

カオスで探る宇宙線源

大原 荘司、小西 健陽、向井 厚志
奈良産業大学 情報学部

概要

宇宙線空気シャワーサイズの時系列データ (約 1.1×10^5 イベント) についてフラクタル次元を求めるカオス解析を行った。カオス性を示す時系列データ群について、一次宇宙線入射方向の赤径分布の異方性を求めた結果、6 h、12 h、22 h 付近にフラクタル次元値にも依存する偏りがみられた。これらの方向から $1.0 \text{ TeV} \sim 1 \text{ PeV}$ のエネルギーの宇宙線を間欠的ながら数日程度継続して放出するガンマ線源あるいはダークマターのようなプロトン宇宙線を媒介する天体の存在が推定される。

第1章はじめに

地球への宇宙線の到来方向に異方性は現れないということは、1911年の宇宙線発見以来最近まで信じられてきたことである。そのことは、宇宙線の本体が陽子であるとすれば、そのエネルギーが 10^{15} eV 程度であっても、太陽系を取り巻く銀河磁場のためにラーモア半径 1 pc で回転をつづけながら到来すると考えられるからであった。しかし近年になって、 TeV のエネルギーをもったガンマ線が宇宙線の有力候補として浮上し、銀河系内などにその発生源が異方的に特定されるようになった。チェレンコフ光ガンマ線望遠鏡¹⁾ や人工衛星に搭載されたガンマ線カロリメータの登場や空気シャワーによって発生する大気蛍光を多数の光電子増倍管からなるカメラで画像としてとらえるテレスコープアレイや同じ大気蛍光を人工衛星の宇宙望遠鏡で観測する方法などがこのことに与かっている²⁾。

高エネルギーガンマ線の発生機構についてもさまざまな研究がすすめられ、高エネルギー電子が強い磁場によって曲げられる際に発生するシンクロトロン放射、高エネルギー電子が原子核に衝突する際に発生する制動放射、高エネルギーの電子が低エネルギーのガンマ線と衝突する際の逆コンプトンの散乱機構による高エネルギーガンマ線の発生、高エネルギーの陽子が原子核と反応して生ずる中性のパイオンが崩壊して生ずるガンマ線などが有力なガンマ線宇宙線源と考えられている³⁾。またこれらの機構を担う天体としては、かに星雲のようなパルサー星雲 (PWN)、Mrk 421 のような活動銀河核 (AGN)、SN 1006 のような超新星残骸 (SNR) が候補にあげられている⁴⁾。

観測においては、 GeV 領域で高感度を持つフェルミガンマ線宇宙望遠鏡が2008年に打ち上げられ、カロリメータによる電子・陽電子の観測で陽電子の過剰を発見しダークマターの存在を根拠づける事実ではないかと注目されている⁵⁾。また、かに星雲から 100 TeV におよぶまでのガンマ線の放射が観測されている⁶⁾。 TeV ガンマ線は前述のように地上観測が可能で、日本とオーストラリアの国際共同による「カンガルー」望遠鏡など大気チェレンコフ望遠鏡によって世界各地で行われている。高エネルギーガンマ線が大気と衝突してできる空気シャワー中の高エネルギー電子が大気中の光速より早く移動するとき生ずる光がチェレンコフ光であるが、これを反射鏡で集光してガンマ線の入射方向を知るものである。

従来から宇宙線の観測では、一次宇宙線が大気圏に到来することをイベントと呼び、そのイベ

ントごとの特徴に注目するのが常であり上記のチェレンコフ望遠鏡もこの伝統に沿ったものである。筆者らはかつてよりこのイベント時系列の集団としての性質に注目し、到来時間間隔の時系列データのフラクタル次元を求めるなどによりイベント間の相関を探求するとともに、遠く離れた(10 km以上)観測地点で観測されたイベント間の到来時刻や到来時間間隔時系列のカオス性を探求してきた。それぞれの観測装置は、シンチレーションカウンタアレイで小規模であるが、複数の地点での観測データを総合することによって大規模な装置に匹敵する結果も得られたと考える⁷⁾。

本報告では、2004年から2007年の4年間に11 km離れた近畿大学(以下大阪)と奈良産業大学(以下奈良)で観測された空気シャワーデータに基づき、到来一次宇宙線のエネルギーの時系列データ(200(奈良)、300(大阪)イベント、期間約12時間)のフラクタル次元解析によって抽出したカオスイベント系列のうち、カオスに寄与する高エネルギー(10¹⁵ eV付近)のイベントが到来方向に異方性を示すことについて報告し、到来時刻のコインシデンスデータとあわせて考察する。

第2章 宇宙線エネルギー時系列のカオス

カオス解析(フラクタル次元解析)の対象としたのは、2004年から2007年の間に観測された奈良の445591イベントと大阪の644110イベントのデータである。宇宙線が大气に衝突して形成される空気シャワーのフロント面をキャッチする、それぞれ7台(奈良)および5台(大阪)のシンチレーションカウンタで50ナノ秒以内に全カウンタで同時計測される場合を空気シャワーイベントとして記録する。各カウンタで検出した高エネルギー電子(地表での空気シャワーの本体)の数を表すパルスハイト値から、西村・鎌田の式を用いたシミュレーションで空気シャワーサイズ(地表に到来した全電子数)をイベントごとに求め、その観測順時系列データを解析の対象とした。ちなみに、シャワーサイズを10⁹倍したものがeV単位の一次宇宙線のエネルギーと一般に推定される。

シミュレーションの詳細は、昨年奈良産業大学情報学フォーラム・オンラインジャーナルに報告済み⁸⁾であるので割愛するが、奈良産業大学のアレイについて得られたエネルギー分布の様子を図1に示す。

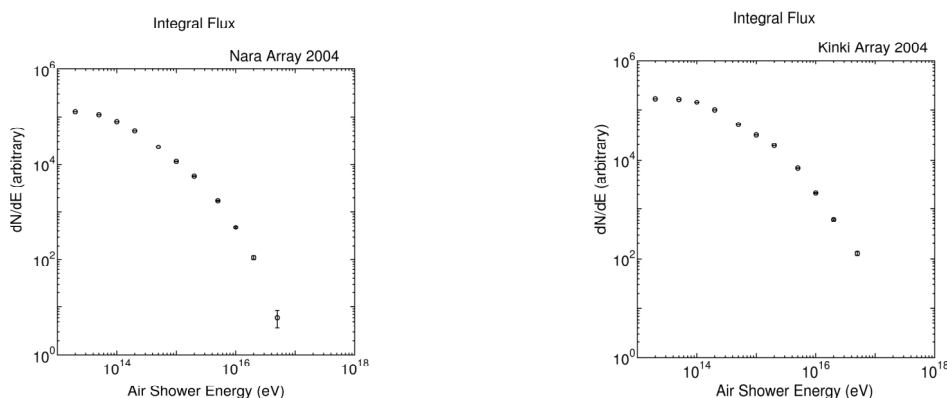


図1 The energy distribution of the air showers observed in Nara Sangyo University(left) and Kinki University(right).

10^{15} e V 付近に knee とよばれる盛り上がりが見られる宇宙線の一般的なエネルギー分布の性質を備えている。大阪のデータに比べて、奈良のエネルギー分布がやや低い側にシフトしているのは、アレイを形成するシンチレーションカウンターの間隔が、大阪の 25 m に比べて 18 m と短いことに起因している。このために 10^{15} e V 付近のイベントの割合が大阪に比べて小さくなり、後述するようにカオスの出現頻度が低くなる結果となっている。西村・鎌田の式による空気シャワーサイズの導出が精度上万能とは言えないことも考えられるが、大きなレンジの変動のあり方に敏感なカオス解析の上では十分な精度を持つものと判断した。どのようなサイズ幅のイベントを解析対象とするかを決定するために、サイズの下限値を 1.0×10^4 として上限値を変えて半年間での出現頻度を求めると、図 2 に示すように奈良、大阪ともに 7.5×10^6 付近でピークを示したので、 $1.0 \times 10^4 \sim 7.5 \times 10^6$ を解析対象のサイズ範囲とした。11 km 離れた位置で観測された大阪と奈良のデータでこのような一致が見られることは、カオス解析が偶然を観ているのではなく宇宙線の物理を観ていることを示している。

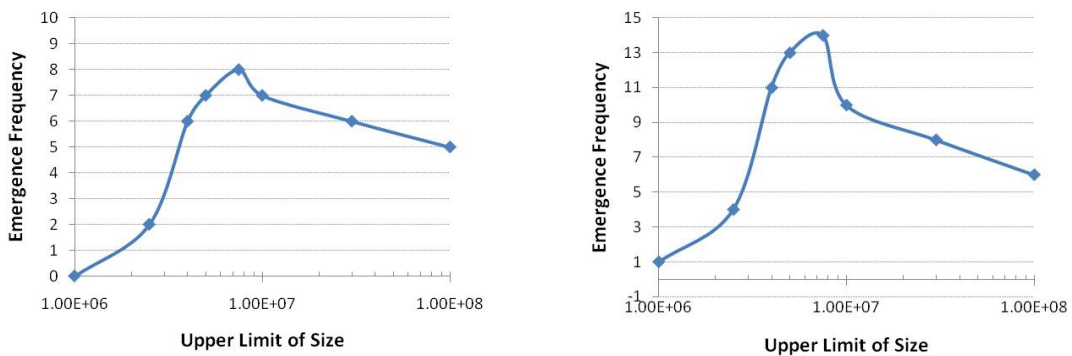


図 2 The size range of analyzed air showers vs. emergence frequency of the chaotic events observed in Nara-Sangyo University(left) and Kinki University(right).

フラクタル次元解析は、Grassberger & Procaccia⁹⁾の方法を用いているが、これはコロモゴロフエントロピーを求めることに相当し、宇宙線の時系列を集団現象ととらえ、イベント間に何らかの相関性秩序もった集団を抽出する物性実験的手法である。解析の詳細は前回の報告に譲るが、元の時系列データを 11 ケずつ順次つまみとって 11 次元の位相空間に埋め込み、埋め込まれた点群が位相空間の距離の何乗に比例してその数を増加させるかを解析する。5 以下の非整数値として、べき乗値が求められればその値がフラクタル次元値であり、元の時系列データはカオス性を持つと判断される。カオス性の裏付けとして、時系列データのフーリエ解析で周期性を表すピークは得られないこと、また元の時系列データの系列順序をシャッフルするとカオス性を失うことから $1/f$ カラーノイズではないと判断できることや、フラクタル次元値の得られる時系列については最大リアプノフ指数が有意にプラスの値を持つことが確かめられており⁸⁾、カオス性を持つことは明らかである。リアプノフ指数解析の詳細についても前回の報告に譲る。今回は時系列に並んだ数十万のデータを 300 乃至 200 イベント（期間を約 12 時間として）ずつ解析し、スタートのイベントを 3 乃至 2 イベントずつ順次ずらせて解析した。現在のパソコンで、1 年分の約 15 万イベントを解析するのに約 3 時間を要する計算量である。

埋め込み次元 11 次元で得られたフラクタル次元がほぼ 5.0 より小さいことを確認して、同様の解析を埋め込み次元 9 次元でも行い、2 つの埋め込み次元において重なる区間でカオス性

が得られる場合のみを抽出対象とした。表1に示すのは、2004年と2005年に大阪および奈良で得られた宇宙線カオスの出現期日とそのフラクタル次元値である。2004年は、大阪では8月から10月を中心に約80日の測定休止があり、2005年は大阪で8月に10日、奈良で7月から8月にかけて45日の休止、2006年は、大阪で7月から12月まで休止、2007年は大阪、奈良ともに7月から12月まで休止となっている。測定休止の期間がありながらもカオスの出現頻度が大阪で比較的大きいのは、前述のエネルギー分布の違いが主な要因と推定される。カオス出現に重要な役割を果たす、 $4.0 \times 10^6 \sim 7.5 \times 10^6$ eVのサイズ範囲のイベントが大阪では約3%、奈良では約1%を占めておりこの違いがカオス出現率の差に表れている。カオスの出現頻度にこのようにエネルギー分布と関連して明瞭な違いがあるという事実も、カオス解析結果が偶然の産物やノイズによるものではないことを意味している。表2には同様に2006年と2007年の結果を示す。

平均のフラクタル次元値は、大阪では2004、2006、2007年で2.4、2005年では2.5である。奈良では、2004年が2.3、2005、2006年が2.1、2007年度が2.0であった。次元値の違いは、エネルギー時系列発生過程の動力学的の違いを意味しており後に考察する。

宇宙線のカオスを探求してきた過程で、宇宙線到来時間間隔の時系列データのカオスに注目し、“fractal wave model”にもとづいてカオス出現の期日が11km以上離れた、異なる観測地点間で同期する可能性について探り一定の肯定的結論を得ている⁷⁾が、今回のエネルギー時系列データに関しては、明瞭な同期性が現れているとは言い難い。“Fractal wave model”のような、大広域での宇宙線集団現象が起こっているという仮定の上でなお、カオスの出現期日に大阪と奈良で同期が見出しにくいことには二つの原因が考えられる。一つは、前述のように二つの観測地点で観測の条件が異なり、エネルギー的にややシフトして宇宙線群を観測していることと、二つ目はエネルギー的にランダムな時系列の宇宙線がノイズとして混入することによって多くの期日でカオス性が壊れた宇宙線を観測していることである。このことについては後にあらためて考察する。

表 1. The chaotic air shower size groups detected in 2004 and 2005 for the air shower data observed in Kinki and Nara-Sangyo University.

Kinki Univ. 2004		Nara-Sangyo Univ. 2004		Kinki Univ. 2005		Nara-Sangyo Univ. 2005	
Date	Fractal Dimension	Date	Fractal Dimension	Date	Fractal Dimension	Date	Fractal Dimension
Jan. 5	2.1	Jan.11	2.5	Jan. 1	2.2	Feb. 9	2.7
Jan.20	2.9	Feb.21	2.1	Jan. 3	2.5	Feb.22	3.5
Jan.29	2.5	Feb.24	2.7	Jan. 5	2.9	Mar.18	2.2
Feb. 4	2.0	Mar.11	2.9	Jan.14	3.0	Mar.20	1.5
Feb. 9	2.8	Mar.28	2.4	Jan.24	1.9	Mar.23	1.5
Mar.19	3.0	Apr.21	2.6	Jan.30	2.8	Apr. 3	2.4
Apr. 2	2.7	May.14	1.6	Feb. 1	2.5	Apr.17	1.9
Apr. 3	2.5	Jun. 6	2.4	Feb. 7	2.7	May.10	2.7
Apr. 4	2.6	Jul. 5	1.7	Mar. 9	2.4	May.20	2.1
Apr. 7	2.8	Jul.29	2.4	Mar.14	2.7	Jun. 9	1.8
Apr. 8	2.2	Sep.27	2.4	Mar.27	2.1	Jul. 4	2.2

Apr.13	2.4	Oct.25	2.2	Apr. 4	2.6	Jul. 7	2.3
Apr.14	2.5	Oct.26	2.1	May. 1	2.4	Jul.10	2.1
Apr.16	2.3	Oct.31	2.5	May. 2	2.9	Oct.29	1.7
Apr.30	2.1	Nov.29	2.8	May.13	3.0	Nov. 9	1.7
Jun. 3	2.5			May.17	3.0	Nov.15	2.6
Jun. 7	2.7			May.24	2.6	Nov.25	1.4
Jun. 8	2.0			Jun. 4	2.0	Oct.13	2.8
Jun.10	2.2			Jun.16	2.5		
Jun.23	2.6			Jun.22	2.4		
Jul. 5	1.7			Jun.29	2.8		
Jul. 9	2.8			Jul. 7	3.1		
Jul. 29	3.1			Jul.16	2.2		
Aug. 4	2.1			Jul.22	2.8		
Nov. 1	2.1			Aug.23	2.8		
Nov. 8	2.5			Aug.29	2.7		
Nov.19	2.0			Aug.30	2.1		
Nov.22	2.5			Sep. 2	3.0		
Nov.24	2.1			Sep.27	3.1		
Dec.17	3.1			Oct.17	2.5		
				Oct.24	1.8		
				Oct.26	2.8		
				Nov. 7	3.1		
				Nov.16	2.9		
				Nov.30	2.2		
				Dec.13	2.4		
				Dec.22	2.3		
				Dec.25	3.0		
				Dec.28	2.0		

表 2. The chaotic air shower size groups detected in 2006 and 2007 for the air shower data observed in Kinki and Nara-Sangyo University.

Kinki Univ. 2006		Nara-Sangyo Univ. 2006		Kinki Univ. 2007		Nara-Sangyo Univ. 2007	
Date	Fractal Dimension	Date	Fractal Dimension	Date	Fractal Dimension	Date	Fractal Dimension
Jan.11	2.1	Jan.16	2.3	Jan. 2	2.6	Jan. 5	2.4
Jan.20	2.8	Feb.22	1.7	Jan.14	3.2	Jan. 8	1.3
Jan.21	2.0	Feb.27	1.4	Jan.20	3.0	Jan.27	1.8
Jan.26	2.3	Mar. 1	2.5	Jan.21	2.9	Feb. 6	1.8
Feb. 2	2.2	Mar. 2	1.8	Feb.13	1.7	Feb.10	2.4
Feb.22	2.7	Mar.12	2.3	Mar. 4	2.5	Feb.15	2.3
Feb.26	2.6	Mar.21	2.1	Mar.27	2.2	Feb.20	2.3
Mar. 4	2.4	Mar.24	1.9	Apr. 3	2.4	Apr.13	1.5
Mar.13	2.3	Mar.27	1.9	Apr.10	2.8	Apr.15	2.8
Mar.14	2.8	Apr.25	2.3	Apr.22	2.3	Apr.30	2.2
Apr.12	2.8	May. 2	3.0	Apr.27	2.7	May. 2	1.9

Apr.19	2.4	Jun. 6	2.3	Apr.29	2.4	May.20	2.0
Apr.26	2.4	Jun.10	3.0	May.28	1.6	Jun. 2	1.7
May. 1	1.9	Jun.15	1.6	Jun. 6	2.0	Jul. 5	1.7
May. 4	2.9	Jun.22	3.2				
Jun.30	2.5	Jun.25	1.8				
		Jul. 2	1.4				
		Jul.19	2.4				
		Jul.20	2.4				
		Jul.23	1.8				
		Jul.27	1.3				
		Jul.30	1.8				
		Aug.17	1.6				
		Sep. 6	2.8				
		Sep.17	1.9				
		Oct. 3	2.3				
		Oct.24	1.5				
		Nov.17	2.4				
		Nov.23	1.9				
		Dec. 9	2.2				

第3章カオスの異方性

前章で述べたように求められたカオスエネルギー時系列群について到来方向に異方性が見出せないかどうか検討した。前述の様に、カオス性出現に寄与が大きいのは、空気シャワーサイズが $4.0 \times 10^6 \sim 7.5 \times 10^6$ eV の範囲の宇宙線であるといえるので、カオス時系列の 200 乃至 300 イベントのうちシャワーサイズがこの範囲にはいる宇宙線を抽出し 3 カ月あるいは 1 年間のデータを集積してその赤径の頻度分布を求めた。その際、フラクタル次元が 2.5 以上の場合と、2.5 より小さい場合とに分けることとした。一般に、フラクタル次元値が高いということは、より複雑な動力学が発生過程に関わっていると考えられ、2.5 という値は、大阪データでのフラクタル次元値の平均値を参考にしてはいるがその妥当性はともかくも発生過程の違いと異方性との直接の関連を想定するのは自然なことである。図 3 がその結果で、大阪観測データの 2004 年から 2007 年の 4 年間のカオス区間の上記サイズ範囲の宇宙線の赤径頻度分布を 1 年ごとに求めたものである。赤径の測定精度は、 ± 0.5 h である。フラクタル次元が 2.5 以上の時系列の場合の、2006 年、2007 年では顕著なピークは見られないが、その他では、12 h 付近、6 h 付近、22 h 付近にピークが見られる。概して、次元値 2.5 以上では、12 h のピークがより顕著で、フラクタル次元が 2.5 より小さい時系列では、6 h と 22 h のピークがより顕著であるといえそうである。

同様に 3 か月ごとの変動を 2005 年の大阪データの解析結果で見ると図 4 に示すように、フラクタル次元が 2.5 より小さい場合の 6 h でのピークは 10 月～12 月で最も顕著にあらわれ、フラクタル次元が 2.5 以上の場合の 12 h でのピークは 7 月～9 月で最も顕著にあらわれている。このことは、エネルギー時系列でカオス性を示す宇宙線の到来方向に異方性があるものの、それぞれの方向から宇宙線が定常的に到来しているわけではないことを示している。

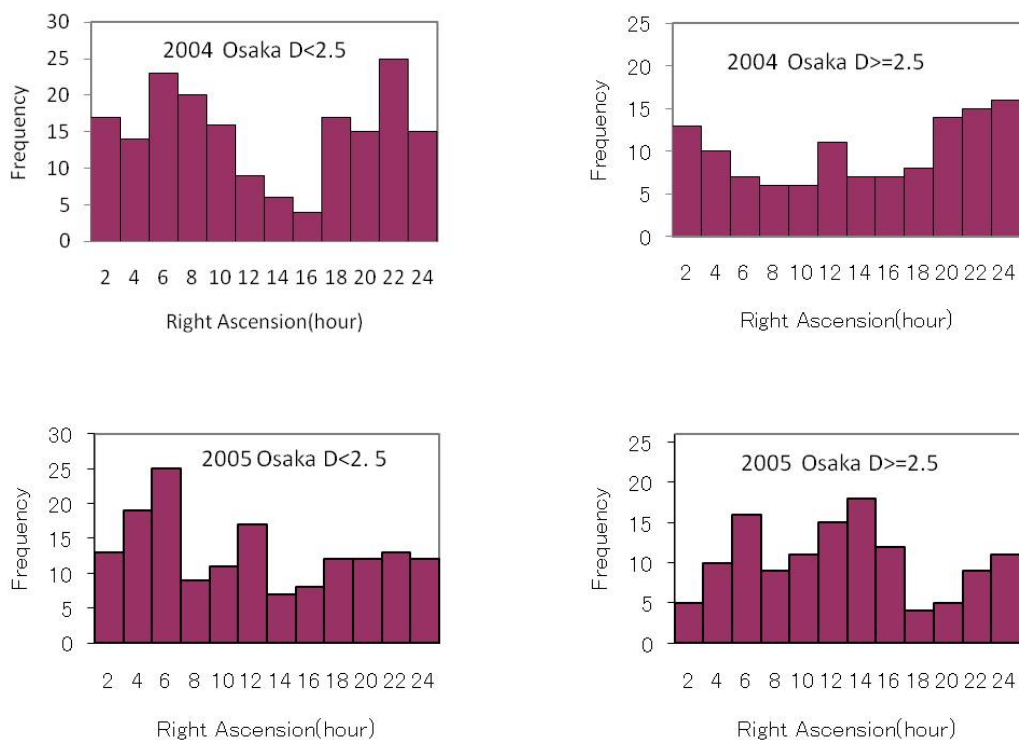
奈良の観測データは、トリガーレートが大阪の約 2/3 で、エネルギー分布も異なることか

らカオスの出現頻度が少なく、近畿大と同様のヒストグラムが得られるのは、年度ごとのデータでフラクタル次元値が2.5より小さい場合のみである。図5にその結果を示す。奈良のデータでも、赤径6h、12h、22h付近にピークが見られる点で大阪と同様の結果が得られた。

近畿大のフラクタル次元値が2.5より小さい場合と比較すると、2005年に12h付近のピークが強く出ていること以外は、定性的な傾向はほぼ一致しているといえよう。

12h付近のピークは、フラクタル次元による違いはあるが、奈良、大阪ともに2005年に顕著にみられる。11km離れた、大阪と奈良での宇宙線カオスのこのようなコインシデンスは、カオスが集団現象である以上当然予想されることである。以前LAASグループで観測された1994年から2000年までの300万イベントについての到来時間間隔時系列カオス解析により、赤径で4h、20hおよび11hの方向に異方性を見出した⁷⁾が今回はエネルギー時系列カオス解析で同様の結果が得られたといえる。

上記のようにカオス性のフィルターをかける事によって、 10^{15} eV付近の一次宇宙線の入射方向に異方性が認められたが、このことはこれらの高エネルギー宇宙線がガンマ線であることの可能性が高く、特定の天体から特定の非線形発生機構を線源として到来し、そのガンマ線ビームの広がり地上で少なくとも11kmを超えたものである。



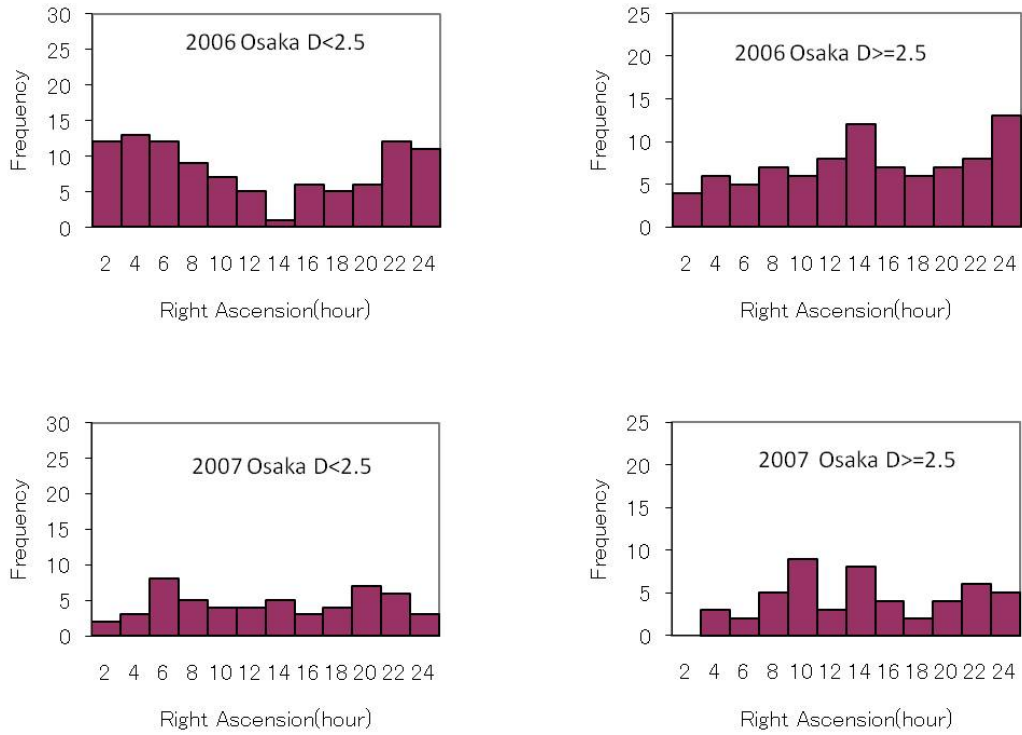


図 3 The right ascension distribution of chaotic air shower events which has the size between 4.0×10^6 and 7.5×10^6 observed in Kinki University from 2004 to 2007.

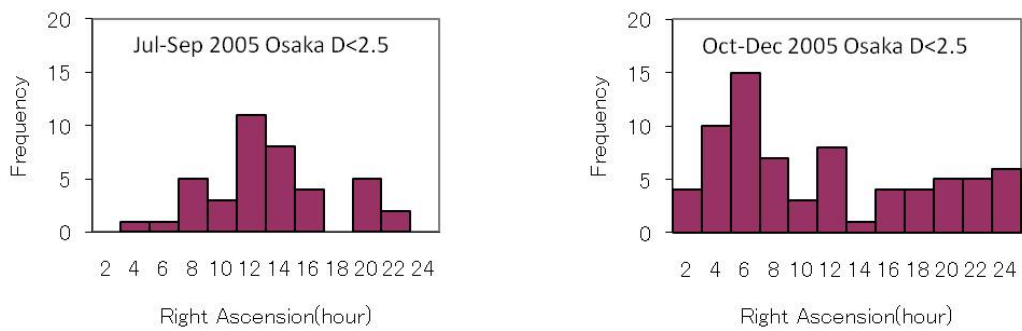


図 4 The right ascension distribution of chaotic air shower events which have size between 4.0×10^6 and 7.5×10^6 observed in Kinki University during 3 months at 2005.

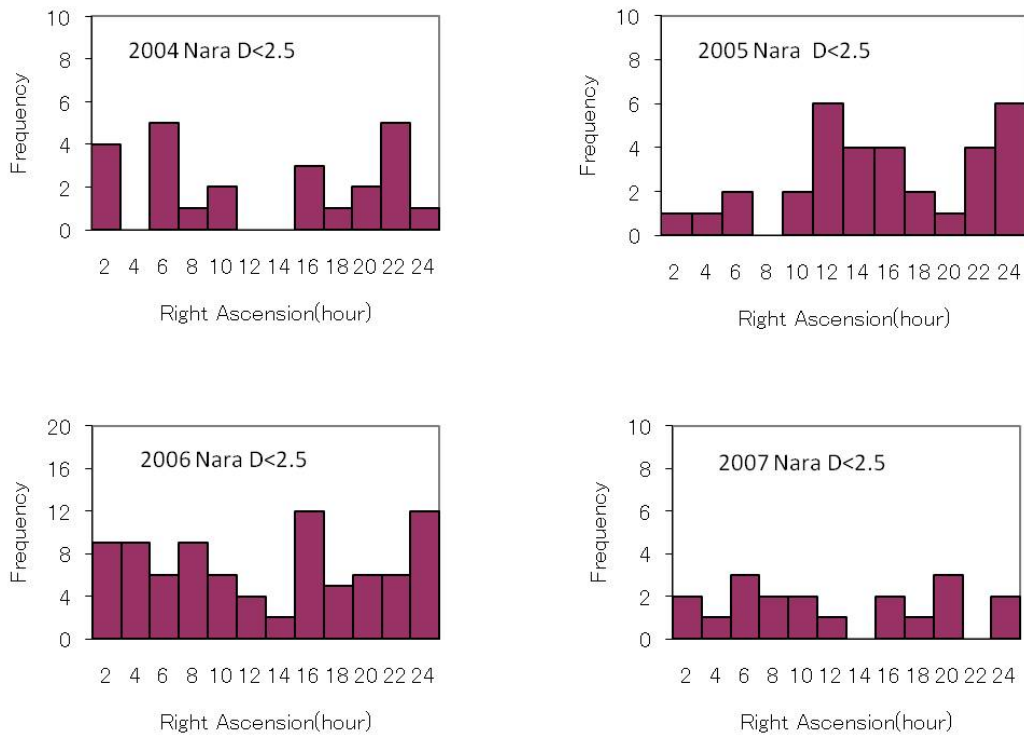


図5 The right ascension distribution of chaotic air shower events whose fractal dimension are less than 2.5 and sizes are between 4.0×10^6 and 7.5×10^6 , observed in Nara-Sangyo University.

第4章 コインシデンス

近畿大学に設置されていた空気シャワーアレイは、2009年度より奈良産業大に移設され、200m離れて2つのアレイが稼動中である。離れた観測地点間で宇宙線の同時観測がどの程度の頻度で起こるかという情報も到来宇宙線の有様を知る重要な要素である。2つのアレイ間での同時観測イベント数は図6に示すように約半年間(2009年1月8日から2009年6月28日)で284イベントであったが(2つのアレイそれぞれ、97320イベントと76960イベント)これは同一イベントの同時観測を意味し 10^{16} eV以上の高エネルギー宇宙線の観測事例である。

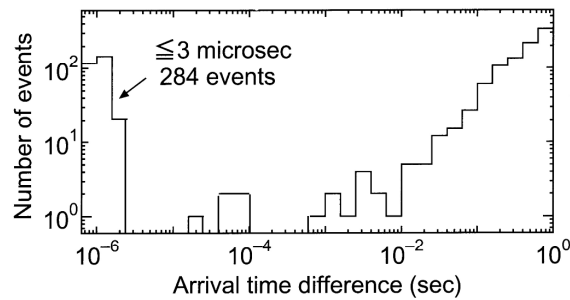


図6 The coincident events between two arrays in Nara-Sangyo University.

LAAS グループとして共同研究を行ってきた弘前大、奈良産業大、岡山大、岡山理科大、近畿大の1996年から2002年の間の観測データについて到来時刻の同期について検討した。総イベント数約611万のうち、いずれか2つの観測地点間での到来時刻が入射角度による到来の遅れも考慮して200マイクロ秒以内で同期していると判断できるイベントを赤径、赤緯の観測精度を勘案して○でプロットしたのが図7である。○の大きさは角度の精度15度を意味している。カオスの異方性で見出された赤径6h付近、12h付近、22h付近への偏りとある程度符合する結果となっている。

611万イベントのうちわずかに5×2イベントが同期していることになるが、大広域にわたって宇宙線が相関をもっていることの証左であり、第3章で述べたカオス宇宙線の振る舞いの近畿大と奈良産業大データ上の類似性と同期性を補完する事実である。

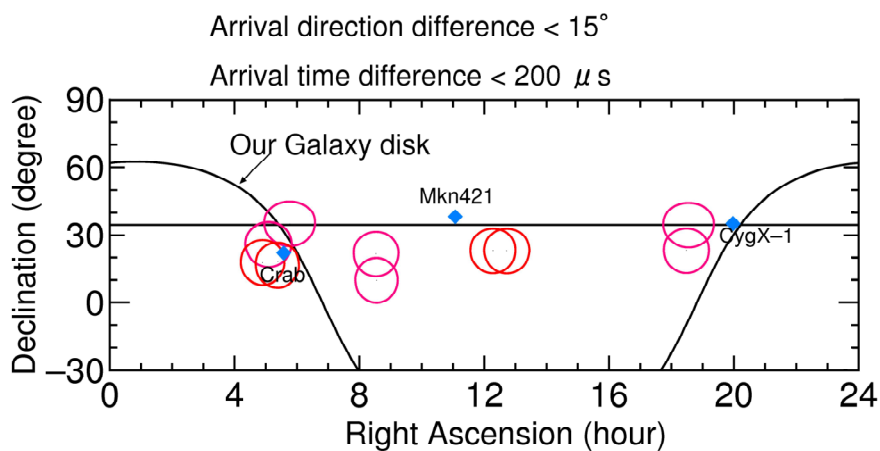


図7 The right ascension and declination distribution of coincidence events observed in LAAS group 5 stations.

第5章 考察

カオス解析のフィルターをかけることによってエネルギー時系列に相関がみられる宇宙線を選び出しさらに空気シャワーサイズで 4.0×10^6 から 7.5×10^6 の範囲のカオスに寄与が大きくノイズの影響を受けにくい宇宙線のみを取り出して、その到来方向の赤径分布を求めると、異方性が得られた。これは、3カ月なり1年間の蓄積データから得られたものであるが、1週間の様な短期間内でのエネルギー時系列(数時間間隔)のカオス性の時間変動データをフーリエ解析に欠けると1.0日の周期性が得られ、その間特定の方向からカオス宇宙線が連続的に到来していることを示すデータとなっている。図8に奈良の2005年3月18日から26日までのサイズ時系列データのカオス性の変動(前論文で述べたカオス解析カーブの傾きの変動)の様子とそのフーリエ解析結果を示す。

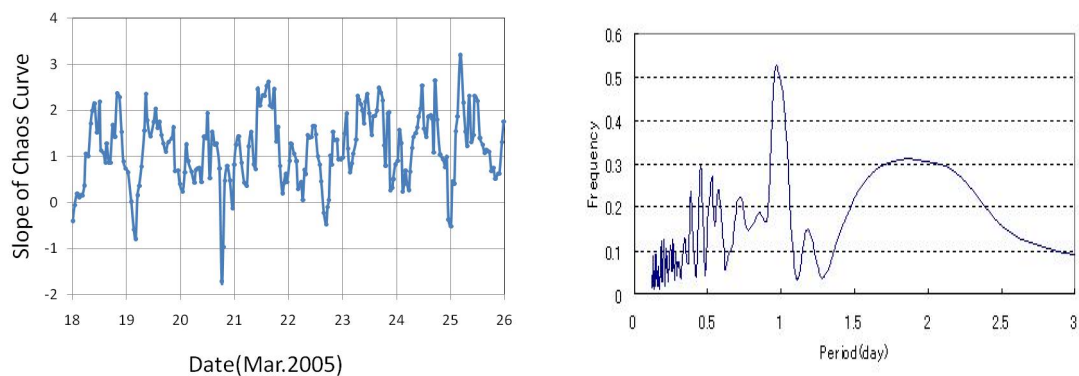


図8 The FFT analysis of the change of chaotic feature on fractal dimension analysis for the energy time series data observed during Mar.18 and Mar.28 2004 at Nara-Sangyo University.

フラクタル次元値が得られたのは、表1に示したように3月18日の時系列データであったが、カオス性そのものはノイズの曇りを受けながらも継続していることがわかる。

10^{15} e V付近のプロトン宇宙線のこの銀河内でのラーモア半径が1 pc程度であることから、特定の方向からプロトン宇宙線の到来を期待するには、太陽系の極めて近傍に暗黒物質を想定し暗黒物質に一時捉えられた宇宙線が、“Turbulent Diffusion¹⁰⁾”や“Fractal Interstellar Medium¹¹⁾”と類似の非線形効果によってカオス宇宙線群となって到来すると仮定する必要がある。最近、衛星による宇宙電子・陽電子の観測では300 GeV付近で陽電子の過剰が見出され、暗黒物質の影響ではないかと推定されている⁵⁾。宇宙の組成の96%を占める暗黒物質の関与も否定はできない。

一方、カオス宇宙線群の主役がプロトンではないと考えるならば、候補として浮上するのは、銀河磁場の影響を受けない高エネルギーガンマ線である。特定の天体から、TeV~PeV領域のカオスガンマ線群が放射されていれば、地上でカオス宇宙線時系列として観測されるチャンスは十分に考えられる。ガンマ線天文学は、近年注目をあびる分野で、2007年の第30回国際宇宙線学会では、175の論文が寄せられている。ASCAやFERMIなどの衛星観測とチェレンコフ光望遠鏡による地上観測によって、「TeVガンマ線ソースカタログ」¹²⁾が作成されるほど多くのガンマ線源が発見されている。ガンマ線源としては、主に3つに分類され、かに星雲に代表されるパルサー、Mrk 421などのAGN（活動銀河核）およびSN1006などの超新星残骸である。いわゆるブレーザーは、活動銀河核のうち特に激しい時間変動を以ってブラックホールからジェットの方にガンマ線を放射する天体である。

ガンマ線の放射機構としては、いずれも荷電粒子の高エネルギー加速機構を前提として、高エネルギー加速電子が強い磁場に巻きつき進行方向が曲げられる際に放出されるシンクロトロン放射、高エネルギー加速電子が強い電場によって加速度を受けた時に発生する制動放射、低エネルギーの背景放射光子に高エネルギー加速電子が衝突によってエネルギーを与えて放射される逆コンプトン放射、高エネルギー加速陽子が原子核と衝突して発生する中性パイオンが崩壊して放射されるガンマ線が理論的に考えられている。高エネルギーガンマ線の放射機構としては、逆コンプトン放射で説明される傾向があるようである。ガンマ線のスペクトルがエネルギーに対して変動するのは高エネルギー側では、逆コンプトン散乱の過程と推定されているので、時間変動に敏感なカオス宇宙線群の発生過程としても逆コンプトンを考えるのが自然である。

Mr k 4 2 1 で X 線領域の複数の帯域で長期間の X 線強度の変動データが観測されている¹³⁾。 10^{15} e V 付近のガンマ線を直接観測することは今のところ困難であるが、10TeV~1PeVのガンマ線がある天体から間欠的に、非線形のエネルギー時系列として放射され、銀河磁場の影響を受けずに地球大気まで到来することは十分に考えられることである。

低次元のフラクタル次元（相関次元）が得られているということは、特定の天体から一定の非線形動力学によって発生した宇宙線のエネルギー時系列であることを裏付けるものである。カオス性をしめす300イベントのすべてがお互いに相関がなければならぬわけではないことは30%以上のノイズ成分を加えても、カオス性が崩されなかった事実が示している⁸⁾。ヒストグラムを作成する際に抽出したのは、 10^{15} e V 付近の宇宙線のみとしたが宇宙線エネルギー時系列の変動の秩序性の度合いであるカオス性に寄与が大きいのは高エネルギー側であるのは当然であり、この付近のエネルギーの宇宙線だけが発生機構上相関をもっているというわけではない。ランダムで発生源の違う宇宙線が混じりあうことによってカオスになるという例はないと考えられるので、たとえばカオスの時系列300イベントのうち少なくとも30%以上の100イベントは非線形発生源を共有する宇宙線である必要があり、それがガンマ線であることは現状他の観測データからは推定が困難であるが、最近の大気蛍光の観測では 10^{19} e Vの宇宙線中のガンマ線の割合の上限値は16%と考えられており¹⁴⁾、より低エネルギー側ではあるが30%を推定することは無謀なわけではない。今回得られたカオス宇宙線ヒストグラムで、赤径6h付近のピークはパルサーのかに星雲（赤径6h、赤緯22度）から到来のガンマ線によるもの、12時付近のピークは活動銀河核のMr k 4 2 1（赤径11h、赤緯38度）から到来のガンマ線によるもの、22時付近のピークは超新星残骸のC y g n u s X - 1（赤径20h、赤緯35度）であると推定することが可能ではないかと考える。前述のように、フラクタル次元値が2.5以上の時系列で赤径12h付近にピークが得られることから、銀河外のMr k 4 2 1でのTeVガンマ線発生過程がより複雑な動力学によるものと推定できる。いままでほとんど観測されていない10TeV~1PeVの領域の天体ガンマ線の存在と宇宙線として特定の天体からの間欠的到來をカオス解析のフィルターを通すことによって間接的に実証できたのではないかと考える。

10TeV~1PeVのエネルギーの宇宙線のうちガンマ線の占める割合が10%以下と考えられるなら、カオス宇宙線の主体はプロトンであり、太陽系からラーモア半径1pc以内のところにダークマターがあり、高エネルギープロトンを非線形に再加速して太陽系に放出する役割を果たしているというような描像を想定しなければカオス宇宙線の存在とその到来方向の異方性は説明できない。

第6章まとめ

自然現象から経済現象まで、一見ランダムにみえる現象を定式化が可能な決定論的非線形現象として説明しようとする試みは近年の多方面でみられる傾向である。社会哲学でよくつかわれる自己組織化という言葉も源を共通にしていると思われる。しかしその基本となるカオス力学はまだ緒に就いたばかりで、ニュートン力学や相対論が宇宙開発に果たす役割や、量子力学が材料開発に果たしている役割の大きさには遠く及ばない。カオスの変動を数学モデルや回路でシミュレーションする研究は進んでいるが、現実のカオス的変動を解析して新たな知見を得る例は少ない。われわれの試みは、宇宙線の研究手法としては異例のものであるが、宇宙線エネルギー時系列を

集団現象と仮定し、小区間ごとに解析のフィルターを掛けることによってカオス性を持った時系列を抽出し、その中のイベントの到来方向に異方性がないかどうかを探求するものである。活動銀河核などの宇宙ジェットが作る衝撃波の乱流場で加速された荷電粒子が宇宙線の直接あるいは間接のソースの一つと考えられるが、加速プロセスが持つ非線形性が地上に到来する宇宙線にも何らかの形で反映するものとする。

探求の結果、赤径で6 h、12 h、22 h付近に偏りがみられ、これらの方向に高エネルギーガンマ線源となる天体が存在し、10 TeV~1 PeVのガンマ線を間欠的ながら数日程度継続して放出していると推定された。カオスとしての時系列内の相関性を保証するためには、少なくとも30%は同一の加速プロセスに関係していなければならず、それらがガンマ線であるのか、それとも数pc以内に存在するダークマターなどの影響で異方性が保たれているプロトンであるのかの検討は今後の課題である。

参考文献

- 1) 川田和正、「チベット水チェレンコフ・ミュオン観測装置計画」、宇宙線研究所研究会資料、2006年8月
- 2) 門多頭司、荻尾彰一、福島正巳他、「地文台によるサイエンス」UAP、2008所収—テレスコープアレイ実験
- 3) 山崎了、馬場彩、日本物理学会誌、Vol.64, No. 3, 2009—銀河宇宙線の起源に迫る「天文学・宇宙物理学の展望と長期計画」：日本学術会議物理学委員会、2010
- 4) 谷森 達、森 正樹、日本物理学会誌、Vol.58, No.6, 2003—TeVガンマ線で探る宇宙線の起源
- 5) 鳥居祥二、日本物理学会誌、Vol.64, No.4, 2009—宇宙線陽電子・電子の過剰で暗黒物質が見える
- 6) 釜江常好、田島宏康、深沢泰司：日本物理学会誌、Vol.65、No.3、2010—フェルミガンマ線宇宙線望遠鏡の初期成果
- 7) LAASグループ (Large Area Air Shower) 弘前大学、奈良産業大学、岡山理科大学などの共同研究グループ、観測装置の一部は科研費の補助を受けている。
S.Ohara, T.Konishi et., al. Chaos in different far-off cosmic rays: a fractal wave model, Journal of Physics G, 29(2003)
T.Konishi and LAAS group, Il Nuovo Cimento C, Vol.24, 2001—Arrival direction of successive air showers.
A.Iyono and LAAS group, 29th International Cosmic Ray Conference Pune(2005), 6, -The Cosmic Ray Anisotropy Observed by the Large Area Air Shower Experiments.
- 8) 大原荘司、小西健陽、向井厚志「宇宙線エネルギー時系列のカオスとその異方性」奈良産業大情報学フォーラム、Vol.6、2009
- 9) P.Grassberger and I.Procaccia, Phys.Rev.Lett.No.50,346,1983
FTakens, Lecture Note in Mathematics edited by D.A.Rand et., al.Springer, 1981, p366—Detecting strange attracters in turbulence.
- 10) J.Candia, E.Roulet and L.N.Epele, astro-ph/0206336
- 11) A.A.Langutin, Yu.A.Nikulin, and V.V.Uchaikin, Nucl.Phys.B, 97, 267(2001)
- 12) <http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/~morim/TeV-catalog/>

- 1 3) T.Takahashi et.,al.The Astrophysical Journal,542:L105-L109,2000
1 4) J.Abraham et.,al. Astroparticle Physics 27(2007)155-168

The Origin of Cosmic ray pursued with Chaos Analysis

S.Ohara, T.Konishi and A.Mukai

Faculty of Informatics, Nara Sangyo University, Nara Japan

Abstract

The Cosmic ray air-shower size data are obtained with Nishimura-Kamata formula from about 1 million air shower data. The time series size data are analyzed by fractal dimension analysis and the chaotic time series group are selected. The high energy events around 10^{15} eV belong to the selected chaotic group have anisotropy of arrival direction,(right ascension), 6h,12h and 22h which may be the direction of pulser Crab, ANG Mrk421 and SNR Cygnus X-1 respectively. They are found recently to be the source of TeV gamma rays by Telescope arrays.

The chaotic cosmic rays are assumed to involve high energy gamma rays radiated intermittently from pulser, ANG and SNR. If it is denied, the chaotic cosmic rays are supposed to consist of high energy protons which are nonlinearly re-accelerated at dark matters within 1pc distance from the solar system.