

# 日食のガイガーカウンタ観測

八木徹<sup>1</sup>, 神部順子<sup>1</sup>, 石川宏<sup>2\*</sup>, 中山榮子<sup>3</sup>, 長嶋雲兵<sup>4</sup>, 青山智夫<sup>4\*\*</sup>

<sup>1</sup>江戸川大学メディアコミュニケーション学部情報文化学科, 〒270-0198 流山市駒木 474,

<sup>2</sup> ナチュラル研究所, 〒191-0041 日野市南平 2 丁目,

<sup>3</sup> 昭和女子大学生生活科学部環境デザイン学科, 〒154-8533 世田谷区太子堂 1-7,

<sup>4</sup> 産業技術総合研究所ナノシステム研究部門, 〒305-8568 つくば市梅園 1-1-1 中央第二.

\* dr.ishikawa@aa.wakwak.com, \*\* aoyama.tomoo@gmail.com

2012年5月21日7:32から約5分間、本州東南側で起こった金環食の際、流山、日野、世田谷区の3地点でガイガーカウンタによる空間線量率の変化を測定した。測定値の周波数スペクトル分布は低・高周波部分に分離できた。高周波部分は2~2.6 minの現象であった。該当する部分を逆フーリエ変換により空間線量率の変化を再現した。宇宙線の擾乱と思われる現象があり、日食の最大食分時刻から5~22 minの遅延の後に5 min以上の静止を示した。遅延時間から太陽風のシンチレーションと考えられる。

キーワード：ガイガーカウンタ, 日食, シンチレーション, 太陽風, 二次宇宙線

# Geiger-Muller counter measurements of the eclipse

Toru YAGI<sup>1</sup>, Jyunko KAMBE<sup>1</sup>, Hiroshi ISHIKAWA<sup>2\*</sup>, Eiko NAKAYAMA<sup>3</sup>,  
Umpei NAGASHIMA<sup>4</sup>, Tomoo AOYAMA<sup>4\*\*</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Media Communication, Edogawa University, 474 Komaki, Nagareyama, Chiba 270-0198, Japan,

<sup>2</sup> Natural Science Laboratory, Minamidaira 2, Hino-city, Tokyo 191-0041, Japan,

<sup>3</sup> Faculty of Human Life and Environmental Science, Showa Women's University, 1-7 Taishido,  
Setagaya-ku, Tokyo 154-8533, Japan,

<sup>4</sup> Nanosystem Research Institute (NRI), National Institute of Advanced Industrial Science and Technology  
(AIST), 1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki 305-8568, Japan.

\* dr.ishikawa@aa.wakwak.com, \*\* aoyama.tomoo@gmail.com

The annular eclipse occurred in the southeast in Japan for 5 min at May 21 2012 7:32, we measured the change in ambient dose rate by using Geiger-Muller counters at three locations, where are Nagareyama, Hino, and Setagaya in Tokyo district.

We calculate frequency spectrum of the observations, and find the spectrum has two distributions. Time scale of the higher-frequency is 2 ~ 2.6 min. We execute an inverse Fourier transformation for the higher-frequency part, and reproduce the change of ambient dose rate. It suggests phenomenon like as scintillation in secondary cosmic ray. It subsides after a delay of more than 5 ~ 22 min from the time of maximum eclipse servings, and then, it scintillates again. We believe the scintillation relates with the solar wind because of the delay time.

Keywords: Geiger Muller counter, eclipse, scintillation, solar wind, cosmic ray

## はじめに

日食観測は初等教育に有効と考えられているが天候に左右される欠点がある。それを含めて観測を理解させるという見解もあるが、苦勞して準備万端整えた先生方にとってみれば「曇天で何も観測できませんでした」では済まないであろう。そこで「天候に恵まれないときは日食の片鱗でも良いから観測したい」と思うのが自然である。そのような要望に応えるため、日食をガイガーカウンタで観測することを考察する。

### 1. ガイガーカウンタで日食は観測可能か

ガイガーカウンタは希ガス等の気体中を粒子線が通過するときに発生するイオンから生じる電氣的パルスを計測する機器で、本来の使用目的は放射線量の測定である。近年、各学校に設置されるようになった。

1) 安価である、2) データロガーとの連動が容易、という特徴がある反面、1)  $\gamma$  線の検出能が低い、2) エネルギースペクトルが測定できない、3) 雑音が多い、4) 経年劣化が大、という欠点がある。しかし精度を要求する観測でないならば、雑音を除き、上記の欠点はそれほど問題ではないと思う。それより日食で地上の放射線量が変化する可能性があるかを考察しなければならぬ。

地上は大気層の底であるから到達するのは二次宇宙線である。約 70%がミュオン（ミュ粒子）、残りが電子、まれに中性子である。二次宇宙線量は文献[1,2]によれば約 0.39 ~ 2.5 [mSv/y]である。地域により差があるが、ガイガーカウンタで観測可能な強度である。ガイガーカウンタは荷電粒子の検出に優れている。ゆえに電子、ミュオンの崩壊した電子は検出できる。ミュオンも荷電粒子であるから検出できる可能性が高い。

二次宇宙線源は一次宇宙線である。ここでは一次宇宙線と太陽風とを分けて考えることにする。両者は陽子と電子を主とする荷電粒子群のプラズマであるが粒子速度が光速の数分の一、300 ~ 900 km/s と異なる[3]。低速の太陽風の粒子は地球の磁場により進路を曲げられ二層のバンアレン帯(Van Allen radiation belt)を  $2 \sim 5 \times 10^3$ ,  $1 \sim 2 \times 10^4$  km 上空に生成し、地上までは届かない[4]。高速の一次宇宙線はバンアレン帯に侵入し、対流圏に入射し空気分子と衝突し様々な核反応を起こし崩壊して二次宇宙線になる。

電波望遠鏡では太陽風によるシンチレーションが観測される。その擾乱現象を利用して逆に太陽風を調べる研究がある[5]。電磁波の太陽風シンチレーション

が存在するのなら、荷電粒子、特に電子線のシンチレーションも存在する可能性がある。これを直接示した文献は見当たらないが、宇宙線の中中性子と中間子のシンチレーションならば 1975 年の南極昭和基地の論文[6]にある。観測器材が一世代前のものなので 5 min 間隔の測定である。それによれば中間子で最短 10 ~ 20 min スケールの現象がある。中性子ではその現象は顕著ではない。一部の  $\pi$  中間子は崩壊して電子になるから電子線のシンチレーションが存在すると考えられる。さらに長時間の擾乱現象については総説がある[7-12]。

高速の宇宙線がバンアレン帯を通過するとき、荷電粒子は進行方向の摂動を受けるであろう。月の磁場は地球に比べてほぼ 0 である[13]から、その方向変化は地球の近くで起こる。摂動効果が小さいならば、一次宇宙線の月の遮蔽は、光の日食時に月の本影近傍で電子数の変化をもたらす。その変化量は、一次放射線と太陽風の月による遮蔽が主のときは月の本影の通過時間程度の現象として観測され、太陽風のシンチレーションが主ならばより高速の現象として観測されるだろう。

日食時に GEOS ( Geostationary Meteorological Satellite )上の宇宙線環境がどうなっているかは宇宙天気予報[14]で調べられる。2012 年 5 月 21 日 7:30 の状態は[15]にある。それによれば陽子、電子ともに静かな状態で磁気嵐は発生していない。

ガイガーカウンタは地中から湧出する  $^{222}\text{Rn}$  や  $^{220}\text{Rn}$  の  $\beta$  線も検出する。線量は約 0.48 [mSv/y]とされている[2]。地中からの湧出分は地殻変動と関係があると言われている[16,17]。したがって線量値の変化は日食の経過時間より遅い。

この他、関東から東北地方では原発事故の  $\beta, \gamma$  線がガイガーカウンタで計測されるが、その線量値の時間変化も遅い[18]。したがって、ガイガーカウンタの計測値をフーリエ変換し、特定の周波数成分を取り出し、逆変換すれば日食を検出できる可能性がある。

二次宇宙線のうち中性子・電子数は雲量との関連が予測される。ミュオンは  $2 \times 10^{-6}$  s で崩壊するが、それが地上まで来るのであるから非常に高速である[19]。雲の影響は少ない。実際に宇宙線成分シミュレータ[20]で地上 23 m の粒子量を大気中の湿度を 0.20, 0.90 として計算した。粒子数比にあまり変化はなかった(付録参照)。ゆえに雨天時は中性子数が少なくなるが、ミュオンや崩壊後の電子は観測できる。食分の大きい日食のとき、かつ悪天候が予測されているとき、ガイガーカウンタ観測を行う価値があると考えられる。もともと

と、宇宙線のシンチレーション現象は大気圧の微小変動を気象条件から独立に測定する目的で研究されてきた[6].

## 2. 時系列現象の周波数分布計算法

時系列現象を  $\{Y(i)\}$ ,  $T_s \leq i \leq T_e$  と表記する. ここで  $T_s, T_e$  は測定開始時刻, 終了時刻である.  $Y(i)$  は時刻  $i$  における現象の強度である. 観測数を  $n$  とし,

$$Y(0)=Y(T_s), Y(n-1)=Y(T_e), \quad (1)$$

とする. 周期的条件を導入しフーリエ変換する.

$$Y(0)=Y(n-1), \quad (2)$$

ゆえに,

$$M=\{Y(n-1)-Y(0)\}/(n-1), \quad (3)$$

$$Z(i)=Y(i)-M_i, 0 \leq i \leq n-1, \quad (4)$$

とする. この  $Z$  関数では  $Z(0)=Z(n-1)$  である.

ここで観測値  $Y(i)$  に含まれる雑音  $N(i)$  について考察する.

$$Y(i)=y(i)+N(i), \quad (5)$$

式(5)の  $y(i)$  が真の観測値である.

現象を複数回測定できるのならば  $\{y(i)\}$  を推測できるが, 日食観測では費用的な制約から只一回の測定しかできない. 我々が採用した対策は以下である.

- 1)  $\{Y(i)\}$  を無雑音測定としてフーリエ変換し,
  - 2) 周波数スペクトルの分布を見て, 雑音が均一に分散する白色雑音の仮定の下,
  - 3) 強度の大きいスペクトル部分が現象を表す, として
  - 4) 制限周波数範囲の逆変換で現象を抽出する.
- 逆変換したスペクトル幅が狭い程, 雑音は軽減される.

現象が低周波成分に存在することが分かっているのならば, フーリエ変換を行わず, 移動平均法などで雑音を軽減して現象を調べることが可能であるが, 前節の考察から低周波成分に重要な情報が存在する保障はない.

Suffix 0 を実数 0,  $n-1$  を  $2\pi$  に対応させる.  $[0, 2\pi]=t$  区間で  $W(i)$  を  $W(t)$  と書く.

$$DC = \sum_{0, n-1} Z(i) * (2\pi/n), \quad (6)$$

$$B_i = DC/n, \quad (7)$$

$$Z'(i) = Z(i) - B_i, \quad (8)$$

$Z'$  関数の直流成分は 0 である. 以後  $Z'$  を  $Z$  と表記する.  $Z(i)$  の最大, 最小値を  $Z_{max}, Z_{min}$  とする.

$$F = 2/(Z_{max} - Z_{min}), \quad (9)$$

$$W(i) = \{Z(i) - Z_{min}\} F - 1, \quad (10)$$

ゆえに,

$$-1 \leq W(i) \leq 1, \quad (11)$$

である. このスケーリングにより 0 にした直流成分が付加される. それは現象とは関係の無いものである. 現象の真の直流成分は式(4,6)から,

$$\{Y(n-1) + Y(0)\} \pi + DC, \quad (12)$$

である. 日食のガイガーカウンタ観測では現象の変化量を調べる. ゆえに, この定常項を考察する必要はない.

$$\{\cos(vt), \sin(vt)\}, 0 \leq v \leq Q < 0.5n, \quad (13)$$

は規格直交系である.  $Q$  は式(13)を満たす十分大きな整数である. 経験的に  $n=O(5)$  ならば  $Q=O(3)$  で十分である. 式(13)は  $v=0$  の項を含むので, 現象とは関係の無い直流成分を表現する. ここで  $O$  は order の意味である. 近似的に,

$$W(t) = \sum_{0, Q} \{A_v \cos(vt) + B_v \sin(vt)\}, \quad (14)$$

$$A_v = \int_{0, 2\pi} W(t) \cos(vt) dt, \quad (15)$$

$$B_v = \int_{0, 2\pi} W(t) \sin(vt) dt, \quad (16)$$

である. 式(15,16)の計算は  $t$  が離散値しか取れないので数値積分となる. 現象の周波数  $v$  の強度と位相は,

$$C_v = (A_v + B_v)^{0.5}, \quad (17)$$

$$\phi_v = \{\arccos(A_v) + \arcsin(B_v)\} / 2, \quad (18)$$

である.

以上の導出は「連続関数は規格直交系で展開できる」という数値解析の公式を, 有限の場合に適用したものである. この時系列現象のフーリエ展開は近似であるが, 経験的に  $Q \sim n/2$  では実用上十分な精度  $O(-3)$  で離散的な観測値を連続関数  $W(t)$  に変換し, かつ周波数強度分布  $\{C_v\}$  を算出した.

逆変換は  $\{A_v, B_v\}$  集合から式(14)により  $W(t)$  を求める. このときの  $t$  は  $[0, 2\pi]$  区間の実数である.

$$W'(t) = \{W(t) + 1\} / F + Z_{min}, \quad (19)$$

により逆スケーリングし,

$$Z(t) = W'(t) + B_i, \quad (20)$$

$$Y(t) = Z(t) + M_t, \quad (21)$$

として元の現象単位系に戻す. 特定の周波数範囲  $[P_s, P_e]$  を見たい場合, 式(14)の代わりに,

$$W(t) = \sum_{P_s, P_e} \{A_v \cos(vt) + B_v \sin(vt)\}, \quad (22)$$

とする. この場合, 逆変換式(19~21)により元の現象にはない直線的な変化が現れることがある. それは不完全展開したことによる式(4)の効果である.

以上の逆変換処理では雑音は  $(P_e - P_s)/n$  程度には軽減されているが, 現象信号との分離が行われていない. それは一回測定の限界から来るものである.

ゆえに式(22)の  $\{W(t)\}$  は雑音成分が混入しており,  $W(t)$  の値を現象の強度として扱ってはならず,  $t \in [0, 2\pi]$  区間での現象相対変化として考察する必要がある.

### 3. 2012年5月21日の金環食観測

2012年5月21日、日本の太平洋に面した広範囲の地域で金環食が見られること、東京(35.6238N, 139.5748E, 0 m)地点では7:31:48~7:36:48 食分0.968であることが予報された。当日の天気予報は曇天であった。

我々は千葉県流山市 P1=(35.8759N, 139.9395E; 48 m), 東京日野市 P2=(35.6578N, 139.4015E; 101 m), 東京世田谷区 P3=(35.6448N, 139.6757E; 40 m), でガイガーカウンタによる金環食の観測を行った。

観測機器： Black Cat Systems, GM-10

測定間隔： 1 min.

観測開始時刻： 最大食分時刻の30分以前

観測終了時刻： 最大食分時刻の30分以後

解析手段： フーリエ変換, 逆変換 Fortran program

ガイガーカウンタ GM-10 観測装置の全体図を Figure 1 に示す。



Figure 1. Geiger counter, GM-10, and the PC logger.

各観測点 P1 ~ P3 の解析結果を周波数スペクトル, 高周波成分の逆フーリエ変換相対強度の順序で Figure 2~4 に示す。

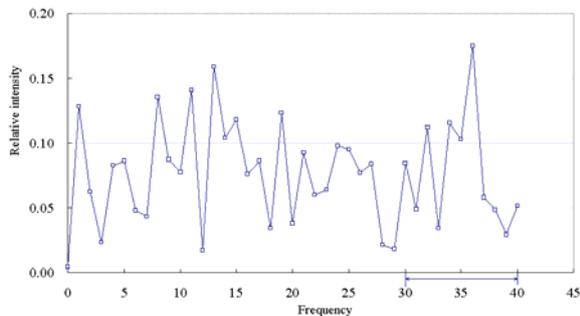


Figure 2a. Frequency spectrum of ambient dose rate changes by the moon's shadow at observation point P1. The measurement term is 81 min. We predict a phenomenon in  $\omega=30 \sim 40$ , where the 40 is the limit of Nyquist frequency.

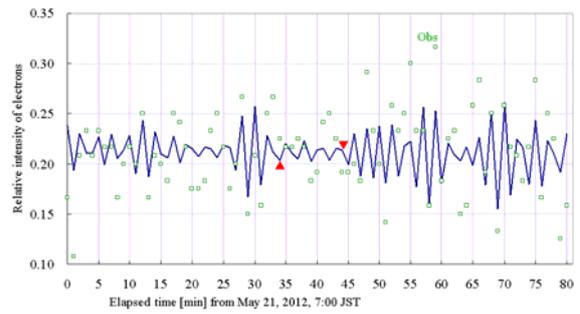


Figure 2b. Inverse transformed ambient dose rate, in case of  $\omega=30 \sim 40$ .

Time scale of the phenomenon is 2.00 ~ 2.67 min. The unit of vertical axis is [ $\mu\text{Sv/h}$ ]. The red triangular mark indicates the first and last times, when scintillation of the solar wind is subsided.

Figure 2b の赤▲の部分で二次宇宙線の擾乱の低下した時間(7:34~44)である。緑色の口が測定値である。擾乱が低下した中央部分5 min は7:36.6~41.5である。日食時刻(7:31.75~7:36.75)からの遅延は $\Delta=4.75$  minである。電子速度は1350 km/sである。太陽風の上限度の1.5倍である。

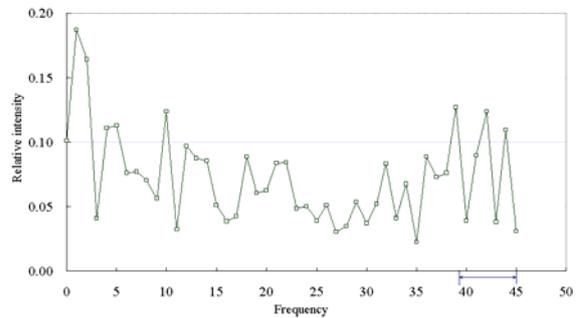


Figure 3a. Frequency spectrum of ambient dose rate changes by the moon's shadow at observation point P2. The measurement term is 90 min. We predict a phenomenon in  $\omega=39 \sim 45$ .

Figure 3a では周波数スペクトルの低高周波成分が二分され、二次宇宙線量の擾乱を検出している。

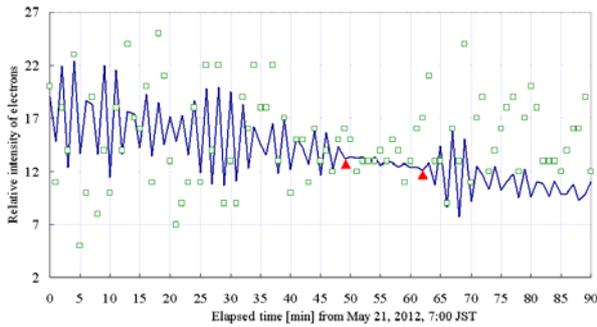


Figure 3b. Ambient dose rate change reproduced by an inverse transformation for  $\omega=39 \sim 45$ .

The time scale of the reproduction is 2.05 ~ 2.31 min. The unit of vertical axis is [CPM].

Figure 3b の赤▲の部分宇宙線の擾乱の低下した時間(7:49 ~ 63)である。その中央部 5 min は 7:53.5 ~ 58.5 である。日食時刻(7:31.75 ~ 7:36.75)からの遅延は  $\Delta=21.75$  min である。電子速度は 295 km/s である。太陽風の粒子速度の下限である。高周波成分が空間線量率の擾乱の静止を明瞭に示している。太陽風のシンチレーションが検出されたのではないかと思う。

P2 地点の観測では低周波成分も大きく、そこに何か現象が存在するように見える。我々は 90 min の観測では十分に低周波成分を検出できないと考え、2011 年 8 月 1 日 0:00 から 2012 年 5 月 31 日 23:50 の 10 min 間隔測定値 43908 個の周波数スペクトルを計算した。その結果 24 時間の現象を示す鋭いピークを得た[21]。すなわち、空間線量率に日周変化があること、位相角が 90 deg (6 時に対応)であることを示していた。位相角から計算される粒子速度は 2309, 989, 630,...km/s である。この結果は太陽からの粒子線が空間線量率に影響していることを示している。

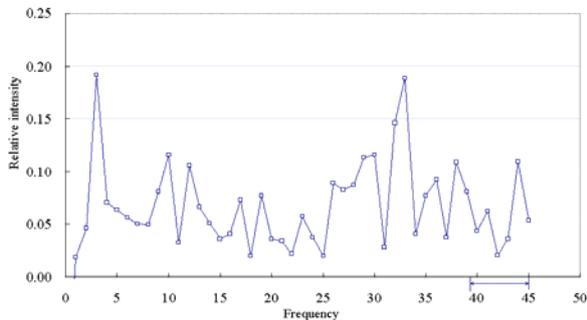


Figure 4a. Frequency spectrum of ambient dose rate changes by the moon's shadow at observation point P3. The measurement term is 90 min. We predict a phenomenon in  $\omega=39 \sim 45$ .

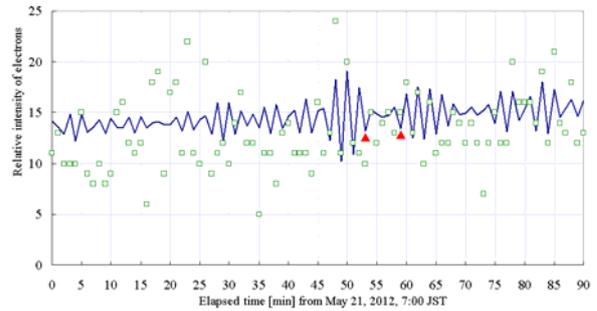


Figure 4b. Ambient dose rate change reproduced by an inverse transformation for  $\omega=39 \sim 45$ .

The time scale of the reproduction is 2.05 ~ 2.31 min. The unit of vertical axis is [CPM].

Figure 4b の赤▲の部分宇宙線の擾乱の低下した時間(7:53 ~ 59)である。その中央部 5 min は 7:53.5 ~ 58.5 である。日食時刻(7:31.75 ~ 7:36.75)から遅延時間  $\Delta=21.75$  min である。電子速度は 295 km/s である。太陽風の粒子速度の下限である。

#### 4. Cosmic Ray Station 観測との対応

Finland, Oulu に Cosmic Ray Station があり Neutron Monitor, 9-NM-64 が設置されている[22]。その地では 2003 年 5 月 31 日に部分食 (Table 1) があった。本節の時刻は UTC (Universal Time, Coordinated) である。

Table 1. Eclipse on May 31, 2003 at point P4\*.

UTC+2h	Phase
2003/05/31 5:40:00	0.842
2003/05/31 5:45:03	0.868 <i>max</i>
2003/05/31 6:00:00	0.720

\* The location is {65.05N, 25.47E}.

2003 年 5 月 31 日 3:00 ~ 5:00 の 1 min 間隔の測定粒子数をフーリエ変換した周波数スペクトルと高周波成分( $\omega=49 \sim 59$ , 2.01 ~ 2.42 min の現象)の逆変換結果を Figure 5 に示す。

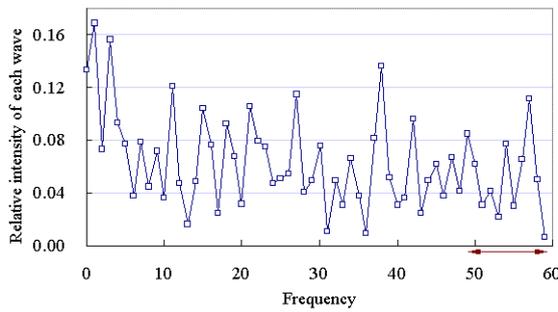


Figure 5a. Frequency spectrum of measurements of neutron monitor, 9-NM-64, by the moon's shadow at point P4. The term is 120 min. There is a phenomenon in  $\omega=49 \sim 59$  (marked by an arrow).

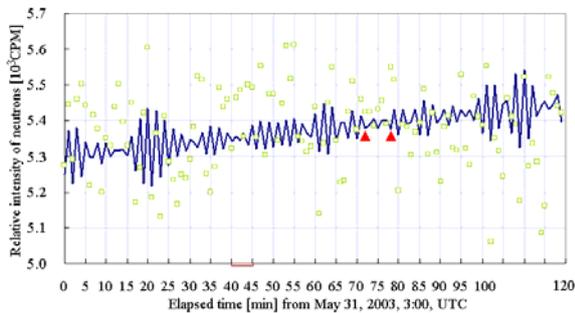


Figure 5b. Cosmic ray particles change reproduced by an inverse transformation for  $\omega=49 \sim 59$ .

The time scale of the reproduction is 2.01 ~ 2.42 min. The unit of vertical axis is  $[10^3 \text{ CPM}]$ .

Figure 5bの赤▲で挟まれた実線部分が宇宙線の擾乱の低下した時間(4:12~18)である。部分食なので日食の時間帯が金環食のように明確に定まらないが、最大食分時3:45の前後3 minと考えると3:42~48である。遅延時間は $\Delta=30 \text{ min}$ である。中性子速度は214 km/sである。太陽風の速度の下限より29%遅い。地上まで中性子が到達するまで何段階もの核反応を経たと思われる。

以上、9-NM-64の測定でも粒子のシンチレーション現象が存在した。

## 5. 平常時の荷電粒子線擾乱

平常時、ガイガーカウンタで観測できる2 min オーダの擾乱現象がどのくらいの時間静止するのかを2012年8月29~30日、乗鞍観測所(2.87 km, 725 hPa)で1480 min計測した。天候は霧雨であった。高山で計測する理由は、

1. 宇宙線量が高く S/N 比が良い、EXPACS[11]で計算すると合計線量は114 [nSv/h]で平地の3.6倍である。
2. 大気が薄く二次宇宙線シャワー現象が少ない、た

めである。

フーリエ変換したスペクトルを Figure 6a に示す。

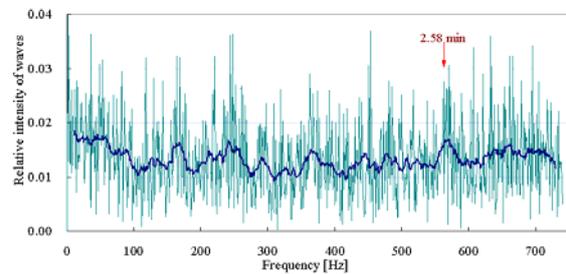


Figure 6a. Frequency spectrum of ambient dose rate changes at Norikura station (36.116N, 137.553E).

Pale blue line is the intensity of expanded waves, and dark blue line is moving-average of 21. We predict a phenomenon in  $\omega=572 \sim 740$ , 2.58 ~ 2.00 min.

スペクトル強度は一定ではなく、 $\omega=572$ 以上の高周波成分も小さくない。時間スケール2.00~2.58 minの現象の強度を Figure 6b に示す。擾乱現象は波状の強度変化を示している。強度=波高差とすると $\pm 0.6/22.5=27\%$ である。文献[7-12]等而言及している擾乱の強度は $>10^4$ で、かつ時間スケールも1時間以上である。本論文の擾乱現象は Figure 6b 中の赤い矢印の所で3 minの静止を示した。ゆえに日食でなくとも宇宙線の2min オーダの擾乱現象は静止するが6~14 minのような日食時のような長時間ではない。8月29日12:00~8月30日12:00, (UTC 8/29, 3:00~8/30, 3:00)のGOESの状況は陽子、電子とも静穏であった[23]。ただし、太陽東端でフレアが発生しX線は8/29, 0:00 UTCから増大している。太陽風、磁気圏はまだ穏やかである。

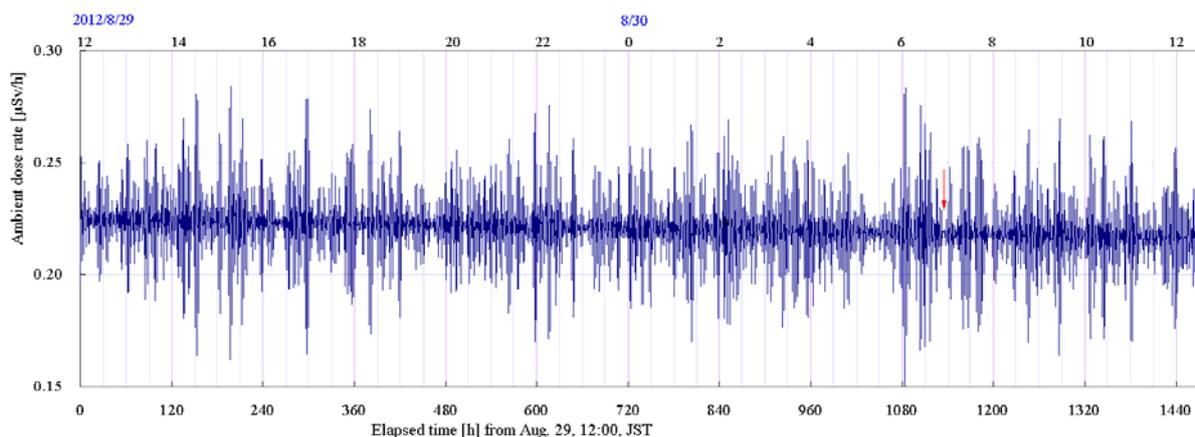


Figure 6b. Cosmic ray particles change reproduced by an inverse transformation for  $\omega=572 \sim 740$ .

The time scale of the reproduction is 2.00 ~ 2.58 min. The unit of vertical axis is [ $\mu\text{Sv/h}$ ].

Scintillation is sinking at the red arrow, where the elapsed time is 3 min.

## 6. まとめ

日本時間 2012 年 5 月 21 日 7:31:48 から 7:36:48 東京 {35.6238N, 139.5748E} で起こった金環食を、千葉県流山市、東京日野市、東京世田谷区の 3 地点でガイガーカウンタにより空間線量率を測定した。測定値をフーリエ展開し、周波数スペクトル分布が低・高周波部分に分離できることを示した。高周波部分は 2.00 ~ 2.6 min の現象であった。その現象に該当する周波数領域を逆フーリエ変換により空間線量率の変化を再現した。空間線量率は二次宇宙線の擾乱と考えられる現象を示し、かつ最大食分時刻から 5 ~ 22 min の遅延の後に 5 min 以上の静止時間を示した。それらの現象は 3 観測点で異なっていた。それは日食との関連がある現象と考えられ、我々の解釈を第 2 節に示した。ただし、それらは仮説であり、擾乱現象が太陽風のシンチレーション効果であると結論できた訳ではない。傍証として次の 2 点を確認した。

我々は同様の観測を調査し、Oulu の Cosmic Ray Station の Neutron Monitor, 9-NM-64 の部分日食時の宇宙線粒子数変化の測定を見出し、日食の時間帯を含む 120 min 間の測定値をフーリエ変換し、周波数スペクトルから 2.10 ~ 2.42 min の成分を逆フーリエ変換した。その結果は二次宇宙線数の擾乱が日食後の 30 min 後に 6 min 低下していた。

荷電粒子の擾乱静止は日食でなくとも起こる。標高 2.87 km, 725 hPa の乗鞍観測所で観測したときは 3 min

静止した。日食時のような 6 ~ 14 min 静止する状況は 1440 min の観測では無かった。

ゆえに、市販の安価なガイガーカウンタで悪天候時に日食の片鱗らしい現象を観測する当初の目的を達成したと考える。

## 謝辞

本研究では自然科学研究機構の協力により乗鞍観測所の設備を使用いたしました。ここに多大の感謝を申し上げます。

## 参考文献

- [1] ジョゼフ・ヴァイス, 本多力訳「核融合エネルギー入門」白水社, 2004年, ISBN 4-560-05875-X.
- [2] 東嶋和子「放射線利用の基礎知識」講談社, 2006年, ISBN 4-06-257518-3.
- [3] 太陽風の速度実況, Japan Space Weather Information Center, [http://swnews.nict.go.jp/rt/crl\\_27d\\_sw.html](http://swnews.nict.go.jp/rt/crl_27d_sw.html).
- [4] 英語版 Wikipedia, “Van Allen Radiation Belt”, [http://en.wikipedia.org/wiki/Van\\_Allen\\_radiation\\_belt](http://en.wikipedia.org/wiki/Van_Allen_radiation_belt).
- [5] 名古屋大学, 太陽地球環境研究所, 太陽圏環境部門 <http://stsw1.stelab.nagoya-u.ac.jp/study/sub4.htm>.
- [6] Masatoshi KITAMURA, H. Ikegami, M. Kodama, ”Studies of Cosmic-Ray Scintillations Observed at Syowa Station, Antarctica (I)”, National Institute of Polar Research, 1975.
- [7] 亙慎一, 永岡賢一「小特集宇宙天気予報 1. はじめに」 *J. Plasma Fusion Res.* Vol.82, No.11 (2006) pp.737-738.
- [8] 亙慎一「小特集宇宙天気予報 2. 宇宙環境擾乱による障害と宇宙天気予報」 *J. Plasma Fusion Res.* Vol.82, No.11 (2006) pp.739-744.
- [9] 浅井歩「小特集宇宙天気予報 3. 太陽プラズマ」 *J. Plasma Fusion Res.* Vol.82, No.11 (2006) pp.745-750.
- [10] 小島正宜「小特集宇宙天気予報 4. 太陽風プラズマ」 *J. Plasma Fusion Res.* Vol.82, No.11 (2006) pp.751-756.
- [11] 小原隆博「小特集宇宙天気予報 5. 磁気圏プラズマ」 *J. Plasma Fusion Res.* Vol.82, No.11 (2006) pp.757-761.
- [12] 丸山隆「小特集宇宙天気予報 6. 電離圏プラズマ」 *J. Plasma Fusion Res.* Vol.82, No.11 (2006) pp.762-766.
- [13] 月磁場観測装置, Japan Aerospace Exploration Agency, <http://www.isas.jaxa.jp/j/topics/topics/2007/1129.shtml>.
- [14] Space Weather Prediction Center, <http://www.swpc.noaa.gov/index.html>.
- [15] 篠原学「宇宙天気ニュース」 [http://swnews.jp/2012/swnews\\_1205221122.html](http://swnews.jp/2012/swnews_1205221122.html).
- [16] 名古屋大学理学部, 三河地殻変動観測所「三河地殻変動観測所におけるラドン濃度の連続観測」 [http://cais.gsi.go.jp/KAIHOU/report/kaihou26/04\\_12.pdf](http://cais.gsi.go.jp/KAIHOU/report/kaihou26/04_12.pdf).
- [17] ラドン(自然環境中の放射線源), ATOMICA, [http://www.rist.or.jp/atomica/data/dat\\_detail.php?Title\\_No=08-01-03-12](http://www.rist.or.jp/atomica/data/dat_detail.php?Title_No=08-01-03-12).
- [18] Monitoring information of environmental radioactivity level, Ministry of education, culture, sports, science and technology, Japan, <http://radioactivity.mext.go.jp/map/ja/>.
- [19] 富永健, 佐野博敏「放射化学概論」東京大学出版会, 1983年, ISBN 4-13-062069-X.
- [20] 佐藤達彦, ”Excel-based Program for calculating Atmospheric Cosmic-ray Spectrum, EXPACS”, <http://phits.jaea.go.jp/expacs/jpn.html>.
- [21] Tomoo AOYAMA, distribution of SPM, radioactive SPM, <http://suspendedparticulatematter.web.fc2.com/>.
- [22] Oulu Cosmic Ray Station, <http://spaceweb.oulu.fi/projects/crs/>.
- [23] 篠原学「宇宙天気ニュース」 [http://swnews.jp/2012/swnews\\_1208301059.html](http://swnews.jp/2012/swnews_1208301059.html).

付録 地点 {31.8N, 131.4E; 23m} の環境宇宙線量

条件		
大気深度	1034 g/cm <sup>2</sup>	
地磁気強度	13.3 GV	
太陽磁場強度	463.3 MV	
周辺環境 水分含有率	0.20	0.90
線量率	nSv/h	nSv/h
合計線量	31.1	30.1
中性子	5.63	4.58
陽子	1.17	1.17
α線	3.09×10 <sup>-4</sup>	3.09×10 <sup>-4</sup>
μ <sup>+</sup> 粒子	9.91	9.91
μ <sup>-</sup> 粒子	8.45	8.45
β線	3.03	3.03
陽電子	2.14	2.14
γ線	0.785	0.785