

# 岩塩ニュートリノ検出器(Salt Neutrino Detector)

はじめに

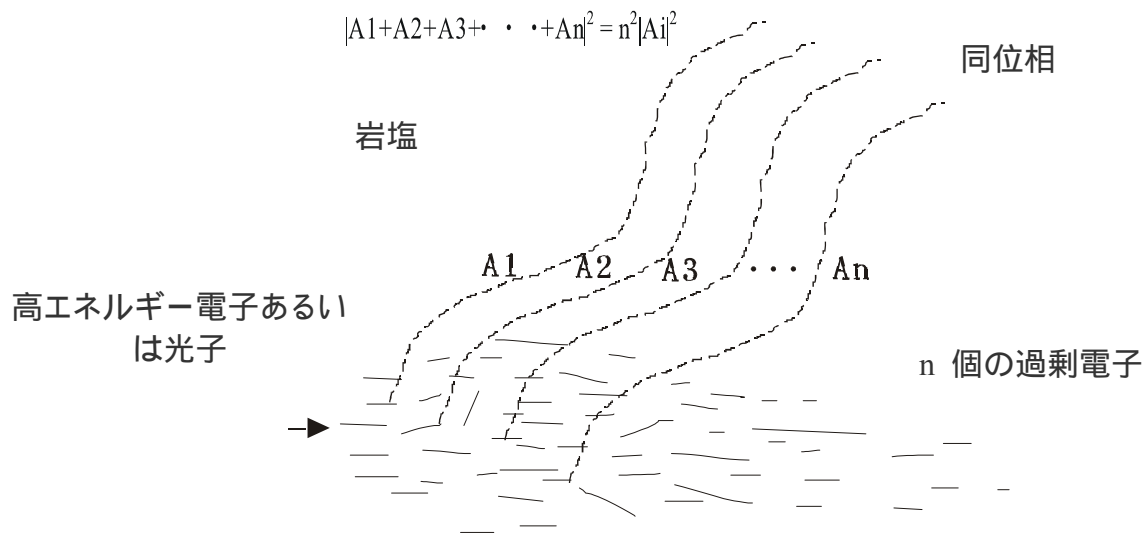
岩塩ニュートリノ検出器は巨大天然岩塩を検出媒質として宇宙由来の超高エネルギーニュートリノ(UHE)を検出することを目的としている。UHE と物質との相互作用断面積測定は加速器では得られない超高エネルギー領域での素粒子標準モデルの検証に適している。地球内部の通過物質量の増加にともなう UHE 数の減少を天頂角分布測定から標準モデルと比較することが出来る。[1]

UHE は活動銀河核(AGN)、ガンマ線バースト(GB)、トポロジカル欠陥(TD)等[2]から発生すると理論的に予測されています。宇宙線は最高エネルギー $10^{19}$ eV以上が飛来している。[3]このUHE宇宙線(陽子)が宇宙空間を充たす2.7Kの宇宙マイクロ波背景輻射(CMB)と衝突し、3-3共鳴を生成する。それが中間子に崩壊し、中間子が更に崩壊し、UHE を生成する。この過程はGZK効果[4]と呼ばれ、生成したUHE はGZK と呼ばれる。3-3共鳴の生成閾値エネルギーを越えるUHE陽子とCMBが存在することは明らかになっているので、GZK が存在する可能性は高い。しかし予想されるGZK の強度は大変低く $1(\text{km}^{-2} \text{ day}^{-1})$ 、検出する為には巨大検出器を必要とする。巨大検出媒質を人工的に純化することは困難で、自然に存在するままで利用出来る検出媒質と検出方法が重要となる。巨大媒質での反応を捕らえるセンサーを疎に配置するにはニュートリノ反応位置からセンサーまでの伝播波の減衰長が長いものを利用しなければならない。

宇宙空間はCMBで充たされている。UHE陽子の伝播距離はGZK過程でエネルギーを失うので2千万光年程度と短くなる。UHE光子もCMB等との衝突でエネルギーを失い1億光年程度の伝播距離となる。一方、UHE はCMBとの衝突断面積が小さいので宇宙の果て(130億光年程度)の遠方(宇宙初期)までのUHE状態の情報を直接与えてくれる。

## 1) 測定器の概要と動作原理

岩塩を干渉チェレンコフ効果により超高エネルギーニュートリノ検出器の検出媒質として使用することは、1961年にモスクワのLebedev研究所のアルメニア人、Askar'yan[5]によって提案された。そこでは固体媒質として電波に対する透明度が良い岩塩、月面土壌、氷などが列挙された。それとは独立に大気を媒質とした干渉チェレンコフ効果は藤井、西村[6]によって計算された。



チェレンコフ放射は通常、光電子増倍管等の光センサーが存在することと、可視光に対して透明度の良い媒質が多いことから可視光領域での光を検出する検出器として広く利用されている。チェレンコフ放射の放射エネルギーは周波数に比例し  $dP/d\Omega \propto \omega^2$ 、可視光では電磁シャワー中の電子、陽電子の飛跡長に比例する。対発生した電子、陽電子は多重散乱、制動放射過程により、可視光波長よりも離れてしまうので独立にチェレンコフ放射する。即ち可視光放射エネルギーは電磁シャワーエネルギーに比例する。1GHzの電波領域では真空中の波長は300mmとなり、強度は可視光の百万分の一となる。電波受信機では光子1個は検出出来ない。電磁シャワーの荷電粒子間距離が電波波長よりも十分短ければ、位相が揃い干渉増幅作用が起こり、電磁シャワーエネルギーの2乗に比例する放射強度が得られる。

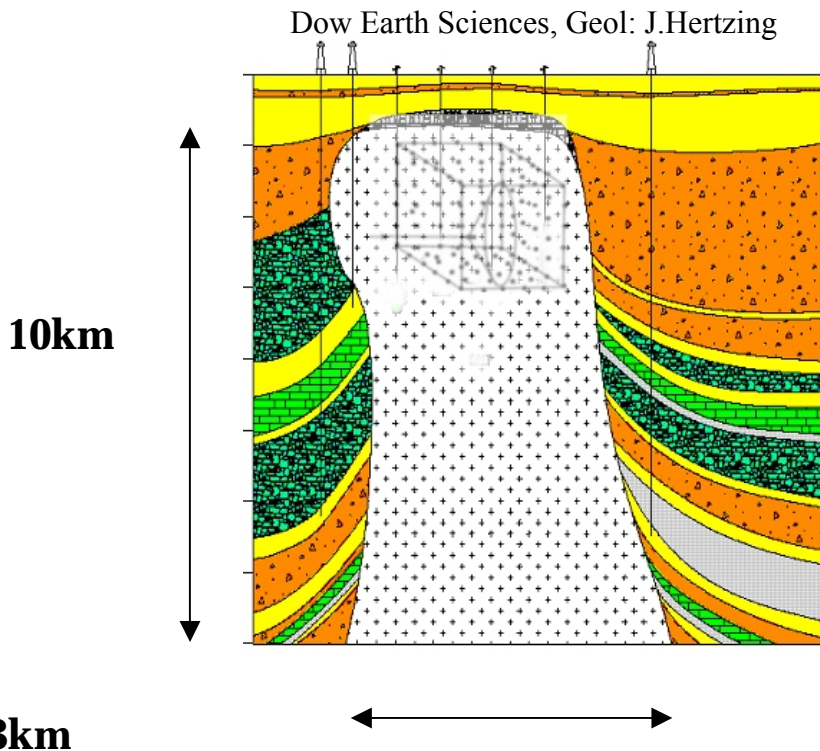
しかし対発生した電子、陽電子の距離が電波波長よりも十分短い場合は、両者の電荷は打ち消しあい、電波発生には寄与しない。電波発生に寄与するのは主に電磁シャワー中の線が物質中の電子とコンプトン効果を起こした時の反跳電子です。対生成された陽電子が電子と対消滅し、相方の電子が独立する場合の寄与も少しある。全て合計して電子シャワーで発生した電子、陽電子数の20%程が独立した過剰電子となる。その結果、超高エネルギーで検出可能な程の強度の電波放射が得られる。[7]

放射強度は1TeV電磁シャワーの近くにアンテナを設置し、300Kの等価雑音温度の受信機を使用した時に検出出来る程度となる。伝播媒質における減衰がない時は $10^{15}$ eV(PeV)の電磁シャワーは1km離れた位置で測定可能となる。家庭で使用するBS受信用パラボラアンテナと組になったコンバーターは100K程度の等価雑音温度です。岩塩は300K程度の温度ですので、300Kの黒体輻射が雑音源となる。

干渉チェレンコフ効果はSLACの線形電子加速器からの短バンチ高エネルギー光子ビームを月面土壌を模したシリカパウダーターゲットに照射して検証された。[8]入射エネルギーとして超高エネルギー(PeV)は単粒子では得られないので、1つの短バンチ中に含まれる全光子によって発生する全電磁シャワーエネルギーからの干渉チェレンコフ効果を測定した。

超高エネルギー宇宙ニュートリノ(GZKニュートリノ)は大変低い頻度でしか地球に到達しないと、予想されるので巨大な質量の媒質を必要とする。ニュートリノエネルギーの2乗に比例する強度の電波放射が得られることから、電波の減衰長の長い媒質を利用すればアンテナを疎に配置することが可能になる。従って、干渉チェレンコフ放射を利用した検出器は超高エネルギーの巨大媒質検出器に適している。この検出器はUHEのエネルギー、角度、時間の情報を得ることが出来、2つの分離したシャワーの存在からニュートリノの選別が可能となります。[9]

岩塩は2億5千万年程前のジュラ紀にパンゲア大陸内の閉鎖された海水が蒸発して地中に埋没して生成されたとされる。その後、岩塩の密度は $2.2\text{g/cm}^3$ と他の岩石密度 $2.7\text{g/cm}^3$ より低いので、浮力に



より地下10-20kmに堆積した岩塩層から上部岩石の弱い筋に沿って地下200m程まで上昇する。生成した直径3km程度の円筒状の形状は岩塩ドームと呼ばれる。生成当時は日本は海中にあり岩塩が生成される環境になかったため、日本には存在しない。ドイツ北部やメキシコ湾岸のテキサス州、ルイジアナ州には電波減衰長の長い岩塩ドームが豊富に存在する。深度の浅い岩塩堆積層よりも岩塩ドームの方が岩塩純度は高く電波減衰長は長いようだ。岩塩は気体や液体の透過性がなく、岩塩外部の地下水は外部の岩塩を溶かすのみで内部まで侵入することは出来ない。[10]可塑性が高いので割れ目は直ぐに閉じる。水は電波の吸収が大きいので、透水性がゼロであることが長い電波減衰長である為に重要です。液体の透過性がないことから岩塩ドーム周辺に石油を含む母岩が分布しているときは石油が浮力により、岩塩ドーム形成時の地層の傾斜に沿って移動して岩塩ドーム傍に溜まり、その採掘の為に石油井戸が掘られる。岩塩ドーム内部は放射性廃棄物、石油、天然ガスの貯蔵、あるいは圧縮空気貯蔵による昼間発

電などに利用されている。岩塩ドームの上部は通常の土壌で覆われていて、地上の電波の進入が防がれているので、内部は電波にとっては完全なシールド箱となっている。高エネルギーミュー粒子は地中に侵入するが、電波波長よりも十分短い距離の中に多数の荷電粒子が集中する反応を起こす可能性は低いと考えられる。

岩塩の電波減衰長の測定値を後のグラフに示す。1954年のHippelのデータ集積[11]では10MHzと25GHzにおいて人造岩塩の減衰長の下限值を与えているに過ぎない。直接測定はテキサス州ヒューストン近郊のHockley岩塩鉱で150MHz, 300MHz, 750MHzにおいて行われた。下図の桃色誤差棒付きのデータです。[12]岩塩ドーム中の掘削空洞中で電波を岩塩中に数十mの距離を通過させた後の減衰量から測定された。それ以外のデータは全て我々の測定で1GHzと9.4GHzの空洞共振器[を使い]振動空洞共振器法[13]で複素誘電率を測定した。更に誘電体共振器法の測定データも加えてある。空洞共振器においては微小試料を入れると共鳴周波数が減少する。この減少から誘電率の実部 $\epsilon'$ を得る。そして共鳴幅が広がることから誘電率の虚部 $\epsilon''$ を得る。試料表面が清浄かつ滑らかで、湿度が50%以下であれば再現性のあるデータが得られる。測定精度は試料の表面処理の不定性を考慮すると1GHzと9.4GHzの空洞共振器においてそれぞれ約40%と20%以下です。減衰長 $L$ は電波の波長に比例し、 $\tan \delta$ に反比例する。吸収長は電場強度が $1/e$ に減衰する距離です。 $\tan \delta$ は誘電率の虚部と実部の比となっている。電波の減衰長が長いほど、媒質中での吸収を示す指標となる $\tan \delta$ は小さい。空洞の写真は以下のとおりです。

$$L_{\alpha} = \frac{1}{\alpha} = \frac{\lambda}{\pi \sqrt{\epsilon'} \tan \delta} \quad \epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' = \epsilon'(1 - j \tan \delta) \quad \tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'}$$

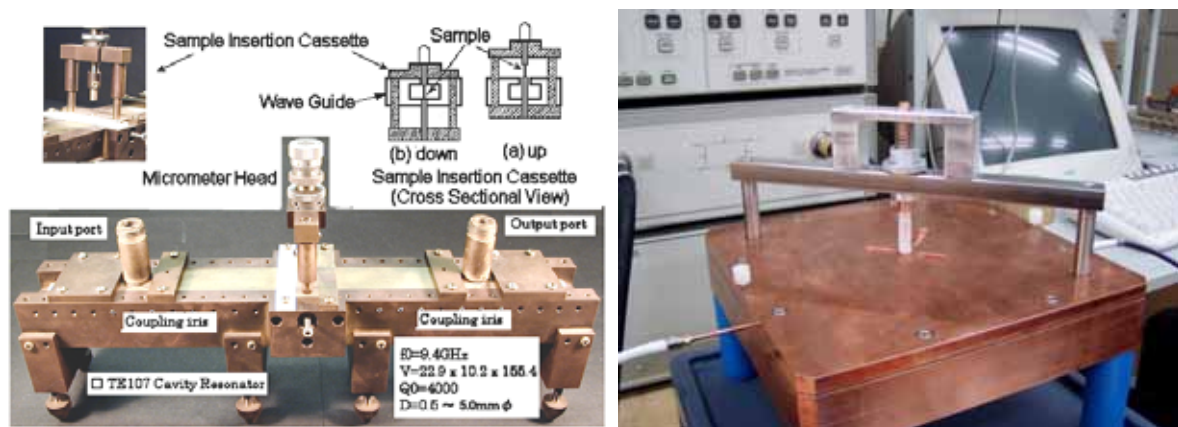
9.4GHz 空洞の基本モードはTE107でsize:23m × 10 × 155mm<sup>3</sup>、下左図

1GHz 空洞の基本モードはTM010でsize:225mm × 30mm<sup>3</sup>、下右図

挿入する前の岩塩試料が空洞中心部の上に見える。

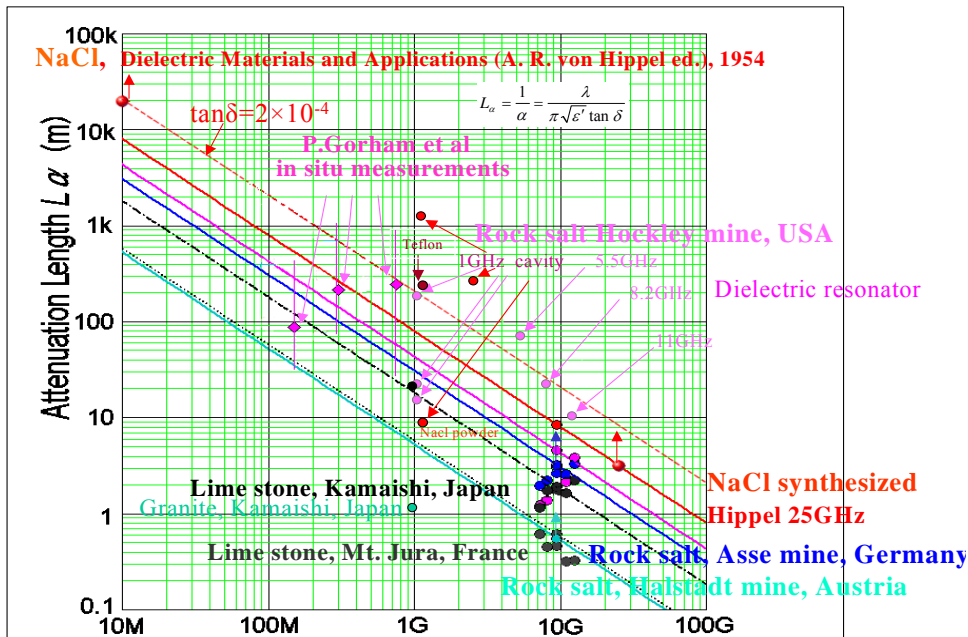
いずれの空洞も試料挿入後に挿入孔は銅棒によって塞がれて、高精度の測定が可能となる工夫がなされている。

基本モード以外の高次モードでも測定が可能です。



これらの空洞共振器を利用して測定した結果が次のグラフです。

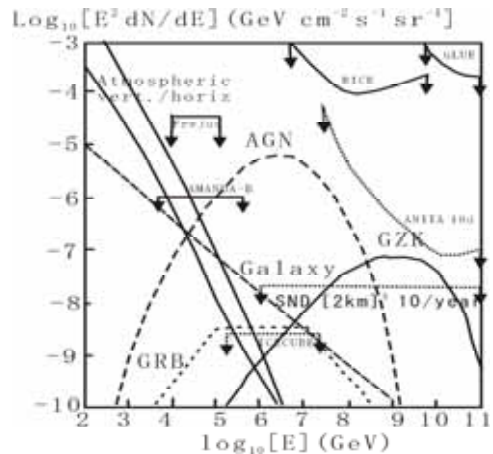
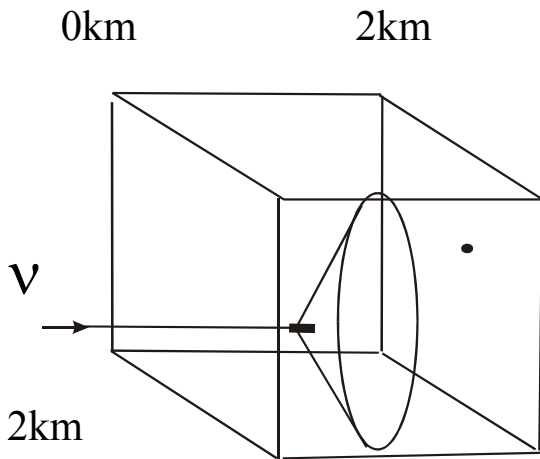
横軸が周波数で立て軸がその周波数における減衰長です。ある試料の  $\tan \delta$  が周波数に依存しないと仮定すると右下がり 4 5 度の直線上に乗ります。赤色の点が人工岩塩のデータです。



人造岩塩試料では 1、2.4、10GHz で測定しました。減衰長は 1GHz で 1km となりました。我々の測定値も Hockley 試料は桃色で表示されています。1GHz の測定で 180m の減衰長が得られています。tan が周波数に依存しないとすると 200MHz において減衰長が 0.9km を越えると予測されます。その値は岩塩ニュートリノ検出器が必要とする減衰長に近い値となります。現地での測定[11]は誤差が大きいものですが、我々の実験室の測定と矛盾していません。他にドイツの Asse 岩塩鉱、オーストリアの Halstadt 岩塩鉱、岩手県日鉄鉱業釜石鉱山の石灰岩、花崗岩、フランスの Jura 山の石灰岩のデータが載っています。これらの測定結果は良質の天然岩塩は石灰岩の約 10 倍の減衰長、花崗岩の約 100 倍の減衰長であることを示しています。

減衰長 1km 程度が得られれば次の図のようにアンテナを 400m おきに配置することも可能となります。[14]この検出器はイメージングカロリメータとして働きます。

アンテナの特性は無指向性（到来方向が判別できれば更に良い）、広周波数帯域、高実効断面積、無偏向性（直線偏向の情報が得られればさらに良い）が好ましい。直径 10cm 程度のボアホールヘインストール出来るものを検討中です。



## まとめ

我々は Hippel のデータ集積や Hockley 岩塩鉱現地での測定に比べて 10 倍以上の精度で振動空洞共振器法によって岩塩の誘電率の複素部を測定した。それから算出した減衰長において下限値ではなく有限値を得た。Hockley 岩塩鉱試料では周波数 1GHz において 180m の値を得た。200MHz では減衰長は 0.9km に達することが予想される。さらに低い周波数での測定を計画している。このような岩塩ニュートリノ検出器が完成すると、1 年間に約 10 事象の GZK ニュートリノが検出可能となる。

### 2) 現在の性能と限界

弱電波信号受信の限界は約 300K 岩塩温度からの黒体輻射と同程度の強度となる。

### 3) 使用される実験などのついて

宇宙超高エネルギーニュートリノ検出を目的としている。ニュートリノ反応で発生する電磁シャワー近傍では 1TeV、伝播媒質に減衰がない場合は 1PeV 電磁シャワーから 1km 離れた場所で信号強度は 300K の電波領域の黒体輻射と同程度となる。CERN で建設中の LHC で発生する人工ニュートリノ [15] は電磁シャワー近傍にアンテナを設置すれば検出可能です。

### 4) 参考文献

- [1] R. Gandhi, C. Quigg, M.H. Reno and I. Sarcevic, "Ultra-high-energy neutrino interactions", *Astroparticle Phys.* **5**, pp.81-110, 1996; "Neutrino interactions at ultrahigh energies", *Phys. Rev.* **D58**, 093009; Sigl, G. *Phys. Rev.* **D57**, pp.3786-3789, 1998; J. Kwiecinski, A.D. Martin, A.M. Stasto, "Penetration of the Earth by ultrahigh energy neutrinos predicted by low  $x$  QCD", *Phys. Rev.* **D59**, 093002, 1999; R. Horvat, "Propagation of ultrahigh-energy neutrinos through the earth", *Phys. Lett.* **B480**, pp.135-139, 2000.
- [2] F. W. Stecker, C. Done, M. H. Salamon and P. Sommers, "High-Energy Neutrinos from Active Galactic Nuclei", *Phys. Rev. Lett.* **66**, pp.2697-2700, 1991.
- [3] Takeda et al., "Extension of the Cosmic-Ray Energy Spectrum beyond the Predicted Greisen-Zatsepin-Kuz'min Cutoff", *Phys. Rev. Lett.* **81**, pp.1163-1166, 1998.
- [4] K. Greisen, "End to the Cosmic-Ray Spectrum?" *Phys. Rev. Lett.* **16**, p.748, 1966; G.T. Zatsepin, V.A. Kuz'min, *Zh. Eksp. Teor. Fiz., Pis' ma Red.* **4**, p.114, 1966 [*Soviet Physics JETP Lett.* **4**, p.78, 1966].
- [5] G.A. Askar'yan, "Excess Negative Charge of an Electron-Photon Shower and its Coherent Radio Emission", *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* **41**, pp.616-618, 1961 [*Soviet Physics JETP* **14**, pp.441-442 (1962)]; G.A. Askar'yan, "Coherent Radio Emission from Cosmic Showers in Air and in Dense Media", *Soviet Physics JETP* **48**, pp.988-990, 1965 [**21**, pp.658 - 659, 1965].
- [6] M. Fujii and J. Nishimura, "Radio wave emission from extensive air showers", *Proc. 11th Int. Conf. On Cosmic Rays*, Budapest, pp.709-715, 1969.
- [7] F. Halzen, E. Zas, T. Stanev, "Radio detection of cosmic neutrinos. A numerical, real time analysis", *Phys. Lett.* **B257**, pp.432-436, 1991; E. Zas, F. Halzen, T. Stanev, "Electromagnetic pulses from high-energy showers: Implications for neutrino detection", *Phys. Rev.* **D45**, pp.362-376, 1992; J. Alvarez-Muniz and E. Zas, "Cherenkov radio pulses from EeV neutrino interactions: the LPM effect", *Phys. Lett.* **B411**, pp.218-224, 1997; G.M. Frichter, J.P. Ralston and D.W. McKay, "On radio detection of ultrahigh energy neutrinos in Antarctic ice", *Phys. Rev.* **D53**, pp.1684-1698, 1996.; M.A. Markov and IM Zheleznykh, "Large-Scale Cherenkov Detectors in Ocean, Atmosphere and Ice", *Nucl. Instrum. Methods.* **A248**, pp.242-251, 1986.
- [8] P. Gorham, D. Saltzberg, P. Schoessow, W. Gai, J. G. Power, R. Konecny and M.E. Conde, "Radio-frequency Measurements of Coherent Transition and Cherenkov Radiation: Implication for High-energy Neutrino Detection", *Phys. Rev.* **E62**, pp.8590-8605, 2000. ; D. Saltzberg, P. Gorham, D. Walz et al., "Observation of the Askaryan Effect: Coherent Microwave Cherenkov Emission from Charge Asymmetry in High-Energy Particle Cascades", *Phys. Rev. Lett.* **86**, p.2802, 2001.
- [9] J.G. Learned and S. Pakvasa, *Astropart. Phys.* **3**, p.267, 1995; F. Halzen and D. Saltzberg, "Tau Neutrino Appearance with a 1000 Megaparsec Baseline", *Phys. Rev.Lett.* **81**, pp.4305-4308, 1998 ; H. Athar, M. Jezabek and O. Yasuda, "Effects of neutrino mixing on high-energy cosmic neutrino flux", *Phys. Rev.* **D62**, pp.103007-1, 103007-8, 2000; H. Athar, "Tau neutrinos from active galactic nuclei", *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* **76**, p.419, 1999; H. Athar, G. Parente and E. Zas, "Prospects for observations of high-energy cosmic tau neutrinos", *Phys. Rev.* **D62**, 093010-1, 093010-5, 2000.
- [10] T. Machida et al (ed.), "Topography dictionary" (in Japanese), Ninomiya Book Co. Ltd., Tokyo, p.110, 1981; J. L. Stanley, "Handbook of World Salt Resources", Plenum Press, New York, 1969; T. H. Michel, "Salt Domes", Gulf Publishing Company, Houston, 1979.

- [11]A.R.von Hippel ed., Dielectric Materials and Applications, Page302, 361, John Wiley&Sons, INC, 1954; Landolt-Boernstein, Zahlenwerte und Function aus Physik, Chemie, Astronomie, Giophysik und Technik, Eigenschaften der Materie in Ihre Aggregatzustaenden, 6.Teil, Elektrische Eigenschaften I, Herausgegeben von K.H.Hellwege und A.M. Hellwege, Page456, 505, , Springer-Verlag, 1959; R.G.Breckenbridge, "Low Frequency dispersion in ionic crystals", Journ. Chemj.Phys. **16**(10)959(1948).
- [12]P. Gorham, D. Saltzberg, A. Odian, D. Williams, D. Besson, G.Fichter and S. Tantawi, "Measurements of the Suitability of Large Rock Formations for Radio Detection of high Energy Neutrinos", Nucl. Instru.Methods. **A490**(2002)476-491.
- [13] H. A. Bethe and J. Schwinger, NDRC Report No. D1-117, Cornell University (1943); R.L.Sproull and E.G.Linder, Proc. Of I.R.E., **34**, pp.305-312 (1946); I.J.C. Slater, "Microwave electronics", Review of Modern Physics, **18**, pp.441-512 (1946); G.Birnbaum and J. Franeau, J.Appl. Phys.,**20**, pp.817-818 (1949); N.Ogasawara, J. Inst. Elect Eng., Japan, **74**, 1486 (1954).
- [14] M. Chiba, T. Kamijo, M. Kawaki, H. Athar, M. Inuzuka, M. Ikeda, O. Yasuda, "Study of Salt Neutrino Detector", Proc. 1st Int. Workshop for Radio Detection of High Energy Particles [RADHEP-2000], UCLA, AIP Conf. Proc. **579**, pp.204-221 (2000) ; T. Kamijo and M. Chiba, "A Microwave Properties of Rock Salt and Lime stone for an Ultra-High Energy Neutrino Detector", Memoirs of Faculty of Tech., Tokyo Metropolitan University, No.51 2001, pp.139-156 (2002); M. Chiba et. al., "Measurement of Attenuation Length in Rock Salt and Lime stone in Radio Wave for Ultra-High Energy Neutrino Detector", Proc. of the First NCTS Workshop Astroparticle Physics, Taiwan, World Scientific Publishing Co. Ltd. pp.90-104 (2002); Toshio Kamijo and Masami Chiba, "Microwave Properties of Rock Salt and Lime Stone for Detection of Ultra-High Energy Neutrinos", in Proc. of SPIE 4858 Particle Astrophysics Instrumentation, edited by Peter W. Gorham, (SPIE, Bellingham, WA) pp.151-162 (2003).
- [15]L. Camilleri, "Neutrino Physics at LHC", Large Hadron Collider Workshop, held at Aachen, 4-9 October 1990, Proceedings Vol. III (G. Jalskog and D. Rein Ed.), CERN 90-10 ECFA 90-133, Volume **III 3**, December pp.810-819, 1990.

5) 使用している機器や材料の購入先及び製作している会社名と担当者名など、他の方が製作する時に役立つ情報

岩塩の複素誘電率を測定する摂動空洞共振器の製作会社：

〒170-0005 東京都豊島区南大塚3 - 4 0 - 2、キーコム株式会社

担当者名：代表取締役 開発・技術部部长 鈴木洋介 TEL03-5950-3110 FAX03-5950-3380

E-mail: [info@keycom.co.jp](mailto:info@keycom.co.jp)、<http://www.keycom.co.jp>

人造岩塩の製作会社：

〒355-0071 埼玉県東松山市大字信号8 8 番 7 7

応用光研工業株式会社

担当者名：結晶光学部 営業課 永崎賢一 TEL0493-23-4651 FAX0493-23-9516

E-mail: [nagasaki@oken.co.jp](mailto:nagasaki@oken.co.jp)

<http://www.oken.co.jp>

6) 執筆担当者の連絡先

〒192-0397 東京都八王子市南大沢1 - 1

東京都立大学大学院理学研究科物理学専攻

千葉雅美

0426-77-1111 内線 3326 FAX0426-77-2483

E-mail: [chiba-masami@c.metro-u.ac.jp](mailto:chiba-masami@c.metro-u.ac.jp)