

研究種目： 基礎研究（C）  
 研究期間： 2007 ～ 2009  
 課題番号： 19540323  
 研究課題名（和文） 高エネルギー宇宙ニュートリノ・電子の新しい観測・解析の為に N-K 関数の適用と改良  
 研究課題名（英文） Applications and the improvements of the N-K function for the analyses and observations of the high-energy cosmic neutrino and primary electrons  
 研究代表者 西村 純（Nishimura Jun）  
 独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部・名誉教授  
 研究者番号： 40013619

研究成果の概要（和文）： 宇宙から入射する高エネルギーニュートリノを高精度で観測する為に、バイカル湖の水中や南極の氷の中で $\nu$ が発生する電子や $\mu$ 中間子からのチェレンコフ光の空間分布を三次元シャワー理論(N-K 関数)と散乱理論を用いて解析的に求めた。

暗黒物質起源の宇宙線中の高エネルギー電子観測の可能性に関連して、我々のエマルションチャンバーによるスペクトル観測で加速器ビームを用いてエネルギーの測定精度が約 10%である事を確かめ、大気中伝搬によるバックグラウンド電子とスペクトル変形について評価を行った。

研究成果の概要（英文）： We make analytic approaches to evaluate the lateral distributions of the Cherenkov Photons by muons or electron showers produced in the water or ice to observe the high-energy neutrino in the Baikal and IceCube Projects.

For the precise observation of the cosmic-ray electron spectrum with our emulsion chambers, we confirm that the error of our energy determination is within 10% with the accelerator electron beam of 200GeV at CERN. The change of the spectral shape of electrons is evaluated during passing through the atmosphere over the balloons for an additional possible spectrum from the dark matter origin. We also estimate the precise amounts of background electrons produced in the atmosphere over the balloons.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2008 年度	800,000	240,000	1,040,000
2009 年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：宇宙線・宇宙科学・応用数学

1. 研究開始当初の背景

(1) 申請を行った 2007 年当時は南極の氷床を使って天体ニュートリノを検出する IceCube の観測が本格化した時期に当たっている。氷床中および水中でのニュートリノから発生する  $\mu$  中間子や電子によるチェレンコフ光の空間分布は観測結果の詳細な解析に必要である。この空間分布は従来モンテカルロ法で求められていたが、氷床の性質は場所によって変わるため、状況に応じて膨大な計算を必要としていた。見通しのよい解析解を得ることが望まれ、IceCube の責任者の Halzen 博士及び Gaisser 博士からの勧めもあり、N-K 関数を用いて研究を進める事とした。

(2) 研究代表者が提唱した地上からのガンマ線望遠鏡 (HESS など) で高エネルギー電子のスペクトルを観測する方法については検討進めていたが、研究の初期の段階で欧州で実際の観測が成功し、加えて次に述べる項目 (3) の問題が重要になってきたため、項目 (3) に研究を集中することとした。

(3) 研究代表者等が行っている高エネルギー一次電子のスペクトルの観測については数百 GeV 付近で暗黒物質起源と思われる一次電子が観測されたという報告があり、エマルジョンチャンバーによる観測でエネルギー測定、大気伝搬中のスペクトルの変形、気球観測の際のバックグラウンドとしての大気電子のより精密な評価を行う事とした。

2. 研究の目的

(1) 水中または氷床中で高エネルギー  $\mu$  中間子及び電子シャワーからのチェレンコフ光の空間分布の解析解を求める事により、 $\mu$  中間子及び電子のエネルギー測定の精度を上げ、親のニュートリノの発生についてより明確な知見を得る事が可能となる。IceCube, Baikal 等の実験で精度の高い解析に寄与するのが目的である。

(2) 一次電子のスペクトルの研究の重要性は研究代表者等がかねてより主張してきた。最近では観測精度を上げる事により宇宙線源や暗黒物質起源について知見を得る可能性があるとして、世界各国で大いに研究が進められている。

(3) 研究 (1), (2) に関連して N-K 関数の改良と複素積分の評価を鞍点法によらず複素平面で積分する事を Mathematica を用いて行う事を検討した。この結果、複素積分の数値評価を精度高く行うことが可能となった。

3. 研究の方法

(1)  $\mu$  中間子および電子シャワーからのチェレンコフ光の空間分布はシャワーの拡がりについては N-K 関数を取り、チェレンコフ光の広がりをハンケル変換で組み合わせて求める。IceCub では氷床中での光の散乱が大きく、散乱の影響は diffusion 近似で取り扱う。色々な吸収係数や散乱係数をパラメータとする解析解を関数論を用いて求めたが、数値的にはモンテカルロの結果とほぼ一致した。解析解は様々なエネルギーを持つ  $\mu$  中間子や電子に対して、また色々な吸収や散乱の係数に対応する空間分布の数値を短時間で求める事が出来、物理的な見通しがよい。

(2) 高エネルギー一次電子のスペクトル

一次電子に暗黒物質起源のものが加わると、単純なべき型のスペクトルでなく、べき型スペクトルに “こぶ (hump)” が加わった形を持つ可能性がでてくる。Hump が存在した場合、より高い精度の観測でこの形の検出を可能にするため、次の研究を行った。

① 大気伝搬中のスペクトルの変形は電子シャワー理論で補正が行なうが、hump は伝搬中になめらかになり、形が失われる可能性がある。検出の可能性について電子シャワー理論と、前出 2-(3) の複素関数の評価法で行った。

② energy の測定精度については CERN の 200GeV のビームをエマルジョンチャンバーに照射して確かめた。

③ 大気電子は大気中で同時に測定したガンマ線フラックスと電子シャワー理論を用い、 $\pi^0$  中間子から Dalitz pair で直接電子対に崩壊する寄与が無視できないことを示した。

#### 4. 研究成果

##### (1) 氷床中及び水中でのチェレンコフ光の空間分布の解析解

高エネルギーニュートリノは南極の氷床中または水中で $\mu$ 中間子、電子を発生する。これらの粒子が発生するチェレンコフ光を観測してニュートリノを調べる計画が南極 (IceCube) やバイカル湖等で行われている。これまで、チェレンコフ光の空間分布はモンテカルロ法で求められて来たため、氷床や水中の吸収や散乱の係数がどの様に空間分布に影響するか、物理的に定量的に理解する事が難しかった。

吸収と散乱の mfp,  $\tau c$ ,  $\eta$  の代表的な値を表. 1 に示した。特徴的なことは氷床中は吸収が散乱に比べて極めて少なく、このため、氷床中では散乱の影響を受けやすくなる事が考えられる。

表. 1 . 吸収及び散乱の mfp (500 nm 付近)

	吸収 mfp: $\tau c$	散乱 mfp: $\eta$
IceCube	~110m	20-30m
Baikal	~20m	~15m

散乱は Mie 散乱で前方散乱が多いので、発生したチェレンコフ光の空間分布に影響を及ぼすのは、散乱された光の一部に限られる。

##### ① $\mu$ 中間子の場合。

1TeV を越える  $\mu$  中間子は制動輻射や対生成などによりエネルギー E にほぼ比例する損失を行う。失われたエネルギーは電子シャワーを起し、一個の  $\mu$ -中間子は平均として

$$(1.5 E/\text{TeV}-1) \text{ 個の電子}$$

を伴って、透過していることになる。

従って、一個の  $\mu$ -中間子が水中または氷床中 1m を通過する際に発生する波長 300-600nm のチェレンコフ光子の平均の数は

$$N(E) = 3.2 \times 10^4 \times (1.5 E/\text{TeV}) \text{ photon/m} \quad (1)$$

である。

##### ●散乱の影響が少ない時 ( $\eta \leq \tau c$ )

簡単な考察から、光子の総数を 1 に規格化した空間分布は

$$(a\eta c/2\pi) \text{Exp}[-ar]/r \cdot 2\pi r dr \quad (2)$$

$$a = (1/\tau c) / \sin \alpha$$

となる、ここで  $\alpha$  はチェレンコフ光の放出角度で水中及び氷床で約  $41^\circ$  である

##### ●散乱の影響が多きい場合 ( $\eta < \tau c$ )

この場合は散乱に影響を多く受けた散乱部部分と散乱の影響をあまり受けずに入射する直接光子分布に分けることができる。

##### ◎ 直接光子分布 (Direct 成分)

前節の分布と同じ形

$$\text{Exp}[-ar]/r \cdot 2\pi r dr \quad (3)$$

となる。この場合は a の値としては散乱の効果を入れた

$$a = (1/\eta + 1/\tau c)$$

の値となる、ただし、Mie 散乱は極めて前方散乱が多く、前方に散乱された一部分は Direct 光子分布に影響を与えない。

Mie 散乱の場合定量的に考察すると

$\eta$  の値として、 $\eta_{\text{eff}} \sim (2-3)\eta$  とするのが妥当である事がわかった。

##### ◎ 散乱光子分布 (Diffuse 成分)

ここでは diffusion 近似で考察を行った。

拡散係数:  $D = \eta c/3$

拡散距離:  $(D\tau)^{1/2}$

であり、一方チェレンコフ光は角度  $\alpha$  で放出されるので、散乱成分と組みあわせた空間分布となる。結果だけ述べるとハンケル変換を行って、各々の空間分布を組み合わせることにより、最終的に解析解として

$$\frac{a}{2\pi D\tau} \int_0^\infty \frac{J_0\left(\xi \frac{r}{\sqrt{D\tau}}\right)}{(1+\xi^2) \sqrt{a^2+\xi^2}} \xi d\xi \quad (4)$$

$$a = \sqrt{D\tau} \left( \frac{1}{\eta} + \frac{1}{\tau c} \right) / \sin \alpha$$

が得られた。

解析的な積分はこれ以上に行う事は出来ない、数値積分で評価をおこなう。

(4)式の内容は

$1/(1+\xi^2)$  の部分は散乱による効果を表し、 $1/(a^2 + \xi^2)^{1/2}$  はチェレンコフ光の角度の効果を表している。

直接光子成分と、散乱光子成分の寄与を見るため、IceCube の場合のパラメータとして

散乱の mfp=20m, 吸収の mfp=110m

をとり各々の寄与を、図 1 に示した。

Diffuse 成分と Direct 成分の比はこの場合ほぼ 1/2 となっている。

--- : Diffuse 成分  
 - - - : Direct 成分  
 — : 光子の空間分布 = Direct + Diffuse

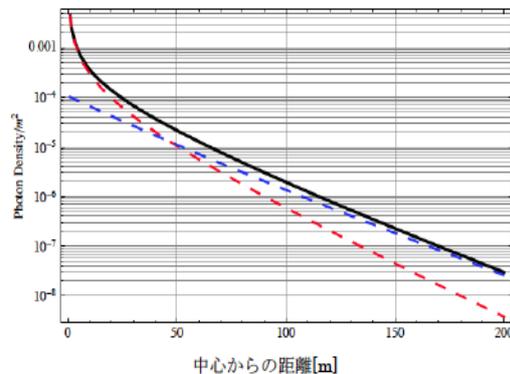


図. 1. 光子の空間分布。

Direct 成分と Diffuse 成分の寄与の割合を示した。(全光子数を 1 に規格化してある)

高エネルギーの  $\mu$  中間子からのチェレンコフ光の氷床中での光子の空間分布はすでにモンテカルロの計算が行われているので、ここで得た解析解の結果との比較を行う  $\mu$  中間子のエネルギー  $E$  が  $E = 10^{13} \text{eV}, 10^{15} \text{eV}, 10^{17} \text{eV}, 10^{19} \text{eV}, 10^{21} \text{eV}$  に対する計算結果の比較を図. 2 に示した。

中心からの距離 [m]

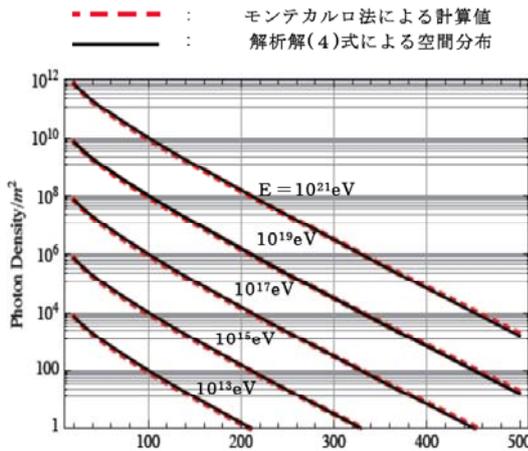


図 2 : モンテカルロ法による結果と、解析解の空間分布の比較。

図 2 にみられる様に、解析解の空間分布は、モンテカルロの結果と驚くほどよく一致している。この解析解により氷床における散乱及び吸収の空間分布に及ぼす影響を調べる上で、極めて明確な指針を与える事が出来るようになった。

◎以上  $\mu$  中間子によるチェレンコフ光の空間分布について得た結果をまとめると

★ 散乱では光子数は変わらず、全光子数は、吸収係数によってきまる。従って、複雑な氷床中に散乱の層があっても、全光子数を推定出来れば、吸収係数により発生した  $\mu$  中間子のエネルギーの推定が可能となる。

★ Mie 散乱は前方散乱が卓越しているので、散乱の内 Direct 成分への寄与する部分が可成り存在している。

★ 図 2 に示したように、解析解とモンテカルロの結果との一致はよい。さらに光子の空間分布について散乱係数、吸収係数との関係の物理的解釈が可能になると考えられる。

## ②電子の場合

電子の場合は、電子シャワーをおこすので、チェレンコフ光の発生源は比較的狭い。その層の厚さは水中 10m (約 28c. u.) 程度以下になり、 $\mu$  に比べて観測の頻度が著しく下がる。電子シャワーシャワーの角分布とチェレンコフ光角度との組み合わせより散乱の影響が少ない場合、ハンケル変換により求めた事ができる。解析解は

$$-\frac{N_0}{4\pi^2} \int_0^T dt \int \int ds dp \left(\frac{E_s}{\epsilon}\right)^2 \left(\frac{\epsilon^2}{K^2}\right) \left(\frac{\epsilon^2 R^2}{K^2}\right)^{-p-1} \Gamma(p+1) \Gamma(2p+s) * I^{2p} \frac{|r^2 - \theta_0^2 t^2|}{(r^2 + \theta_0^2 t^2)^2} F * M(s, p, t) \quad (5)$$

$$F = F\left(\frac{1}{2}, -\frac{p}{2}, -\frac{p}{2}, 1; \frac{4r^2 \theta_0^2 t^2}{(r^2 + \theta_0^2 t^2)^2}\right)$$

で与えられ、ここで、ここで、 $s$  および  $p$  の積分は複素平面で  $-i\infty$  から  $+i\infty$  まで行なう。F は超幾何関数、M はシャワー理論で角分布を議論する際に使われる関数、 $N_0$  は発生したチェレンコフ光子の総数である。シャワー軸では  $r=0$  となるので超幾何関数 F は 1 となり、(5) 式は比較的単純な形

$$-\frac{N_0}{4\pi^2} \int_0^T dt \int \int ds dp \left(\frac{E_s}{\epsilon}\right)^2 \left(\frac{\epsilon^2}{K^2}\right) \left(\frac{\epsilon^2 R^2}{K^2}\right)^{-p-1} \Gamma(p+1) \Gamma(2p+s) M(s, p, T-t)$$

となる。

電子のエネルギーが  $10^{13} \text{eV}$  で、深さ T が 100c. u. (37m), 200c. u. (74m), 400c. u. (148m) の時の光の空間分布を図. 3 に示しておいた。

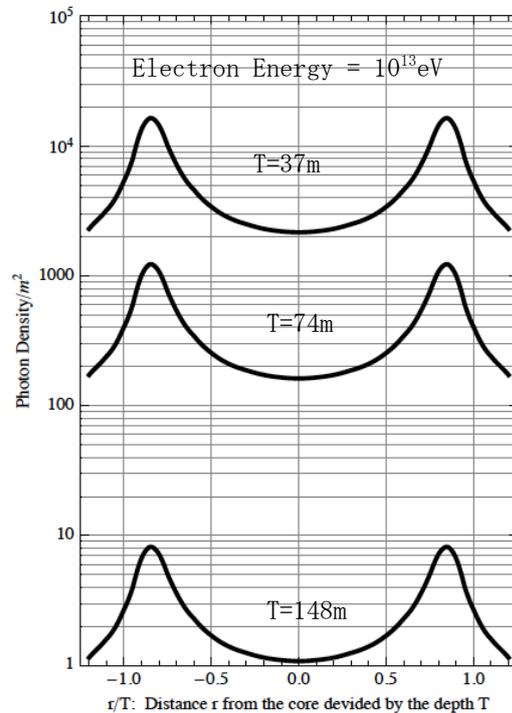


図. 3. 光子の空間分布

$10^{13} \text{eV}$  の電子で、吸収の mfp を 20m とした。空間分布に顕著な二山がみられるのは、チェレンコフ光の放出角度分布の影響である。

散乱の影響が多きい場合について上の(5)式から出発して得られた解は、多重超幾何関数を含むやや複雑な形をしており、実用上やや問題があるので、今後更に検討を続けたい。

(2) 高エネルギー電子スペクトルについて

① 暗黒物質による電子発生による一次電子スペクトルと大気透過中での変形

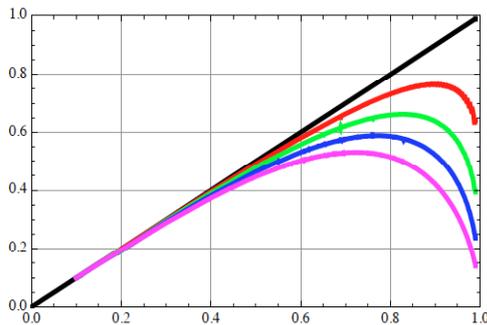
ATIC と呼ばれる大型の観測で電子のスペクトル中に 800GeV 付近に従来の冪型スペクトルに見られなかった hump が観測され、暗黒物質による電子の発生が議論されている。我々が観測してきたエマルジョンチャンバーによる電子観測ではべき型スペクトルからのずれは観測されていない。大気透過中は、hump がある場合には形が崩れて観測しにくくなる可能性も考えられる。

暗黒物質が対消滅して2個の電子が作られた場合には、暗黒物質の質量エネルギー ( $E_c$ ) を持つ電子が2個生まれる。これらの電子が銀河の中を伝搬するとシンクロトロンや逆コンプトン効果でエネルギーを失ない、太陽系にたどりついた時には暗黒物質の質量エネルギーまで  $E^2 dE$  のべき型スペクトルになる。一方、一般宇宙線中の一次電子はほぼ  $E^{-3} dE$  のスペクトルであるので、暗黒物質起源の電子はエネルギーとともに  $E_c$  までは寄与が大きくなる。

大気頂上でこのような hump を持つスペクトルを仮定し、大気通過による hump の崩れの度合いをシャワー理論に基づいて行い、数値は3-③で述べた複素平面での直接積分の方法で評価した。

結果は図.4 に示すように変形の度合いは少なく、我々と ATIC の観測スペクトル違いについては別途検討が必要な事を示している。

$E^3 x$  (電子の微分スペクトル)



$E/E_c$  ( $E_c$  で規格化した電子のエネルギー)

図4, 大気中での一次電子スペクトルの変形。  
 黒 : 大気頂上。赤 : 3.7g/cm<sup>2</sup>, 緑 : 7.4gr  
 青 : 11gr/cm<sup>2</sup>, 桃色 : 15gr/cm<sup>2</sup> の深さ  
 青 : 11gr/cm<sup>2</sup>, 桃色 : 15gr/cm<sup>2</sup> の深さ  
 文献 : 5, 学会発表-①

②エマルジョンチャンバーによる電子観測のエネルギー校正

一次電子のスペクトルの観測のためのエネルギー決定は、半径 100  $\mu$  以内の電子数の遷移を計測し、理論値と比較して行ってきた。理論値としてはN-K 関数及びモンテカルロ計算を使用し、また FNAL で 50GeV での校正を行ってきた。

前項①に関連して精度の高い一次電子のスペクトルの重要な観測領域に近い 200GeV について今回 CERN の電子ビームを用い、校正を行った。

結果は図.4 に示したが、エネルギーの測定誤差は 10%程度であることが確認された

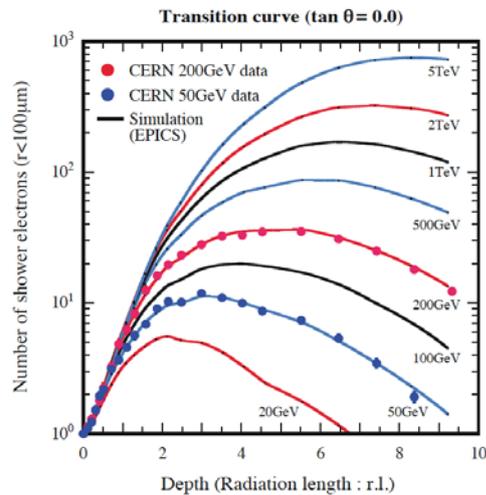


図.4 :CERN の 200GeV の電子ビームを用いて、エマルジョンチャンバーによる電子観測のエネルギー決定の精度の誤差が 10%以内であることを確かめた。

文献 : 5-雑誌論文 ①

③上記の①および②の問題にも関連して、精度の高い一次電子スペクトルを求めるため、気球より上の大気で発生する大気電子についてシャワー理論による精度の高い評価を改めて行った。 $\pi^0$  中間子から直接電子対に崩壊する Dalitz Pair については、従来考慮されていなかったが、その効果が無視できないことを示した。

文献 : 5-雑誌論文 ②

以上述べた研究成果(1)および(2)については数編の論文にまとめ、しかるべき学術雑誌に出版する予定である。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

- ① T. Kobayashi, K. Yoshida, Y. Komori, Y. Sato and J. Nishimura:  
An Accurate measurement of the LPM effect with emulsion Chamber,  
Proc. of 31st ICRC (Lodz), HE. 2. 1,  
査読無、No. 836, pp. 1-4, 2009
- ② Y. Komori K. Yoshida, T. Kobayashi and J. Nishimura :  
Secondary electron spectrum in the upper atmosphere, An Accurate measurement of the LPM effect with emulsion Chamber,  
Proc. of 30th ICRC (Merida), 査読無、Vol. 2, p. 11-14, 2008
- ③ T. Nakatuka and J. Nishimura,  
Moliere Theory of Multiple Coulomb scattering with ionization and the transport mechanism of the multiple scattering process,  
Phys. Rev, E 査読有、Vol. 78, (2008), pp. 021136-1021136-17,

[学会発表] (計 10 件)

- ① J. Nishimura  
Propagation of electron components and Electron Observations with ECC.  
International W. S of Electron-Positron Observations and related topics,  
Univ, Waseda, Dec. 24, 2008
- ② J. Nishimura  
Opening Talk  
Internatoba Workshop of  
“Advances in Cosmic ray Science”  
Univ. Waseda. March. 17, 2008  
Jour. Phys. Soc. Japan, 査読有、Vol. 78, (2009), pp. 1-8, Supplement A
- ③ 西村 純  
N-K 関数と IceCube and Dumand.  
IceCube 研究会. 千葉大学, May 21, 2007.
- ④ 吉田健二  
一次電子と Dark Matter.  
IceCube 研究会. 千葉大学, May 21, 2007.

[その他]

ホームページ等 (4 件)

- ① J. Nishimura (学会発表の①)  
<http://www.calet.rise.waseda.ac.jp/index.php/ja/newsinfo/49-electron2008link>

② 西村 純 (学会発表の③)

<http://www.ppl.phys.chiba>

③ 吉田 健二 (学会発表の④)

IceCube 研究会. 千葉大学, May 21, 2007.

<http://www.ppl.phys.chiba>

## 6. 研究組織

- (1) 研究代表者 西村 純 (Nishimura Jun)  
独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部・名誉教授

研究者番号 : 40013619

- (2) 研究分担者 2007 年度  
吉田 健二 (Yoshida Kenji)  
芝浦工業大学・システム工学部・教授

研究者番号 : 90260984

(2008-2009: 連携研究者)