増加して反射電波の位相が減少しました。

誘電体からの電波反射効果は温度上昇に伴う誘電率の変化が原因であると結論しました。この結果から電波反射効果は温度変化に伴って誘電率が変化するあらゆる誘電体に於いて起きることが示されました。この効果は超高エネルギーニュートリノ検出のみではなく他の放射線検出にも有効です。さらに誘電率が位置的、時間的に変化するあらゆる現象への応用が考えられます。

超高エネルギーニュートリノが作るシャワーの体積は本研究同軸管の場合の1万倍近くあり、温度は1万分の一の低い上昇となるが、予備的実験結果は電力電波反射率は温度を体積で積分した全エネルギーの2乗に比例することを示唆しています。従って本研究と同程度の反射率が期待されます。レーダー検出距離3kmを得る為にはピークパワー1GW (Equivalent Isotropic Radiation Power)が必要となりますが多数のアンテナを配列したフェーズドアレーアンテナによって得ることが可能です。大気観測用の京都大学生存圏研究所のMUレーダーや国立極地研究所の南極昭和基地に設置されたPANSYのようなアレーアンテナが例です。大気観測とは逆に南極氷床を利用する場合は氷床へ下向きに電波が放射されるように設置します。ドーム富士基地などは電波減衰長が長く氷床が厚いので設置場所の有力な候補です。

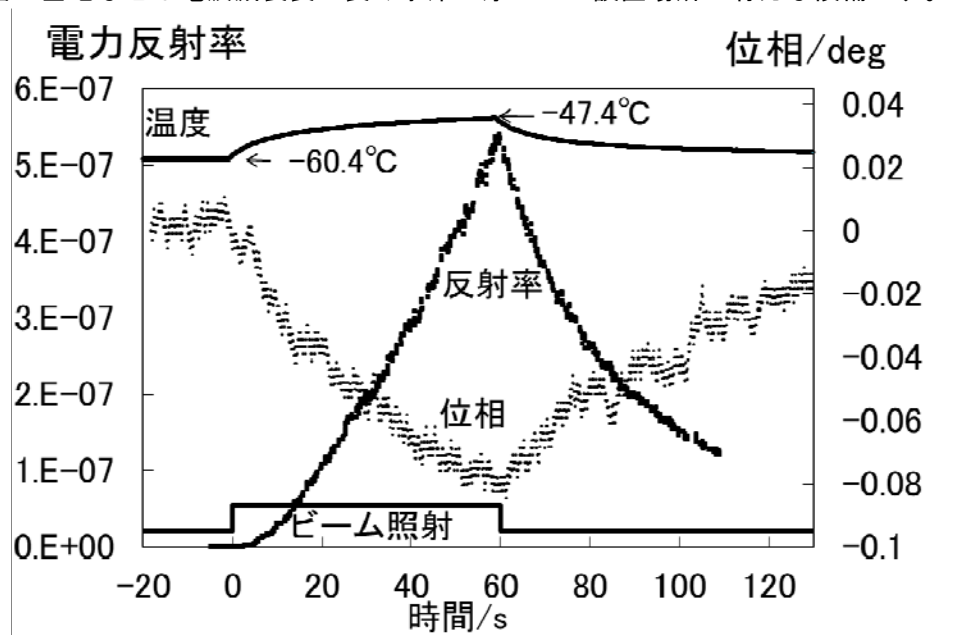


図1 電子ビーム照射による氷からの電波電力反射率と位相変化

4. 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, A662 (2012)S222-S225, doi:10.1016/j.nima.2010.11.165