

空気シャワー観測による 宇宙線研究の歴史

永野元彦

2014/04/09

目次

まえがき	1
第 1 章 空気シャワーの発見	4
1.1 空気シャワー発見にいたるまで.....	4
1.1.1 放射線測定器の開発.....	4
1.1.2 宇宙線起源「シャワー」の観測.....	7
1.2 当時のカスケード理論	8
1.3 空気シャワーの発見.....	9
第 2 章 初期の地表空気シャワーアレイ実験	12
2.1 1950 年代初めの状況.....	12
2.2 1940 年代終わりから 1950 年代始めにかけての GM アレイでの EAS 観測	15
2.2.1 コーネル大学の Echo Lake での実験.....	15
2.2.2 Harwell 地表空気シャワーアレイとチェレンコフ光の観測 (英国)	17
2.2.3 USSR の観測	19
2.3 シンチレーション検出器アレイによる MIT の実験	20
2.3.1 Agassiz 空気シャワー観測装置.....	21
2.3.2 ボリビアでの実験開始.....	22
2.4 その他のアレイ	23
2.4.1 インド.....	23
2.4.2 ドイツ・キール大学.....	24
2.4.3 オーストラリア・シドニー大学.....	25
第 3 章 日本での地表空気シャワーアレイによる初期の観測	26
3.1 乗鞍宇宙線観測所の創設.....	26
3.2 原子核研究所空気シャワー観測装置.....	27
3.2.1 初期の成果とサイズ・スペクトル	28
3.2.2 自動記録装置の開発と放電箱の発明.....	28
3.2.3 EAS 中の全粒子数 (N_e) とミューオン数 (N_μ) の関係	30
3.2.4 チャカルタヤに始まる地表アレイでの一次ガンマ線探索	30
3.2.5 20 m ² スパーク・チェンバーによる成果	32
3.3 乗鞍観測所における初期の空気シャワー実験	35
3.3.1 大阪市大三宅グループ	35
3.3.2 名古屋大学グループ.....	37
3.3.3 CAOS (Computer Supervised Air Shower Observation System) グループ	39
第 4 章 GZK 上限を超えると推定された宇宙線の観測	41
4.1 Volcano Ranch Array	41

4.2	GZK カットオフ	42
4.3	ハベラ・パーク・アレイ (英国 Leeds 大学)	43
4.4	SUGAR (The Sydney University Giant Air-Shower Recorder)	45
4.5	ヤクーツク・アレイ (ヤクーツクの宇宙物理研究所)	48
4.6	原子核研究所の簡易巨大アレイ (INS-LAS array)	49
第5章	空気シャワーの軌跡の撮像 (蛍光観測法)	51
5.1	蛍光観測法の提案は乗鞍シンポジウム	51
5.2	コーネル大学の軌跡撮像方法の開発	51
5.3	堂平山で世界で初めて空気シャワー軌跡をとらえる	53
5.3.1	堂平山での実験	53
5.3.2	伊豆での実験	55
5.3.3	シドニー大学 SUGAR との連動実験	55
5.4	フライズ・アイ (蠅の目, Fly's Eye, FE)	56
5.4.1	ヴォルカノ・ランチ・アレイとの連動による蛍光法の実証実験	56
5.5	High-Resolution Fly's Eye (HiRes)	59
5.6	蛍光発光効率の測定	64
第6章	明野観測所と AGASA (Akeno Giant Air Shower Array)	67
6.1	明野観測所の設立まで	67
6.2	明野 1 km ² 空気シャワー観測装置	67
6.3	AGASA	71
6.4	次期計画の準備研究	75
6.4.1	Pierre Auger 計画の準備研究	75
6.4.2	Telescope Array の準備研究	76
第7章	チェレンコフ光による空気シャワー観測	78
7.1	チェレンコフ光の発見	78
7.2	空気シャワーからのチェレンコフ光の検出	79
7.3	チェレンコフ光による一次宇宙線エネルギー・スペクトルや組成の決定	80
7.4	チェレンコフ光による一次ガンマ線観測	82
7.4.1	最初の TeV ガンマ線探索実験	82
7.4.2	Mt. Hopkins の直径 10m のガンマ線望遠鏡	83
7.4.3	1980 年初頭の Turning point	85
7.4.4	1985 年頃の ACT (Atmospheric Cherenkov Telescope) とガンマ線観測を目的とした地表アレイ	86
7.4.5	Imaging ACT の登場	86
7.4.6	ガンマ線観測その後	89
第8章	モンテカルロ・シミュレーション技術の発展	90

8.1	グループ毎のモンテカルロ・シミュレーション結果の不一致	90
8.2	シミュレーション技術の進化	91
第9章	knee 領域から 2nd knee 領域へ	95
9.1	当初の一次ガンマ線観測実験以後の BASJE	95
9.2	チベット空気シャワー観測装置(Tibet AS- γ)	98
9.3	KASCADE と KASCADE-Grande	101
9.4	GRAPES-3	104
第10章	水平空気シャワー(Horizontal Air Shower, HAS)	106
10.1	当時の宇宙線ミュオン観測の状況	107
10.1.1	電磁石スペクトロメータによる測定	108
10.1.2	地下実験	108
10.2	HAS の観測	110
10.2.1	東京大学原子核研究所(INS)	110
10.2.2	ドイツ・キール大学	111
10.2.3	明野観測所	112
10.3	宇宙ニュートリノとの関係	113
10.3.1	sub-PeV 宇宙ニュートリノ	114
10.3.2	EeV 宇宙ニュートリノ	115
第11章	電波による空気シャワー観測	117
11.1	空気シャワーからの電波の放出	117
11.2	1960年代の空気シャワーからの電波観測その限界	118
11.3	低周波電波による大シャワーの観測	120
11.4	2000年代の電波観測の復活	122
11.5	新しい観測方法	124
11.5.1	GHz帯(Molecular Bremsstrahlung Radiation)	124
11.5.2	気球搭載電波干渉計での観測	125
第12章	衛星からの最高エネルギー領域宇宙線の観測	127
12.1	衛星からの蛍光観測の提案	127
12.2	超広視野望遠鏡による EUSO(Extreme Universe Space Observatory)	129
12.3	EUSO から JEM EUSO へ	132
第13章	実用には至っていない空気シャワー観測方法	134
13.1	EAS に電波を放射しその反射波をとらえる(Radio Echo 法)	134
13.2	高山の湖で EAS の芯からの水中音響をとらえる(Acoustic 法)	136
	あとがき	138

まえがき

2012 年はヘスによる宇宙線発見 100 年を記念する年で、世界各地の記念講演会で「宇宙線研究の歴史」について語られたり、かつ出版されたりした。私も日本物理学会誌の特集記事の 1 編として、福島正己氏と共著で「大気は絶妙な厚さの検出器」の題目で超高エネルギー宇宙線の上限探索の歴史を執筆し¹、秋の物理学会の講演で「宇宙線観測の歴史」の題目で、空気シャワー、ミューオン・ニュートリノ、一次ガンマ線観測による宇宙線研究の歴史について概観した²。その際多くの貴重な研究について調べたが、ページ数や講演時間の制限で多くを割愛せざるを得なかった。

私が宇宙線研究を始めたのは、東京大学原子核研究所に助手として採用された 1963 年である。その頃には「空気シャワー」による超高エネルギー核相互作用や一次宇宙線の研究には限界が見えていて、宇宙線分野から加速器による素粒子実験や X 線天文学分野に移る研究者が多く、「これから宇宙線で何をやるの？」と問われ、ショックを受けたものである。確かにその後の道のりは険しく、遅々とした歩みであったことは事実である。新しいと思われた「発見」も統計が増すにつれて消えていったものも多い。それらも含めてその歴史を書いておくことは、私の世代に課せられた宿題と思うようになった。しかし私が宇宙線研究を始める前からの膨大な論文の一部しか読むことはできない。従って、私の関心や、自ら係った研究テーマに偏った「空気シャワー観測による宇宙線研究の歴史」となっている。観測装置とその結果を中心に書くことにし、それらの解釈や理論的考察、相互の比較による結論等に関する多くの論文は殆ど割愛した。ご批判や加筆、修正をいただければ幸いである。

宇宙線の発見から 100 年、Greisen, Zatsepin, Kuzmin による宇宙線エネルギーの上限 (GZK カットオフ, 4.2 節参照) の予測から 50 年近く経過して、そのエネルギー・スペクトルに 4×10^{19} eV 近辺にカットオフが存在する³ことが確定されたと言える。宇宙線のエネルギー・スペクトルは、図に示すように 10^{10} eV から 10^{20} eV に至る 10 桁以上のエネルギー領域にわたって、ほぼべき関数で伸びている。 $10^{15.5}$ eV と 10^{19} eV 近辺にわずかなべきの変化が見られるにすぎず、これらのスペクトルの曲がり人間の足の曲がりになぞらえて、50 年前頃から「ひざ」(knee)、「くるぶし」(ankle)と呼ばれてきた。その後 $10^{17.6}$ eV にも曲がりがあることがわかり、これは「第 2 のひざ」と呼ばれる。

宇宙線がどんな天体で加速されているにせよ、一種類の天体加速器でこれ程広範囲のエネルギー領域をカバーするのは難しい。もし全く異なった種類の銀河系内、外の天体での

¹ 永野元彦, 福島正己: 「大気は絶妙な厚さの検出器」, 日本物理学会誌, 67 (2012) 827.

² <http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/JPSGR/2012F/CR100/sympo-CR100-program.html>

³ 2013 年の時点で、カットオフ・エネルギー近辺の組成は確定しておらず、カットオフの成因は確定していない。

加速機構がいくつか寄与しているとしたら、10桁以上のエネルギー領域にわたってエネルギー・スペクトルがなめらかなほぼ一つのべき関数になるのは不思議なことである。

「何故エネルギー・スペクトルはこのようにスムーズなのか？」

「宇宙線のエネルギー・スペクトルは本当に 4×10^{19} eV 近辺のカットオフで終わりか？」

「加速起源でなく、宇宙開闢起源超重粒子の崩壊(Top down)宇宙線は存在しないのか？」

「一次宇宙線の組成はエネルギーと共にどのように変化し、カットオフ・エネルギー近辺の組成は？」

「銀河系内外磁場の影響を受けない超高エネルギー宇宙線の点源や異方性は？」

「加速器エネルギーを超えたエネルギー領域での核相互作用は？」

等、長年にわたって追い求められてきて、なお残る課題である。

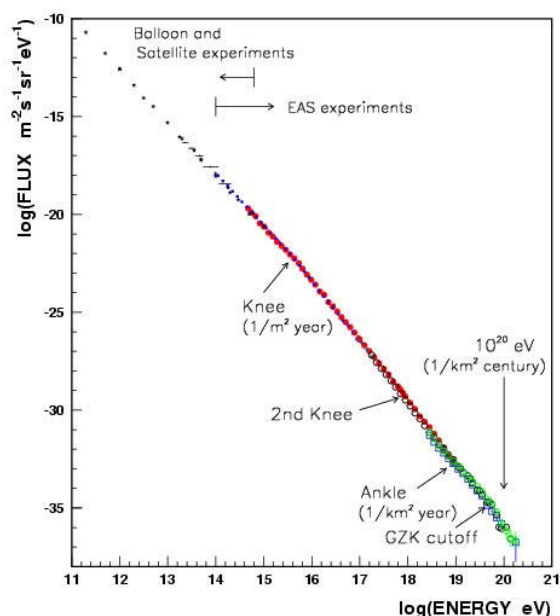


図 一次宇宙線のエネルギー・スペクトラム⁴. Ref.4 の Figure 1 から AGASA の結果を省き、TA の結果⁵を加えたもの

「空気シャワー」の発見から、 10^{20} eV に至る最高エネルギー宇宙線探索を中心とした歴史を回顧するが、最高エネルギー宇宙線探索の詳細については、1999 年頃までの経緯、結果、文献についてワトソン(A.A. Watson)と Review of Modern Physics にまとめた⁶ものや、

⁴ M. Nagano: “Search for the end of the energy spectrum of primary cosmic rays”, New J. Phys., 11 (2009) 065012

⁵ T. Abu-Zayyad et al. (Telescope Array Collaboration): “The Cosmic-Ray Energy Spectrum Observed with the Surface Detector of the Telescope Array Experiment”, Astrophys. J. Lett., 768 (2013) L1.

⁶ M. Nagano and A.A. Watson: “Observations and implications of the ultrahigh-energy

他の多くの Review 論文⁷を参照してほしい。それ以後については HiRes の結果までをまとめた。Pierre Auger Observatory(PAO)や Telescope Array Project(TA)など現在進行中のプロジェクトの当初の経緯は、明野観測所でおこなった準備研究との関連で 6.4 節に簡単に書いたが、詳細な経緯や結果は一つの章として書いていない。後に TA の当事者によってまとめられることを期待するが、前ページに列挙した課題についての最新の結果は、2013 年 7 月に Rio de Janeiro で開催された第 33 回宇宙線国際会議における常定芳基氏の Rapporteur paper を参照いただきたい。

EeV 以上のニュートリノを水平方向(down going)からのシャワーや、地球をかすめて地表から飛び出してつくられる(up going)シャワーとして探索する実験や、電波による空気シャワー観測が進んでいる。第 10 章水平空気シャワー、第 11 章電波による空気シャワー観測の項で最近までの結果に簡単に触れた他、他の章でも過去の実験結果のその後について記す必要上、PAO, TA の数編の論文は参考文献として参照している。

殆どの実験の装置、結果について簡単にしか書けなかった。最近では雑誌のデジタル化が進み、自宅でも昔の論文を読めるようになったので、興味を持たれたら、原論文を読んでもらいたい。私もあやふやや記憶に頼らず、出来るだけ原論文を読むように努力したが、原論文を download 出来ず、abstract しか読めなかったり、abstract も読めず孫引きの論文もある。引用内容が間違っていたらご容赦願いたい。

それぞれの実験には多くの研究者が関与している場合が多い。引用文献には、著者全員の名前と題目を書くようにしたが、実験が大型化するにつれて共著者名が多く、25 名以上の場合、著者名を割愛せざるを得なかった。

cosmic rays”, Rev. Mod. Phys., 72 (2000) 689.

⁷ 2000 年頃までの Review 論文で、この本稿で参照しなかった数編を「あとがき」に列挙してある。最近までの Review は A.Letessier-Selvon and T. Stanev: “Ultrahigh energy cosmic rays”, Rev. Mod. Phys., 83 (2011) 907.

第1章 空気シャワーの発見

1.1 空気シャワー発見にいたるまで

あらゆる発見にはそれ迄に積み重ねられた数多くの実験がある。発見はそれ以前の結果の検討を含めた周到な準備によるところが大であるが、それに幸運や偶然が重なっていることも多い。いずれにせよ後世には発見者の名のみが伝えられ、発見に至る多くの実験が忘れ去られていく。1912年のヘスによる宇宙線の発見⁸ 100年を記念して特集記事がいくつか発刊され、あらためてその発見に至る背景が記述されている。ヴォルターとヴォルフエンデール(M. Walter and A.W. Wolfendale)⁹やカンパートとワトソン(K.H. Kampert and A.A. Watson)¹⁰のレビューは良い参考文献である。これらを参考にし、出来るだけ原論文も参照しながら、空気シャワー発見までの歴史を簡潔にまとめる。

1.1.1 放射線測定器の開発

1912年のヘスによる宇宙線の発見には3台のヴルフ型の検電器が使われた。これは18世紀終わり頃から120年以上使われていた2枚の金箔の開きによる検電器が改良され、2本のmetallizedされた石英ファイバーを使用した検電器である。荷電量により変わる2本のファイバーの開きを、顕微鏡を覗いて測定する根気のいる測定器であった。その後の発展には各種の測定器の発明、開発に依ることが大きい。以下に主な測定器がいつから使われるようになったのかまとめておく。

(1) 霧箱

ウイルソン(C.T.R. Wilson)が「ガス中で電離する粒子の飛跡を可視化する膨張装置(expansion apparatus)とその装置を使って得られた結果」について公表した¹¹のは、ヘスが宇宙線を発見した同じ1912年である。しかし第一次世界大戦などがあり、実際に宇宙線観測に有効に使われたのは、レーニングラードのスコベルツィン(D. Skobelzyn)が最初のような。0.15 Tの磁場中におかれた霧箱で、2本の曲がらない飛跡から20 MeVを超える粒子の存在を1927年に発表している¹²。霧箱は後に陽電子やミューオンなど新粒子の発見に貢献した。

(2) ガイガー・ミュラー計数管

⁸ V.F. Hess: “Über Beobachtungen der durchdringenden Strahlung bei sieben Freiballonfahrten”, Phys. Z., 13 (1912) 1084.

⁹ M. Walter and A.W. Wolfendale: “Early history of cosmic particle physics”, Eur. Phys. J. H, 37 (2012) 323.

¹⁰ K.H. Kampert and A.A. Watson: “Extensive air showers and ultra high-energy cosmic rays: a historical review”, Eur. Phys. J. H, 37 (2012) 359.

¹¹ C.T.R. Wilson: “On an expansion apparatus for making visible the tracks of ionising particles in gases and some results obtained by its use”, Proc. Roy. Soc., 87 (1912) 277.

¹² D. Skobelzyn: “Die Intensitätsverteilung in dem Spektrum der γ -Strahlen von RaC”, Z. Phys., 43 (1927) 354.

1928年にガイガーとミュラー(H. Geiger and W. Müller)が電子計数管(Electron counter tube)と名付けたガイガー・ミュラー計数管を発表した¹³が、それ以前からガイガー独自のガイガー計数管として、その原型の計数管が使われていたようである。この論文の発表後、直径数 cm、長さ 1 m もの大きい装置(以後 GM 計数管)が作られ、同時計数などの電子回路の開発と共に、空気シャワーの発見に威力を発揮した。なお 1950 年頃までの多くの実験論文に、説明なしに「カウンター」が使われたとの記述があるが、1952 年頃からシンチレータと光電子増倍管が使われるまで、説明なしにカウンターと言えば GM 計数管を指すようである。

(3) 同時計数回路

最初に同時計数回路を使った実験をしたのはボーテ(W. Bothe)とガイガーのようである。1925年に2本のGM計数管を使って、コンプトン散乱の散乱光子と反跳電子の同時計数を行った¹⁴。この回路の時間分解能は 1.4 ms で、2本の計数管の同時計数に限られていた。1930年にロッシ(B. Rossi)は、時間分解能が 0.4 ms で、個数にとらわれない複数の同時計数を可能にする回路を開発した¹⁵。20世紀初頭(1904年頃)から開発された二極真空管は電話回線の発展とともに改良が重ねられ、必要に応じた真空管回路の製作が可能となり、ロッシ回路の開発が可能となったと言える。ロッシが1933年に発表した、鉛の厚さに依って3本のGM計数管の同時計数が増えたり減少したりする(Rossi transition curve と呼ばれる)ことを示した実験が有名である¹⁶。

(4) 光電子増倍管 (PMT)

光電子増倍管について最初に書かれた論文は、1935年に米国ニュージャージー州のハリソンにあった RCA(Radio Corporation of America)の研究者により発表されたもの¹⁷らしい。光電面、1段の2次粒子放出ダイノード、コレクターから構成され、8倍の増幅度であった。実用的な secondary emission multiplier(後に photomultiplier と呼ばれる)について発表されたのは、1936年の RCA のツヴォリキン、モルトン、マルター(V.K. Zworykin, G.A. Morton and L. Malter)による¹⁸。しかしそれより前の1933-34年にかけて、ロシアのクベツキー(L.A. Kubetsky)が AG-O-Cs(silver oxide-caesium)を使った多段の円形二次電子発生板と発生電子が集束するように磁石を使った光電子増倍管(図

¹³ H. Geiger and W. Müller: “Elektronenzählrohr zur Messung schwächster Aktivitäten”, *Naturwissenschaften*, 31 (1928) 617.

¹⁴ W. Bothe and H. Geiger: “Über das Wesen des Comptoneffekts; ein experimenteller Beitrag zur Theorie der Strahlung”, *Z. Phys.*, 32 (1925) 639.

¹⁵ B. Rossi: “Method of registering multiple simultaneous impulses of several Geiger’s counters”, *Nature*, 125 (1930) 636.

¹⁶ B. Rossi: “Über die Eigenschaften der durchdringenden Korpuskularstrahlung im Meeresniveau”, *Z. Phys.*, 82 (1933) 151.

¹⁷ H. Iams and B. Salzburg: “The secondary emission phototube”, *Proc. IRE (Proc. of the Institute of Radio Engineers)*, 23 (1935) 55.

¹⁸ V.K. Zworykin, G.A. Morton and L. Malter: “The secondary emission multiplier – a new electronic device”, *Proc. IRE*, 24 (1936) 351.

1-1)を発明したのが世界初と反論されている¹⁹。これはソ連(USSR, 現在のロシア)では「Kubetsky tube」と呼ばれ、千倍から1万倍の増幅度があった。

日本では浜松テレビ株式会社(現浜松ホトニクス)が1953年に光電管を製造開始し、1956年に光電子増倍管の試作を開始、1959年から販売を開始²⁰した。現在は世界中で浜松ホトニクスの製品が使用されている。



図 1-1 世界最初に作られたと云われる光電子増倍管, Kubetsky tube¹⁹

(5) 自動記録装置

宇宙線発見に至る、ヘスやコルヘルスター(W. Kolhörster)による「電荷量の高度変化」の測定は、自ら気球に乗り込み、それぞれ高度 5350 m, 9300 m まで検電器の数値を読み取り成し遂げられた。より高度で観測するには、搭乗者が薄い空気に耐えられるよう対策を施した気球を準備するか、観測データの自動記録が必要である。地上でも長時間の測定を要する実験では自動記録が必要であり、これは物理実験に限らない。しかし何年頃どこで最初に自動記録がなされたかは定かではない。ヴォルターとヴォルフエンデルのレビュー「Early history of cosmic particle physics」⁹によれば、1932年にレジナー(E. Regener)によって地上と高度 30 km までなされた観測²¹で、検電器のファイバーの開きの位置が写真乾板(photographic plate)に自動的に記録されたと書かれている。恐らく初期の自動記録は先ずは写真乾板、次いで GM 計数管とネオン管を接続して、ヒットしたネオン管を写真撮影したものだ。ブラウン管(陰極線管:Cathode Ray Tube)がオシロスコープとして水平掃引され信号が記録できるようになってからは、オシロスコープ画面の写真の自動撮影が主となった。1950年代中頃からデジタル記録装置が開発され、紙テープ、次いでカードに出力する実験が始まった。日本ではパラメトロンを使った空気シャワー自動記録装置が1959年に東京大学原子核研究所で完成した(3.2.2節参照)。

(6) 原子核乾板

臭化銀の細かい結晶をゼラチンの中に分散し浮かべてつくった乳剤(エマルジョン)

¹⁹ B.K. Lubsandorzhev: “On the history of photomultiplier tube invention”, Nucl. Instrum. Methods A, 567 (2006) 236; arXiv: physics/0601139.

²⁰ 浜松ホトニクス・ホームページ

²¹ E. Regener: “Über das Spectrum der Ultrastrahlung”, Z. Phys., 74 (1932) 433.; “Intensity of cosmic radiation in the high atmosphere”, Nature, 130 (1932) 364.

をガラス板に塗ってアルファ線の軌跡を見えるようにしたのは、1950年頃イギリス・ケンブリッジ大学のラザフォード研究室に留学していた日本人の木下季吉である²²。しかし当時の写真感度は低く、宇宙線の観測には1912年に発明されたウイilsonの霧箱が使われ、写真乾板は長い間使われなかった。1940年代になって、感度の高い乳剤を開発し、物理実験に使用したのはイギリスのパウエル(C.F. Powell)のブリストル大学グループで、パイオン²³ばかりでなく新粒子発見に威力を発揮した。特に原子核物理実験に使用される感度の高い写真乾板は原子核乾板と呼ばれる。

1.1.2 宇宙線起源「シャワー」の観測

オージェ(P. Auger)が1938年に150 mもの広がりをもつ空気中で起こっている粒子のシャワー現象の存在を発表した²⁴のが空気シャワー発見とされている。それまでも、数本または多数の粒子が同時に検出器に入り「シャワー」と呼ばれた現象は各所で観測されていた。この節では、「空気シャワー」発見までのローカルな「シャワー」観測の歴史を回顧する。カンパートとワトソンのレビュー¹⁰の他、オージェ²⁴やリンズレー(J. Linsley)²⁵によるレビューが参考になる。

フランスでは、マダム・キュリーの研究所(The Institute of Radium)でスコベルツィン(D. Skobelzyne)によって作られた霧箱による宇宙線観測に1929年にオージェが参加した。霧箱は弱い磁場中におかれ、曲がるトラックの他に真っ直ぐな数本のトラックが観測された。それらは殆どが天頂方向からであったので、非常に高いエネルギーの粒子であると結論づけられた²⁶。

イタリアでは、ロッシ(B. Rossi)が1930年に同時計数回路を開発し¹⁵、鉛の厚さを変えて、その下のGM計数管で3-fold コインシデンスの頻度を計測し、頻度が数10 g/cm²で最大になる、いわゆる「ロッシの遷移曲線(Rossi's transition curve)」を測定し、鉛中で電子数が増大し、最大に達したあと減衰することを示した²⁷。1934年にはイタリアのエイトリ

²² S. Kinoshita: "The Photographic Action of the α -Particles emitted from Radio-Active Substances", Proc. Roy. Soc. London, Ser A, 83 (1910) 432.

²³ G.P.S. Occhialini and C.F. Powell: "Nuclear disintegration produced by slow charged particles of small mass", Nature, 159 (1947) 186.

²⁴ P. Auger: "Experimental Work on Cosmic Rays, Proof of the Very High Energies Carried by Some of the Primary Particles", Early History of Cosmic Ray Studies (ed. by Y. Sekido and H. Elliot, D. Reidel Pub. Co.) (1985) 213.

²⁵ J. Linsley: "Search for the End of the Cosmic Ray Energy Spectrum", in Proc. of Workshop on Observing Giant Cosmic Ray Air Showers from $>10^{20}$ eV Particles from Space, AIP Conf. Proc. No.433 (ed. by J.F. Krizmanic, J.F. Ormes and R.E. Streitmatter, AIP, Woodbury, NY) (1998) p.1

²⁶ P. Auger and M. Skobelzyne: "Sur la nature des rayons ultrapénétrants (rayons cosmiques)", Compt. Rend. Acad. Sci. (Paris), 189 (1929) 55.

²⁷ B. Rossi: "Über die Eigenschaften der durchdringenden Korpuskularstrahlung im Meeresniveau", Phys. Z., 33 (1932) 304.

アで、3 角形の各頂点に GM 計数管を配置し、一辺の距離を離しても同時に粒子が入射する広がったシャワーの存在を発表している²⁸。この原論文を入手していないが、カンパートとワトソンの解説¹⁰によれば、ロッシはこの現象を伊語で'sciame'（英語では'swarm'すなわち大群の意味）と名付けたという。

同じ頃英国のブラケット(P.M.S. Blackett)とオッキアリーニ(G.P.S. Occhialini)は、GM 計数管でトリガーされた霧箱で、高エネルギーの電子が数 cm の金属板を通ると、非常に多数の陽電子・電子がつくられることを示した。そしてこの現象を「シャワー」と名付けた²⁹。

オージェ等はさまざまな配置の GM 計数管アレイや霧箱を用いて、地上のみならず山上や地下 30 m で観測をおこない、シャワー粒子には鉛で吸収される軟成分と透過する硬成分の二成分が存在することを 1935 年から 1936 年にかけての一連の論文で発表している³⁰。水平に離れた GM 計数管で同時計数が測定されたが、偶発同時計数が多く、どこまで広がっているか確認には至らなかった。

1935 年には、ドイツのフォツァー(G. Pfozter)は 3 本の GM 計数管を三層にして、高度 28 km まで上昇させ、その頻度の高度依存性を測定した³¹。その結果気圧約 70~80 mm Hg で頻度が最大となることが示された。この状況はロッシの鉛の厚さで粒子数が変化するロッシの遷移曲線(Rossi's transition curve)と同じ様相で、フォツァー・マキシマム (Pfozter Maximum)と呼ばれる。レジエナー(E. Regener)はこのマキシマムは大気中における電子数の増大によるもので、'Schauer'(英語の shower)と名付けている³²。

1.2 当時のカスケード理論

光子による電子対創成、陰陽電子の輻射によるエネルギー損失や、QED に基づいたそれぞれの断面積などは 1936 年に出版されたハイトラウ(W.Heitler)の「Quantum Theory of Radiation」の初版本³³にすでにまとめられている。

シャワーのカスケード理論は、カールソン(J.F. Carlson)とオッペンハイマー(J.R. Oppenheimer)³⁴およびバーバ(H.J. Bhabha)とハイトラウ(W. Heitler)³⁵により、それぞれ数

²⁸ B. Rossi: "Misure sulla distribuzione angolare di intensita della radiazione penetrante all' Asmara", Supplemento a la Ricerca Scientifica, 1 (1934) 579.

²⁹ P.M.S. Blackett and G.P.S. Occhialini: "Some photographs of the tracks of penetrating radiation", Proc. Roy. Soc. A, 139 (1933) 699.

³⁰ 文献リストは脚注 24 の論文を参照のこと

³¹ G. Pfozter: "Dreifachkoinzidenzen der Ultrastrahlung aus vertikaler Richtung in der Stratosphäre", Z. Phys., 102 (1936) 23. ; E. Regener and G. Pfozter: "Vertical Intensity of Cosmic Rays by Threefold Coincidences in the Stratosphere". Nature, 136 (1935) 718.

³² E. Regener and A. Ehmert: "Über die Schauer der kosmischen Ultrastrahlung in der Stratosphäre", Z. Phys., 111 (1939) 501.

³³ W. Heitler: "The Quantum Theory of Radiation", (Oxford, 1936). 日本語訳になっているハイトラウ著、沢田克郎訳「輻射の量子論」(吉岡書店, 1957)は 1954 年に発刊された第 3 版。

³⁴ J.F. Carlson and J.R. Oppenheimer: "On Multiplicative Showers", Phys. Rev., 51

学的に異なった方法で作られ、共に 1937 年に発表された。電子対創成、電子の輻射、電離損失を考慮して、高エネルギーの電子、陽電子、光子が物質を通るときにおこる遷移曲線が求められ、ロッシの遷移曲線、フォッター・マキシマムなどの説明がなされた。しかし同時に、霧箱中でおこる現象には 2 種類あり、電子、陽電子、光子だけが関与しているシャワーはこのカスケード理論で説明できが、もう一つの重い粒子が関与し、物質に入射しても少ない粒子数しか現れない現象については説明できないことに注意を喚起している。空気中でのカスケードシャワーについて、カールソンとオッペンハイマー³⁴は、「もし 2×10^{14} eV の電子が大気に垂直に入射したら、地上で生き残る 550 MeV 以上の電子数は 0.15 個にすぎない。電子や光子が透過できない厚さでも、シャワーが継続できるよう、ゆっくりと吸収される粒子が存在すると推定される。」と述べている。

ミューオンが発見されるのは同じ 1937 年である。ネッダーマイヤー(S.H. Neddermeyer)とアンダーソン(C.D. Anderson)³⁶とされているが、仁科研究室でも同時期に発見し質量も精度よく測定されている³⁷。この先陣争いの詳細は西村により詳しく書かれている³⁸。

1.3 空気シャワーの発見

1938 年に、1 対の GM 計数管の距離を変えて同時計数頻度の変化(decoherence curve と呼ばれる)を測定した結果が 3 つ報告された。結果のまとめを図 1-2 に示す¹⁰。これらの結果が空気シャワーの発見を導いたが、その発見者の栄光は Auger 等に輝いた。

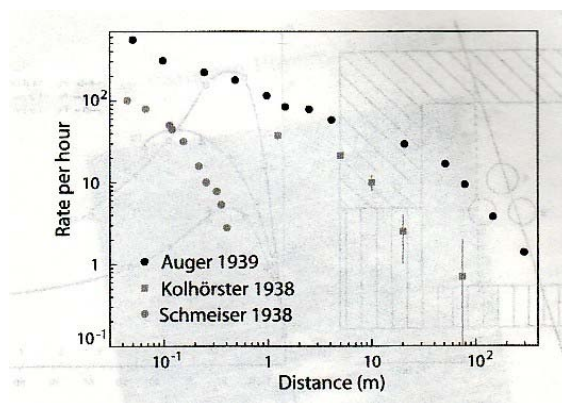


図 1-2 Schmeiser(面積 91 cm^2 の GM, sea level), Kolhörster(面積 430 cm^2 の GM, sea level)と Auger 等(面積 200 cm^2 の GM, 高度 3450 m)の decoherence curve. 文献¹⁰からの転写。それぞれの実験の検出器面積と測定高度は違うことに注意。

(1937) 220.

³⁵ H.J. Bhabha and W. Heitler: “The Passage of Fast Electrons and the Theory of Cosmic Showers”, Proc. Roy. Soc. London, A 159 (1937) 432.

³⁶ S.H. Neddermeyer and C.D. Anderson: “Note on the Nature of the Cosmic-Ray Particles”, Phys. Rev., 51 (1937) 884.

³⁷ Y. Nishina, M. Takeuchi and T. Ichimiya: “On the Nature of Cosmic-Ray Particles”, Phys. Rev., 52 (1937) 1198.

³⁸ 西村純:「我が国における宇宙線研究の始まり」, 日本物理学会誌, 67 (2012) 816.

シュマイザー(K. Schmeiser)とボーテ(W. Bothe)は、室内外でGM計数管を40 cmまで離して同時計数を測定した。明らかにシャワーは空気中からきていることを示し³⁹, それを'Luftschauer(空気シャワー)'と名付けている。測定値が室内外で一致することから, 'Die harten Ultrastrahlschauer(硬い宇宙線シャワー)'とも呼んでいる。論文の受理は1937年12月17日であった。

コルヘルスター(W. Kolhörster)等はGM計数管を室内では10 m, 室外では75 mまで距離を離して同時計数の頻度を測定し⁴⁰, それを'Gekoppelte Höhenstrahlung(連結した高エネルギー線)'と呼んでいる。オージェとは独立に, 明らかに「空気シャワー」を発見している。論文の受理年月日は1938年8月25日であった。

オージェの学生だったメイズ(R. Maze)はGM計数管に有機ガスを混ぜることにより, GM計数管の時間分解能を msec から μ sec に向上させた。メイズは電子回路技術に極めて優れており, ロッシの回路よりかなり時間分解能のよいロジック回路を作成したとのことである。オージェ等はこれらを使用し, GM計数管を150 m離しても雑音の偶発計数を上回る同時計数が存すること, すなわち非常に粒子の広がった拡大シャワー(Grandes Gerbes, Extensive Showers)が存在し, それらの起源は実験室の天井ではなく, 大気上空から発達するシャワーであることを明らかにした⁴¹. 今は「拡大空気シャワー」(Extensive Air Shower, 以後EASと略記)と呼ばれている。GM計数管の計測回路の時間分解能が格段に向上したことが, EAS発見に決定的に寄与した。

当時急速に進展していたカスケード理論による説明に大いに後押しされ, オージェ等は地上ばかりでなく, ピレネー山脈にあるピック・ド・ミディ(高度2990 m), スイスのユングフラウヨッホ(高度3500 m)でも, カウンターを300 mまで離す観測を展開した。この結果は1939年のReviews of Modern Physicsにまとめられている⁴². シャワーの広がり, 鉛による吸収の検出器間隔依存性, 霧箱写真, それらの山上と地上の実験変化などから以下の結論を得た。「シャワーの総粒子数は 10^6 に達する。磁場中におかれた霧箱のトラックから, 少なくとも粒子のエネルギーは空気中でのcritical energyより大きい100 MeV以上として, 地上でのシャワー粒子の総エネルギーは 10^{14} eVである。大気中でのエネルギー損失を考慮すると, 一次宇宙線の大气頂上でのエネルギーは 10^{15} eVを超える。」地上, 山上の一連の観測を経て, 1939年のこの論文には「大气頂上でのエネルギーが 10^{15} eVを超える宇宙線が存在し, それを作る空気シャワーは地上では約 10^4 m²に広がっている。」「その頻度は1分間に1 cm²あたり 10^{-9} 程度であり, エネルギー・スペクトルは E^{-2} である。」¹

³⁹ K. Schmeiser and W. Bothe: "Die harten Ultrastrahlschauer", Ann. Phys., 424 (1938) 161.

⁴⁰ W. Kolhörster, I. Matthes and E. Weber: "Gekoppelte Höhenstrahlen", Naturwissenschaften, 26 (1938) 576.

⁴¹ P. Auger, R. Maze and T. Grivet-Meyer: "Granes gerbes cosmique atmospheriques contenant des corpuscules ultrapenetrant", Compt. Rend. Acad. Sci., 206 (1938) 1721.

⁴² P. Auger, P. Ehrenfest, R. Maze, J. Daudin, R.A. Fréon: "Extensive Cosmic-Ray Showers", Rev. Mod. Phys., 11 (1939) 288.

個の粒子に 10^{15} eV ものエネルギーを与えることを想像することは実際には不可能である。荷電粒子は非常に広がった電場でエネルギーを獲得するのであろう」などの推定も述べている⁴²。広がったシャワーの存在だけでなく、それが大気頂上では 10^{15} eV ものエネルギーをもつ1個の粒子からつくられた「空気シャワー」であることを明らかにしたオージェが、その発見者として名を残すことになったのであろう。

なおその後もオージェは飛行機(高度 7250 m)でもカウンターを 15m 離れた実験を行い、高度変化も詳しく調べた。これらの結果は 1949 年までに数々の論文で発表されており、論文リストを含めてオージェのレビューに書かれている²⁴。

第2章 初期の地表空気シャワーアレイ実験

2.1 1950年代初めの状況

1950年初め頃から空気シャワー観測が本格的に始まったが、それまでに解明されていた宇宙線研究の状況をまとめておく。

(1) 一次宇宙線は電子ではなく殆どは陽子である。

シュテルマー(C. Störmer)⁴³や、ルマントル(G. Lemaitre)とヴァラルタ(M.S. Vallarta)⁴⁴がおこなった荷電粒子の地球双極子磁場中での地磁気効果の計算結果によると、もし一次宇宙線が陽電荷であると、西方から地球に入射するために必要な最低運動量は、東方から入射するために必要な最低運動量より小さくなる⁴⁵。従って西方からの方が東方より入射数が増える。この東西効果について統計的に初めて有意な実験結果を示したのは1933年、ジョンソン(T.H. Johnson)とスチーブンソン(E.C. Stevenson)である⁴⁶。ジョンソンはその後も緯度を変え、高度を変え、検出器を変えて実験を続行し、1939年に一次宇宙線は陽子であるという結論に至った⁴⁷。

1940年にシャイン(M. Schein)等がカウンターの中に4, 6, 8, 10, 12, 18 cmと鉛の厚さを変えた装置と、これから離れたカウンターを配置して気球実験⁴⁸をおこなった。大気上層(2 cmHg-相当)でもPbを透過する粒子数が減らず、鉛板でシャワーが作られないことから、一次宇宙線は陽電子ではなく陽子であるとする説が支持されるようになった。

(2) 一次宇宙線中にC, N, OからFeに至る原子核が陽子の1/1000程度存在する

アルファ線ばかりでなく、陽子も写る原子核乾板に改良したのは1.1.1(6)節で述べたように英国ブリストル大学のパウエルである。原子核乾板は先ず宇宙線の中から新粒子の発見に力を発揮した。1947年にボリビア・チャカルタヤ山で露出された原子核乾板からパイ、ミュー中間子が発見された²³。原子核乾板を気球高度で露出し、一次宇宙線を捕らえる実験が始まったのは同じ1947年頃と推定される。1948年には米国ミネソタ大学のフライアー(P. Freier)達は、高度約27 kmでの原子核乾板と霧箱の観測データから、原子番号40、核

⁴³ C. Störmer: "Periodische Elektronenbahnen im Felde eines Elementarmagneten und ihre Anwendung auf Brüches Modellversuche und auf Eschenhagens Elementarwellen des Erdmagnetismus", Z. Astrophys., 1 (1930) 237.

⁴⁴ G. Lemaitre and M.S. Vallarta: "On compton's latitude effect of cosmic radiation", Phys. Rev., 43 (1933) 87.

⁴⁵ 湯川秀樹, 小林稔, 井上健著: 「宇宙線及び中間子論」(共立出版)(1953) p.15.

⁴⁶ T.H. Johnson and E.C. Stevenson: "The asymmetry of the cosmic radiation at Swarthmore", Phys. Rev., 54 (1933) 125.

⁴⁷ T.H. Johnson: "Evidence that protons are the primary particles of the hard component", Rev. Mod. Phys., 11 (1939) 208.

⁴⁸ M. Schein, W.P. Jesse and E.O. Wollan: "The nature of the primary cosmic radiation and the origin of the mesotron", Phys. Rev., 59 (1941) 615.

子あたり 0.5 GeV の粒子まで観測した⁴⁹。重い原子核の割合は陽子の 1/1000 程度である。

(3) 陽子などの宇宙線が大気中で空気原子核と衝突して多重発生をおこす。

ソ連での初期の実験の目的は、EAS は電子か陽電子によって作られた純粋な電磁カスケードで説明できないようなので、その特性を解明することであった⁵⁰。まずはスコベルツィンにより、1942 年にパミール山で GM 検出器の間隔を 1 km まで広げ、その decoherence curve は純粋な電磁カスケードシャワーと仮定した分布と合わないことが示された⁵¹。1946～1947 年の実験では、鉛やアルミニウムの吸収実験で、EAS には透過成分があり、その成分の割合は EAS の芯から離れるに従って多くなることを示した⁵²。これらや、霧箱による核活性成分(パイオンなどの nuclear active particles)の存在から、ザツェピン(G.T. Zatsepin)⁵³とコッコニー(G. Cocconi)⁵⁴は独立に EAS の核カスケード説を提唱したのが 1949 年である。

米国ではコーネル大学に移ったコッコニー等により、コロラド州の Echo Lake(海拔 3260 m)で 1947 年頃からシャワーの特性を測定する実験がおこなわれた(詳しくは 2.2.1 節参照)。この実験で得られた decoherence curve⁵⁵を使って、藤本陽一、早川幸男は、一次宇宙線は電子では説明できず、核カスケードであることを 1949 年に論じている⁵⁶。しかし直接実験で EAS が核カスケードであることを示したのは、ブランチ(G.M. Branch)とコッコニー(G. Cocconi)が Echo Lake で図 2.1 のような 2 台の霧箱で撮像した現象⁵⁷(1951 年)によると菅は述べ、その写真が掲載されている⁵⁸。

⁴⁹ P. Freier, E.J. Lofgren, E.P. Ney, F. Oppenheimer, H.L. Bradt and B. Peter: "Evidence for heavy nuclei in the primary cosmic radiation", Phys. Rev., 74 (1948) 213 : H.L. Bradt and B. Peters: "Investigation of the Primary Cosmic Radiation with Nuclear Photographic Emulsions", Phys. Rev., 74 (1948) 1828.

⁵⁰ 1940 年代の実験のまとめは、N.A. Dobrotin, G.T. Zatsepin, S.I. Nikol'sky and G.B. Khristiansen: "Interaction of Ultra High Energy Particles with Nucleons and Atomic Nuclei", Nuovo Cimento, Suppl., Vol.III (1956) 635.を参照。

⁵¹ D.V. Skovel'tsyn: Dokl. Akad. Nauk SSSR [Sov. Phys. Dokl], 37 (1942) 16.

⁵² D.M. Alekseev, G.T. Zatsepin and I.G. Morozov: "Distribution of penetrating particles and high energy electrons in extensive atmospheric showers", Dokl. Akad. Nauk SSSR [Sov. Phys. Dokl], 63 (1948) 375.

⁵³ G.T. Zatsepin: Dokl. Akad. Nauk SSSR [Sov. Phys. Dokl], 67 (1949) 993.

⁵⁴ G. Cocconi: "Results and Problems Concerning the Extensive Air Showers", Rev. Mod. Phys., 21 (1949) 26.

⁵⁵ G. Cocconi, V. Cocconi tongiorgi and K. Greisen: "The Lateral Structure of Cosmic-ray Air Showers", Phys. Rev., 76 (1949) 1020.

⁵⁶ Y. Fujimoto and S. Hayakawa: "High Energy Electromagnetic Component in Extensive Air Showers", Prog. Theor. Phys., 4 (1949) 579.

⁵⁷ G.M. Branch and C. Cocconi: "On the Interaction in Pb of the Secondaries Produced in Penetrating Showers", Phys. Rev., 84 (1951) 146 and 147.

⁵⁸ 菅浩一:「空気シャワー(I)」, (宇宙線研究, 武谷三男編, 岩波書店) (1970) 66.

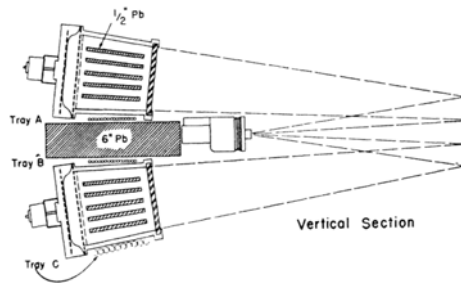


図 2-1 Branch 等が EAS は核カスケードを根幹として発達したものであることを、明確に示した写真を撮るのに使われた霧箱⁵⁷

(4) 発生した π^0 から崩壊したガンマ線が電磁カスケードを発達させる。

中性 π^0 が2個のガンマ線に崩壊することが確認されたのは1950年米国バークレイのシンクロトロンで実施されたシュタインバーガー(J. Steinberger)等の実験であろう⁵⁹。同じ年にカールソン(A.G. Carlson)等は原子核乾板を高度21 kmで露出させ、 π^0 の質量は $(295 \pm 20) m_e$ で寿命は 5×10^{-14} 秒より短いという結論を発表している⁶⁰。しかし西村によると $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ が大気電子成分の源であると提案したのは、1943年の武谷三男だそうである⁶¹。この論文は1943年9月に東京で開催されたメソン・シンポジウムの際配布されたようであるが、戦時中で学会誌には投稿されていない。戦後1948年にやっと出版されている⁶²。

(5) 西村、鎌田の三次元カスケード・シャワー計算に基づく、横広がり分布(NK関数)⁶³。

西村純が三次元電子シャワーの解を得ようと考えた1949年には、 π^0 中間子は実験的に確立しておらず、エネルギーの高い陽子が大気に突入して、多くのハドロンを発生し、その中で数多く発生するガンマ線が電子シャワーをおこし、それらが重なりあったものが空気シャワーだと考えられていた⁶¹。従って空気シャワーは例えハドロンシャワーであっても基本となる正確な三次元電子シャワーの解が必要となる。鎌田甲一をさそって計算がなされ、共同で発表されたが、西村の20代前半の、しかも病気が発症した直後の仕事であった。初めての英語論文だったようで、投稿までの詳しい事情は参考文献⁶¹に詳しい。

⁵⁹ J. Steinberger, W.K.H. Panofsky and J. Steller: "Evidence for the Production of Neutral Mesons by Photons", Phys. Rev., 78 (1950) 802.

⁶⁰ A.G. Carlson, J.E. Hooper and D.T. King: "Nuclear transmutations produced by cosmic-ray particles of great energy – Part V. The neutral mesons". Philo. Mag., 41 (1950) 701.

⁶¹ 西村純:「戦後宇宙線研究の思い出話」(回顧 我国戦後の素粒子・宇宙線研究, 福来正孝編, 東京大学宇宙線研究所) (2012) 149.

⁶² M. Taketani: "On the Neutral Meson", Prog. Theor. Phys., 3 (1948) 349.

⁶³ J. Nishimura and K. Kamata: "The Lateral and Angular Distribution of Cascade Showers", Prog. Theor. Phys., 5 (1950) 899.

(6) 銀河磁場の存在

1950 年代の初頭に本格的な電波天文学がはじまったが⁶⁴, それまでの小規模の観測で銀河系内外の磁場の存在が明らかになっていた⁶⁵. そうだとすれば, 銀河系は有限の大きさだから宇宙線はある程度以上には加速できない. 例え加速できても銀河系内に閉じ込めるエネルギーには限界があるので, 宇宙線のエネルギースペクトルには上限があるだろう. そしてそのエネルギーは 10^{15} eV 程度, 高くとも 10^{16} eV 程度であろうと予測された.

(7) フェルミの統計加速理論

1949 年にフェルミ(E.Fermi)は荷電粒子が分子雲中のプラズマに凍結された磁場と繰り返し衝突することによる「フェルミ加速」を提唱した⁶⁶. この統計加速の理論では, 宇宙線のエネルギースペクトルが冪関数であることが自然に説明できる.

2.2 1940 年代終わりから 1950 年代始めにかけての GM アレイでの EAS 観測

1950 年代に入ると, GM 計数管の小型のアレイを使い, 主として EAS の異方性を探る研究が世界各所で行われた⁶⁷. いずれも一辺が数 m 程度の四辺形や三角形の頂点に GM 計数管を数個配置したもので, 異方性の存在が報告されている結果もあるが, いずれも統計的には不十分である. 当時の結果を総合的に判断すると, 10^{15} eV 以下の EAS の異方性は 1 ~ 2 % 以内で等方的である⁶⁸.

2.2.1 コーネル大学の Echo Lake での実験

コッコーニ(G. Cocconi)は第二次世界大戦中の 1943 年にイタリアの Passo Sella 山(海拔 2,200 m)で, GM 計数管を一辺 3 m の三角形の頂点におき EAS を選び, その中におかれた 3 台の鉛と鉄でシールドされた検出器で観測し, EAS は多くの電子と中間子(meson)のシャワーからなっていることを示した⁶⁹. その後コッコーニは米国コーネル大学のグライセン(K Greisen)のグループに加わり, コロラド州にある Echo Lake(海拔 3260 m)で, 戦後間もない 1947 頃に EAS 実験を再開した⁷⁰. アレイを図 2-2 に示す. 電子密度検出器(E_1, E_2)はそれ

⁶⁴ K. Jansky による銀河中心からの電波の発見は 1932 年であるが, 本格的に電波望遠鏡が建設され観測が始まったのは 1950 年に入ってからである.

⁶⁵ C.W. Allen: *Astrophysical Quantities*, (London) (1955) p.229.

⁶⁶ E. Fermi: "On the origin of the cosmic radiation", *Phys. Rev.*, 75 (1949) 1169.

⁶⁷ 例えば A.L. Hodson: "The Temperature Effect of Extensive Air Showers", *Proc. Phys. Soc. A*, 64 (1951) 1061. ; F.J.M. Fabley and J.R. Storey: "Sidereal Correlation of High - Energy Cosmic Rays", *Nature*, 173 (1954) 445. など.

⁶⁸ T.E. Cranshaw and W. Galbraith: "Time Variations of Extensive Air Showers and the Origin of Cosmic Rays", *Philos. Mag.*, 45 (1954) 1109.

⁶⁹ G. Cocconi, A. Loverdo and V. Tongiorgi: "Penetrating Particles in Air Showers", *Phys. Rev.*, 70 (1946) 852.

⁷⁰ G. Cocconi, V. Cocconi Tongiorgi and K. Greisen: "The Lateral Structure of Cosmic -Ray Air Showers". *Phys. Rev.*, 76 (1949) 1020.

ぞれ 27 本の GM 計数管(総面積 0.88 m²)から成り立っており、何本の GM に粒子がヒットしたかで、粒子密度を決める。C_{1,2,3,4,5}は core selector で、9 cm 鉛の下の 4 本の GM と 2 ~ 4 m 離れたシールドされない GM の 5 fold coincidence でシャワーを選別する(EAS の芯であれば、鉛で増殖し、芯から離れた箇所にも粒子が入る)。ミュオン検出器(M)、霧箱(CL.C)も設置された。記録は GM に接続したネオンバルブの写真撮影でなされている。本格的に 1 個ずつ EAS の特性を測定した世界最初の地表空気シャワーアレイであろう。

この実験で ① 電子の横広がり分布は Coulomb 散乱だけに基づいたモリエール関数⁷³とよく合っている。② コアから一定の距離での透過成分の密度は電子成分に比例し、その割合はコアから離れるに従って増加する。等空気シャワーの基本的特性が測られており、1956 年にグライセンが書いた解説⁷¹にでてくる電子の横広がり分布の実験式は、解説には書いてないが、時期的にこの実験に基づいていると推定される。この式は Nishimura-Kamata の式に良く合致しており、NKG 関数として広く使われている。なお後の解説⁷²には、この式は an empirical analytical function と書かれている。

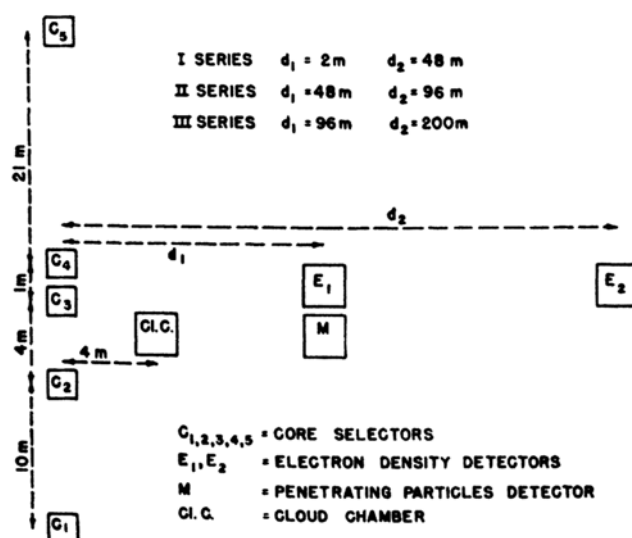


FIG. 1. Arrangement of apparatus in a horizontal plane.

図 2-2 Echo Lake のコーネル大学の空気シャワーアレイ⁷⁰。電子検出器は最大 200 m まで離して観測された。C と書かれたのは鉛の遮蔽の中に検出器がおかれたコア・セレクター、CL.C は霧箱である。

コーネル大学は、1957 年～1959 年に、プラスチック・シンチレータを、半径 40 m, 300

⁷¹ K. Greisen: "The Extensive Air Showers", in Prog. in Cosmic Ray Phys., III, (ed. by J.G. Wilson, North Holland), Chap. I (1956).

⁷² K. Greisen: "Cosmic Ray Showers", Annual Review of Nuclear Science (Annual Review INC.), 10 (1960) 63.

m, 900 m の円状に各 5 台ずつ並べ、到来方向も決めて実験をおこなっている。後で述べる MIT(Massachusetts Institute of Technology)に少し遅れ、日本の原子核研究所(核研)の実験とほぼ同時期であるが、核研に比し規模は極めて小さい。

2.2.2 Harwell 地表空気シャワーアレイとチェレンコフ光の観測 (英国)

広範な範囲に検出器を配置した装置での EAS 観測は、1950 年代始めに、英国の Harwell でも始められた。克蘭ショウ(T.E. Cranshaw)とガルブレイス(W. Galbraith)の地表アレイである⁶⁸。Harwellにある AEE(Atomic Energy Establishment)の敷地内の使われなくなった飛行場の跡地に、当初は(1950~53 年頃か?)一辺が 54 m の四辺形のグリッドに面積 200 cm² の GM 計数管を計 16 個配置し(図 2-3 左)、フォールド数を変えた同時計数の頻度から、4 つのエネルギー領域(>10¹⁶, >2×10¹⁶, >5×10¹⁶, >10¹⁷ eV)にわけ、それぞれの頻度を推定した。EAS の横広がり分布はモリエール(G. Molière)によって理論的に導かれた関数⁷³が使われた。積分エネルギー・スペクトルの形は 10¹⁷ eV まで $R(>E) \propto E^{-1.7}$ で説明できるとしている。EAS の到来方向は決めることは出来ないが、多くは天頂方向からくるとして、太陽時と恒星時での異方性解析をおこない、宇宙線の太陽起源説を否定した。

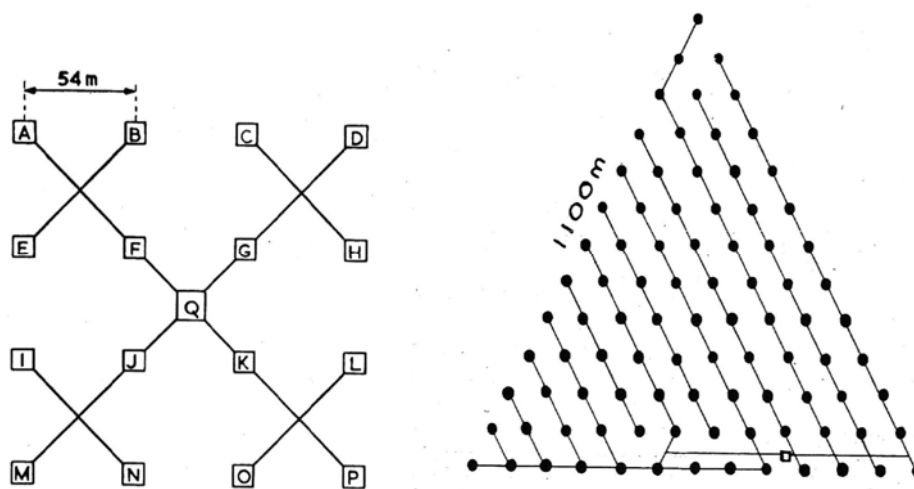


図 2-3 Harwell の GM 計数管アレイ。左は 1950~1954 頃のアレイ⁶⁸で個々の GM の面積は 200 cm², 右は 1955~1957 年のアレイ⁷⁴で 91 台の GM ユニットが設置された。それぞれのユニットは 200 cm² の GM2 個と 15 cm² の GM 1 個。

その後 GM アレイは図 2-3 の右図のように面積が 0.5 km² に拡大され⁷⁴, 1955~57 年に

⁷³ G. Molière: “Cosmic Radiation” (ed. by W. Heisenberg, Dover Publications, New York), (1946) Ch.3.

⁷⁴ T.E. Cranshaw and W. Galbraith: “Observation of Extensive Air Showers, I. Apparatus”, Philos. Mag., 2 (1957) 797.

かけて観測し、結果が報告されている⁷⁵。恒星時の異方性、大気圧変動によるシャワー粒子の吸収特性、トリガーのフォールド数を使って決めたシャワー・サイズの分布、軟成分と硬成分の横広がり分布のコアからの距離 1000 m までの決定などである。軟成分は N-K 関数によく合うことが示されている。

1950 年はじめに銀河磁場の存在が明らかになり、荷電宇宙線は直進できず、荷電粒子の観測では宇宙線源を探索することはできないことが明らかになった。そこで頻度は少ないがガンマ線で探ろうという計画がでてきたのは、英国のジェリー(J.V. Jelley)やアイルランドのポーター(N.A. Porter)等である。1948 年に英国のブラケット(P.M.S. Blackett)は、EAS から発せられるチェレンコフ光は夜光の約 0.01% を占めると推定した⁷⁶。早速ガルブレイスとジェリーが 1952 年から EAS からのチェレンコフ光の観測を試みた⁷⁷。図 2-3 の GM 計数管アレイと、直径 25cm のサーチライトの反射鏡の焦点に直径 5cm の光電子増倍管をおいた光検出器とコインシデンスさせて、観測した光が EAS から発せられたものであることを確認しながら観測した。ノイズの 3 倍の光を観測したが、チェレンコフ光である確証は得られなかった。翌 1953 年に装置を Pic du Midi 山に持っていき、4 台の光検出器と 5 台の GM 計数管トレイ(1 トレイは 4 本の GM 計数管)で同時観測をおこなった。観測された光の偏光とその波長分布はチェレンコフ光とする予測と一致することを示し、そのトリガーの閾値から、空気シャワーのエネルギーは約 10^{14} eV と推定した。

もう一つ忘れてならない成果の一つは、後にハベラパーク実験や、オージェ実験で使われるようになった水タンク検出器の開発がポーター等によってなされたことである¹⁰。水タンクは深さ 92 cm、面積 1.44 m² で、信号は直径 5 インチの光電子増倍管で観測された。サンドイッチボックス用に開発されたダルヴィック(Darvic)と呼ばれるシートを内側に貼ることにより、内側での反射剤としてばかりでなく、浄化していない水でのバクテリアの発生をおさえる効果があることがわかり、EAS の電磁成分のエネルギー密度がシャワー軸から 60 m – 500 m で測定された⁷⁸。長期の観測に耐える検出器として、後にハベラパーク実験の基本検出器に採用され、約 50 年後にオージェプロジェクトで使われることになる。

Harwell の Culham に核融合施設(Culham Fusion Laboratories)が建設されることになり、Harwell 空気シャワー観測装置は 1958 年に停止され、英国での研究はハベラパーク(4.3 節)に引き継がれることになる。

⁷⁵ T.E. Cranshaw, W. Galbraith, N.A. Porter, J. De Beer and M. Hillas: “Harwell Air Shower Experiment”, Nuovo Cimento, 8 Suppl. (1958) 567.

⁷⁶ P.M.S. Blackett: “A possible contribution to the night sky from the Cerenkov radiation emitted by cosmic rays”, Proc. of Int. Conf. on the Emission Spectra of the Night Sky and Aurorae held at London in 1947, (1948) 34.

⁷⁷ W. Galbraith and J.V. Jelley: “Light Pulses from the Night Sky associated with Cosmic Rays”, Nature, 171 (1953) 349; J. Atmos. Terr. Phys., 6 (1955) 250. and 6 (1955) 304.

⁷⁸ N.A. Porter, T.E. Cranshaw, J.F. De Beer, A.G. Parham and A.C. Shenwood: “Observations on extensive air showers VII. The lateral distribution of energy in the electron-photon component”, Philos. Mag., 3 (1958) 836.

2.2.3 USSR の観測

USSR で 1940 年代初期になされた、「EAS は核カスケードである」との結論に至る実験については 2.1(3)節で述べた。レーニングラードのスコベルツィンが 1927 年に磁場中での霧箱を使い、曲がらないエネルギーの高い(>20 MeV)粒子を捕らえたが、彼は第二次世界大戦中もレベデフ物理研究所のドブローチン (N.A. Dobrotin) , ザツェツピン(G.T. Zatsepin), ニコルスキー(S.I. Nikolskij)や、モスクウ州立大学のヴェルノフ(S.N. Vernov) やクリスチャンゼン(G.B. Kristiansen)などの研究継続を奨励したという¹⁰。観測は 1945 年から中央アジアのパミール山(Pamirs 3860 m)とモスクウ大学で始まった。

主たる目的は、大量の GM 計数管、電離箱カロリメータ、霧箱を動員した、EAS 中のエネルギー・フロー、ミューオンの割合、核活性成分(nuclear active particles)の理解であり、1940 年代の成果の一部については 2.1(3)節で述べた。

パミール山で一つ一つシャワーを記録するカウンターアレイが作られたのは、英国の Harwell のアレイとほぼ同時期の 1950 年である。“correlated hodoscope”と名付けられ、それぞれのカウンターはネオンランプと接続され、ヒットした GM 計数管とそれに接続されたネオンランプが点灯する。その写真が記録された。アレイは有効面積を拡大しながら 1954 年まで行われたが、1952 年時でのアレイを図 2-4 に示す⁵⁰。

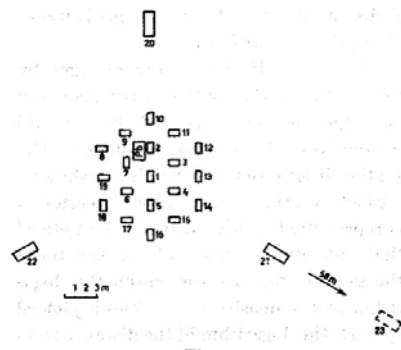


図 2-4 パミール実験のカウンター・アレイ⁵⁰。実験は 1950 年から 1954 年までおこなわれたが、図は 1952 年時での配置。

カウンター・アレイは、23 箇所にそれぞれ約 48 本の GM 計数管を配置したものから成っている。このアレイで電子成分、核活性成分、ミューオンの横広がり分布をサイズ別で求め、モスクウ大学で行われた同様の実験結果を合わせ、核反応について以下のような結果を得た⁵⁰。

- ① 核反応有効断面積は測られている最高エネルギーまで幾何学的断面積に近い。
- ② 多重度はエネルギー(E)に依存し $E^{0.25}$ で増大する。
- ③ 重心系では、二次粒子は等方的でなく、前後方向に集中的に放出される。
- ④ 一次宇宙線が空気核と衝突すると、そのエネルギーの大半は一個ないし、数個の粒

子に集中して放出される。

パミール実験と同じ頃からモスクワ州立大学でもクリスチャンセン(G.B. Khristiansen)等は地表に GM 計数管による地表空気シャワーアレイと、地下鉄を利用したミュオン検出器を作り実験を開始した。シャワー・サイズ・スペクトルが 8×10^5 で曲がることを示した。すなわちスペクトルに折れ曲がりがあることを 1959 年に発表した⁷⁹。高度の違う実験などを加えて、シャワー・カーブを推定し、その積分(track-integral method)からエネルギーを推定した。

エネルギー・スペクトルの傾きが約 3×10^{15} eV で急になることは、他のほぼ同時期の実験でも次々に明らかにされ、その成因が、一次宇宙線の核相互作用の変化、加速の限界、銀河系からの漏れ出しなどの論争が始まる。

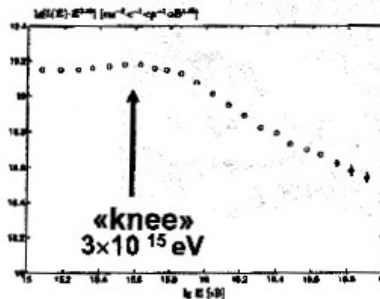


図 2-5 Kulikov と Khristiansen によるサイズ・スペクトル⁷⁹からエネルギー・スペクトルに変換したもの。Panasyuk のレビュー⁸⁰から転載。

1960 年代初めに、USSR の EAS 研究の中心は、パミールから、より近代的な設備がととのっている、アルマータに近いティエン・シャン(Tien Shan 3340 m)の研究所に移っていった。

2.3 シンチレーション検出器アレイによる MIT の実験

1950 年頃には、2.2 節で述べたような各種の実験で、 10^{17} eV を超える宇宙線の存在は推定されていたが、GM 計数管アレイでは到来方向は決まらず、粒子数もヒットした計数管の割合から算定するので、粒子数が多いと正確な数は算出できず、大サイズになる程その決定精度は悪かった。個々の宇宙線の到来方向を決め、上限に至るまでエネルギー・スペクトラムを精度よく観測しようと大がかりな実験を考えたのが MIT のロッシ(B. Rossi)のグループである。初めてシンチレータと光電子増倍管を使う画期的な実験であった。

ロッシ・グループのウィリアムス(R.W. Williams)は、1947 年にそれまで使われていた

⁷⁹ G.V. Kulikov and G.B. Khristiansen: “On the size spectrum of extensive air showers”, J. Exp. Theor. Phys., 35 (1959) 635.

⁸⁰ M.I. Panasyuk: “Cosmic ray physics in space: the role of Sergey Vernov’s scientific school”, Astrophys. Space Sci. Trans., 7 (2011) 151.

GMではなく、4台の電離箱のアレイを米国コロラド州のエヴァンス山に配置し、シャワー毎にその中心と粒子数の横広がり分布を決め、シャワーの総粒子数(サイズ)を決める方法を開発した⁸¹。この装置で、モリエールの横広がり分布関数⁷³を用いて、総粒子数 10^8 、エネルギーで 4×10^{16} eVの宇宙線の存在を示した。同グループは液体シンチレータを開発し、当時では立ち上がりの速い光電子増倍管(RCA5819)を使い、EASの前面はフラットでその厚さは1~2 mであることを示し、検出器への粒子の入射時間の差から、シャワーの到来方向が決まる(Fast timing法)ことを示した⁸²のが1953年である。

2.3.1 Agassiz 空気シャワー観測装置

これらの成果を合体し、1955年から1957年にかけて、ボストンのハーバード大学のアガシス(Agassiz)の森でEAS観測がおこなわれた⁸³。この装置の開発と建設には小田稔が貢献した。1 m²の液体トルエンシンチレータの検出器を15台、直径約500mの円内に並べ、検出器への到達時間差から、EASの到来方向を決める方法や、コアの位置をいろいろ変えて粒子数の分布がスムーズになるようにして中心と全粒子数の決定が、当初はアナログコンピュータを開発して使用された。なおこのトルエン液体シンチレータは小田の日本への帰国後森の中で発火したため、大型プラスチックシンチレータが開発され、1956年に置き換えられた。

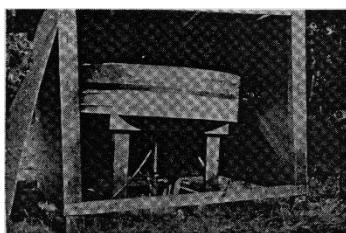


図 2-6 小田稔により製作された、1 m²の液体トルエン・シンチレータの検出器⁸⁴。その後のシンチレーション検出器の原型である。

EASの総粒子数決定にはサンプリングされた粒子数分布から、あらかじめ決められた関数に一番良くフィットさせることによりシャワーの中心と総粒子数を決める。この関数として西村-鎌田によるカスケード理論(NK関数)⁶³が大いに貢献した。このアガシスの観測で、

⁸¹ R.W. Williams: "The Structure of the Large Cosmic-Ray Air Showers", Phys. Rev., 74 (1948) 1689.

⁸² P. Bassi, G. Clark and B. Rossi: "Distribution of Arrival Times of Air Shower Particles", Phys. Rev., 92 (1953) 441.

⁸³ G.W. Clark, J. Earl, W.L. Kraushaar, J. Linsley, B.B. Rossi and F. Scherb: "An Experiment on Air Showers Produced by High-Energy Cosmic Rays", Nature, 180 (1957) 353.

⁸⁴ 小田稔: 「BASJEの発端と菅さん」, ICR-報告-79-89-10 (1989) 2.

図 2-7 に示す 5×10^{18} eV のエネルギーの宇宙線が観測された⁸⁵.

アガシス空気シャワー観測装置で開発された基本的手法は今日にいたる世界各所に設置された地表粒子検出器アレイによる空気シャワー観測と解析の基本となっている。

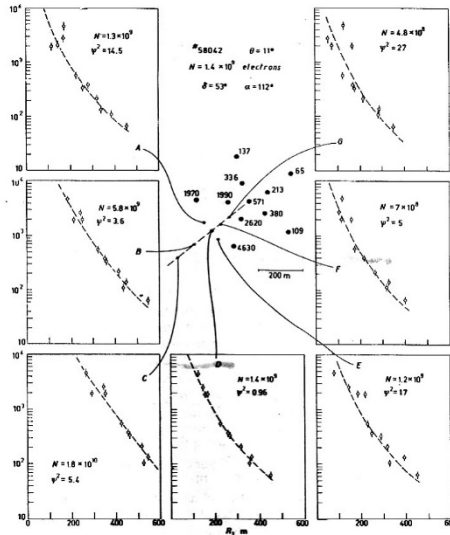


図 2-7 Agassiz 空気シャワー観測装置で観測された最大エネルギーのシャワー。図中央の●が検出器の位置で、それぞれの横に観測された粒子数が数字で示されている。当初はアナログ・コンピュータで、芯の位置をいろいろ変えて、それぞれの横広がり分布に対する誤差を求め、誤差が最小となる芯の位置とサイズを決定した⁸⁶。

2.3.2 ポリビアでの実験開始

MIT の装置は、1958 年にポリビアのエスコバル(I. Escobar)やハーシル(J. Hersil)の協力を得て、ポリビア・ラパスの空港近くのアルチ・プラノ(海拔 4200 m)に移された。この高度でサイズ 3×10^7 のシャワーはその発達が最大に達することが示された⁸⁷。当初の主目的は異方性の観測であったが、異方性は観測されなかった⁸⁸。この実験についてはクラーク(G.W. Clark)のレビュー⁸⁶に詳しい。

⁸⁵ G.W. Clark, J. Earl, W.L. Kraushaar, J. Linsley, B.B. Rossi, F. Scherb and D. Scott.: "Cosmic-Ray Air Showers at Sea Level", Phys. Rev., 122 (1961) 637.

⁸⁶ G.W. Clark: "Experimental Work on Cosmic Rays Proof of the Very High Energies Carried by Some of the Primary Particles", Early History of Cosmic Ray Studies (Y. Sekido and H. Elliot eds., D. Reidel Pub. Co.) (1985) 239.

⁸⁷ J. Hersil, I. Escobar, D. Scott, G.W. Clark and S. Olbert.: "Observations of Extensive Air Showers near the Maximum of Their Longitudinal Development", Phys. Rev. Lett., 6 (1961) 22.

⁸⁸ G. Clark: "Arrival Directions of Cosmic-Ray Air Showers in the Northern Sky", Phys. Rev., 108 (1957) 450.

1959年に、日本の原子核研究所、MIT、ボリビア共同でボリビア・チャカルタヤ山(海拔5200 m)で一次ガンマ線の観測をすることが決まった。菅浩一が1959年にMITに行き、ミューオン検出用の4 m²のシンチレーション検出器を15台準備した。これらをチャカルタヤ山に運び、600トンのガレナを積み上げ、その下に設置した。アルチ・プラノの空気シャワーアレイはチャカルタヤ山に移動され、1962年から観測が開始された。BASJE (Bolivian Air Shower Joint Experiment) の開始であるが、詳しくは3.2.4節で述べる。

2.4 その他のアレイ

MIT実験に引き続いて、他の国でもEAS実験が開始されている。日本の実験は3章でまとめるとして、他の国の実験を一瞥しておく。

2.4.1 インド

インドでの最初のEAS観測は、MITのクラークがインド・アーメダバードのサラバイ(V. Sarabhai)等とKodaikanal(海拔2034 m, 北緯10°)に小さなシンチレーション検出器アレイを設置しておこなった実験である。MITの観測では10¹⁴ eVで全く異方性が観測されなかった結果⁸⁸を得て、クラークはすぐに赤道直下での異方性観測を思いついたのだから、恐らく1958年頃から観測を開始したのであろう。緯度-30°から+50°からくるサイズ10⁵以下の10万個のシャワーから、到来方向に異方性が観測されなかったことを1960年に発表した⁸⁹。

1960年頃からタタ研究所のスリーカンタン(B.V. Sreekantan)等が超高エネルギー核相互作用を調べる目的で、ウータカムンド(Ootacamund)に地表アレイを設置し実験を開始している⁹⁰。

同じ頃、大阪市大の三宅三郎はインド金鉱を利用したミューオンのエネルギースペクトルの測定をタタ研究所のメノン(M.G.K. Menon)やナラシムハム(V.S. Narasimham)等と計画し、デカン高原にある世界で最深の鉱山であるコラ金鉱で観測を開始した⁹¹。この金鉱のミューオン検出器と地表アレイとの同時観測により、EAS中の高エネルギー・ミューオン(220 GeV, 680 GeV)を観測するために、原子核研究所の俣野恒夫がタタ研究所と協力して1964年頃より実験をおこなった⁹²。

⁸⁹ E.V. Chitnis, V.A. Sarabai and G. Clark: "Arrival Directions of Cosmic-Ray Air Showers from the Equatorial Sky", *Phys. Rev.*, 119 (1960) 1085.

⁹⁰ B.V. Sreekantan: "Extensive air shower studies of the TIFR (Bombay) group", *Proc. 8th ICRC, Jaipur* (1963) 143.

⁹¹ S. Miyake, V.S. Narasimham and P.V. Ramanamurthy: "Intensity of Mu-Mesons of Depths Greater than 2000 m.w.e.", *J. Phys. Soc. Japan, Suppl. AIII* (1962) 318.

⁹² B.K. Chatterjee, S. Lal, T. Matano, G.T. Murthy, S. Naranan, K. Sivaprasad, B.V. Sreekantan, M.V. Srinivasa Rao and P.R. Vishwanath: "Ultra-high energy muons (>200 GeV) in extensive air showers", *Proc. 9th ICRC, London, 2* (1965) 627.

2.4.2 ドイツ・キール大学

ドイツのキール市には、第二次世界大戦中に作られた厚さ 2 m のコンクリートでできた極めて堅牢な防空施設（ブunker）がある。当時キール大学にいて、後にヨーロッパの X 線天文学を牽引したトルンパー（J. Trümper）や、ベーム（E. Böhm）等は 1960 年代になって、ブunkerの上や周囲にシンチレーション検出器を配置して EAS 観測を開始した。ブunkerの上の木造小屋に 31 m² のネオンホドスコープ、厚いコンクリートの下にミュオンと核活性成分用シンチレーション検出器をおき、EAS の芯の微細構造を観測するのが主目的である。また別のグループであるアルコフアー（O.C. Allkofer）等によりブunkerの中に電磁石スペクトログラフが置かれ、水平方向からのミュオンのエネルギー・スペクトルと陰陽の荷電比の測定がなされた。

図 2-8 にキール大学空気シャワー・アレイの検出器配置図を示す。右側の大きな四角がブunkerで、その上にネオンホドスコープが設置されている。検出器、回路系は当時としては極めて近代的であり、詳細は文献を参照されたい⁹³。

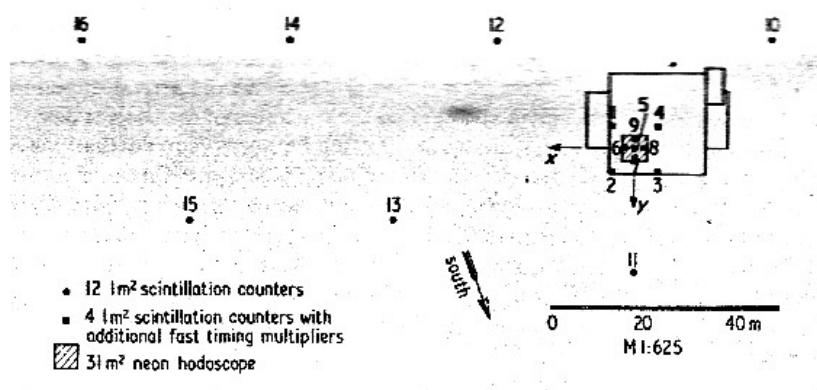


図 2-8 Kiel 大学の空気シャワーアレイ⁹³。コンクリートの厚さ 2 m のブunkerの上に面積 31 m² のネオンホドスコープがおかれ、下の天井にミュオン検出器がはりつけられている。これらで EAS の芯を観測するのが特徴。

当時、シドニー大学(2.4.3 節参照)や大阪市大(3.5.1 節参照)では格子状に密に並べたシンチレーション検出器アレイで、原子核研究所(3.2.5 節参照)ではスパークチェンバーで、EAS の中心から離れて小さなシャワー(サブコア)が存在する事象が観測され、その解釈や、頻度が大きく異なっていた。キール大学では、ネオンホドスコープによるサブコアの殆どは建物の木製の天井や梁の中で 100 GeV 相当のハドロンがつくるバーストであることを示した。他の実験で報告されている大きな横運動量(p_t)を持つサブコアは空気中で作られた電磁シャワーと解釈して解析したため、梁で作られないサブコアの p_t 分布は平均 p_t 分布の裾で

⁹³ E. Böhm, U.J. Roose, R. Staubert and J. Trümper: “Die digitale registriersystem des luftschauerexperiments in Kiel”, Nucl. Instrum. Methods, 40 (1966) 67 と 73.

説明できるとした⁹⁴。この実験は他の実験に、天井の構造物でつくられるサブコアを注意深く排除すべく注意を促した。1970年からブンカーの壁にシンチレーション検出器をはりつけて、水平方向からくるシャワーによるミュオンの研究がおこなわれた(10.2.2節参照)。

1983年にドイツのキール大学グループにより、Cyg X-3方向から約 10^{15} eV領域のガンマ線の観測が発表された(7.4.3節参照)が、それはこの装置による1973年から1980年にかけての観測を解析した結果である。

2.4.3 オーストラリア・シドニー大学

ブレナン(M.H. Brennan)等は、シドニー大学構内に、GMアレイと到来方向を決める4台を含め、合計9台の液体シンチレーション検出器を配置し、1957年からEAS観測を始めた⁹⁵。主として空気シャワーの横広がり分布や芯の決め方を論じている。後にオーストラリアのVLBI電波天文学を牽引した一人ジャンシー(D.L. Jauncey)も加わり⁹⁶、このアレイと連動してチェレンコフ光を観測し、その広がりが、電子のクーロン散乱の広がりで説明できるとしている⁹⁷。

マッカスカー(C.B.A. McCusker)等は1950年代終わり頃、約 $15\text{ m} \times 50\text{ m}$ の領域に、3本のGM計数管(それぞれ 16.1 cm^2)からなるユニットを約80個格子状にならべ、このアレイの端に、64個の 41 cm 四方のシンチレーション検出器を 6×8 台の格子状にぎっしり並べ、EASの芯の微細構造を調べる実験をおこなった⁹⁸。1953年以前にハイネマン(R.E. Heinemann)とヘーゼン(W.E. Hazen)が小さな電離箱アレイ実験によって見つけた複数の芯があるシャワーの存在⁹⁹を確かめるためであった。多くの複数芯や中心の密度分布がフラットなシャワーを観測し、一つの芯と複数芯のシャワー数の比(R)のサイズ依存性を調べた。核相互作用で放出される π^0 では複数芯は作れず、複数芯の原因は一次宇宙線の組成にあると結論づけた。サイズ 10^6 まで、Rは低エネルギーで求められている一次宇宙線の陽子と重い核の比と同じで、 10^6 以上でこの比は大きくなる。この事から 3×10^{15} eVのkneeで重い核の割合が増大するとの結果である⁹⁸。

⁹⁴ M. Samorski, R. Staubert, J. Trümper, E. Böhm, W. Büscher and R. Fritze: “An Analysis of Electron Density Fluctuations in Air Shower Cores and the Question of Large Transverse Momenta”, Z. Phys., 230 (1970) 1.

⁹⁵ M.H. Brennan, D.D. Millar and C.S. Wallace: ‘Air showers of size greater than 10^5 ptls; (I) core location and shower size determination’, Nature, 182 (1958) 905.

⁹⁶ R. Clay: private communication (2012/12/21).

⁹⁷ C.B.A. McCusker: “Extensive air shower work in Australia”, J. Phys. Soc. Japan, 17, Suppl.A-III (1962) 293.

⁹⁸ A.D. Bray, D.F. Crawford, D.L. Jauncey, C.B.A. McCusker, P.C. Poole, M.H. Rathgeber, J. Ulrichs, R.H. Wand, M.M. Winn and A. Ueda: “The detailed structure of air shower cores”, Nuovo Cimento, 32 (1964) 827.

⁹⁹ R.E. Heinemann and W.E. Hazen: “The Density Distribution within Two Meters of Large Air Shower Axes”, Phys. Rev., 90 (1953) 496.

第3章 日本での地表空気シャワーアレイによる初期の観測

日本で宇宙線研究が始まったのは1931年頃開設された理研の仁科研究室である。第二次世界大戦前後の宇宙線研究の成果や、乗鞍観測所開設に至る歴史は、石井千尋，中川重雄，渡瀬譲，皆川理，関戸弥太郎，宮崎友喜雄，武谷三男の座談会¹⁰⁰，西村純による解説³⁸を参照されたい。

3.1 乗鞍宇宙線観測所の創設¹⁰¹

1949年に朝日新聞社の第1回学術奨励金が大阪市大渡瀬譲，神戸大皆川理，名古屋大関戸弥太郎，理化学研究所を代表とする研究者に贈呈され，乗鞍に木造の15坪の観測室が建てられ（通称「朝日の小屋」で，実験室は7坪），1950年9月から神戸大学，名古屋大学，理研グループの観測が開始された。大阪市大グループは1948年頃から乗鞍豊平にあった陸軍が高層医学研究のために建てた「陸軍の小屋」で実験をしていたが，1950年には朝日の小屋より数倍大きい「大阪市大の小屋」が別に建てられ，観測がおこなわれた¹⁰⁰。主たる研究目的は，高圧水素霧箱を使って宇宙線中の核子と水素原子核である陽子との相互作用，パラフィンと炭素を霧箱に入れて差し引き法での陽子の相互作用の研究，大型マグネット霧箱による新粒子の探索，宇宙線強度の連続観測などであった。

この乗鞍には多くの若い研究者が集まり，大盛況だったようで，1953年には乗鞍宇宙線観測所が東大付置で設置された。同年に湯川秀樹のノーベル賞を記念して設置された京大基礎物理学研究所と同じく，全国共同利用研究所の第1号である。しかし1953年には米国のブルックヘブン研究所で3 GeVのコスモトロン加速器が動き出し，新粒子探索，核子-核子反応などの研究は加速器実験に移り，乗鞍観測所の研究は，霧箱によるEAS中の核子成分の測定，大型エマルジョン・チェンバーによる超高エネルギー現象，太陽フレアにともなう高速中性子，宇宙線強度の連続観測などに移っていった¹⁰²。

EAS実験として先ずおこなわれたのは，鎌田，前田等によるEAS中の電子成分のエネルギー・スペクトルの測定である¹⁰³。GM計数管，イオン・チェンバー，小型霧箱が使われた。1955年には，菅，田中，三谷により，EAS中の核子成分のエネルギー・スペクトルの測定が中型霧箱，計数管ホドスコープを使ってなされている¹⁰⁴。

¹⁰⁰ 石井千尋他：座談会「切り開いてきた道」，宇宙線研究(武谷三男編，岩波書店，(1970) 1.

¹⁰¹ 近藤一郎：「乗鞍宇宙線観測所」，月刊フィジクス「宇宙線」(海洋出版株式会社) 8 (1979)207.

¹⁰² 月刊フィジクス「宇宙線」(海洋出版株式会社) 8 (1979)に，日本における宇宙線研究の初期について，石井千尋，宮崎友喜雄，関戸弥太郎，皆川理，中川重雄，尾崎誠之助により書かれている。

¹⁰³ 日本での空気シャワー研究の始まりや，1970年頃までの研究のまとめについて，菅浩一：「空気シャワー(I)」(宇宙線研究. 武谷三男編，岩波書店) (1970)に詳しい。

¹⁰⁴ Y. Tanaka, K. Suga and S. Mitani: "The Energy Spectrum of Nucleons in the Air Shower", J. Phys. Soc. Japan, 12 (1957) 215.

ただし日本で最初の EAS 実験は、菅によれば¹⁰³、地上で藤岡によって 1950 年頃からなされた EAS 中の電子、ミューオン、核子成分の横分布の測定である¹⁰⁵。

3.2 原子核研究所空気シャワー観測装置

1956 年全国共同利用研究所として東京大学に原子核研究所が附置され、宇宙線研究を目的とする空気シャワー部とエマルジョン部が発足した。空気シャワー部は、MIT の装置の開発と建設に貢献した小田稔や、三浦功、菅浩一等が中心となり、加速器の及ばないエネルギー領域での高エネルギー核現象の解明を主目的とする空気シャワー観測装置を設置した。MIT のアガシスの実験に少しの遅れをとったが、技術的には極めて斬新なもので、当時世界で最も精度の高い総合的な EAS 装置であった。

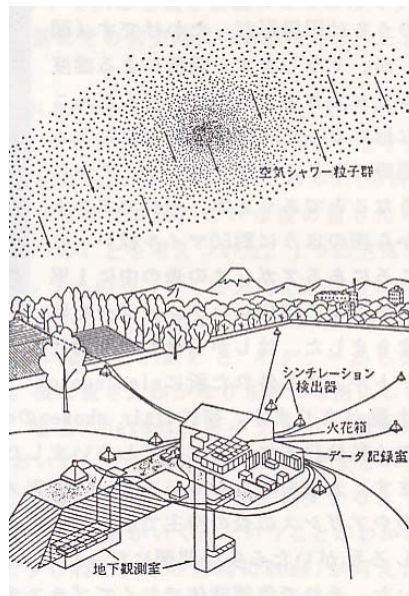


図 3-1 原子核研究所の空気シャワーアレイの概観図⁸⁴

核相互作用の解明のために、① EAS の中心部の詳細な観測、② 電磁成分、ミューオン、核活性成分、エネルギー流のシャワー毎の変動の測定に主力がおかれた。そのためプラスチック・シンチレータの地表アレイ¹⁰⁶、到来方向を決定するためのクロノトロン法による Fast timing 装置¹⁰⁷のほかに、EAS の中心部を見るために直径 2 cm のネオン管を(2 m × 3.5 m)の面積に敷き詰めたネオンホドスコープ、直径 50 cm 高さ 30 cm の鉛ガラスで出来

¹⁰⁵ G. Fujioka: Int. Conf. Theor. Phys., Japan (1953) 125 ; “The Lateral Distribution of Various Components in Extensive Air Showers at Sea Level”, J. Phys. Soc. Japan, 10 (1955) 245.

¹⁰⁶ 検出器あたりの粒子数を 0 から 10^5 まで記録するために、対数増幅器が開発された。M.F. Crouch, T. Matano, I. Miura, M. Oda, K. Suga, G. Tanahashi and Y. Tanaka: “A logarithmic representation of phototube output”, INSJ-8 (1958).

¹⁰⁷ 俣野恒夫, 三浦功, 小田稔, 菅浩一, 棚橋五郎, 田中靖郎: 「空気シャワーの角度測定のコロトロン」日本物理学会年会講演予稿集, (1957-10-16) 19K-25.

たエネルギー・フロー測定器¹⁰⁸, 鉛とシンチレーターを交互に5層重ねたトランジション・チェンバー, 地下15mと5mにそれぞれ8 m²のミュオン検出器などが設置された。

3.2.1 初期の成果とサイズ・スペクトル

装置は1959年初めに完成し, 当初の3ヶ月間の観測結果が1960年に発表された報告に詳しく述べられている¹⁰⁹。電磁成分, ミュオン成分, 核活性成分, エネルギーフローの横広がり分布(lateral distribution)がシャワー毎に測定され, 特にシャワー中心部でその変動が大きいことが示された。後述するように EAS 中の全粒子数(N_e)とミュオン数(N_μ)の関係が提示され, これらの関係から一次宇宙線の衝突平均自由行程(collision mean free path)やシャワー粒子数の平均減衰長(attenuation length of the number of particles)を推定, 一次宇宙線の組成の推定方法を提案している。

一次宇宙線のエネルギー・スペクトルを反映するサイズ・スペクトルは, サイズ(5~10) $\times 10^5$ 近辺で明確に折れ曲がりを観測し, それまで GM 計数管アレイで測定されていたモスクウ大学のクリコフとクリスチャンセンの結果(2.2.3 節参照)⁷⁹ や, 乗鞍で小型のアレイで測定されていた三宅等¹¹⁰や亀田等¹¹¹の結果を確認した。

3.2.2 自動記録装置の開発と放電箱の発明

データの記録は当初はオッシロスコープに記録し, 画面を写真撮影して読み取っていたが, 1959年にはパラメトロンを使った空気シャワー自動記録装置が完成した¹¹²。この装置では, 光電子増倍管からの信号が対数増幅され, そのパルス高 V は $\log V$ に比例したパルス幅に変換される。このパルス幅を50倍に広げ, そのパルス幅を当時発明されたばかりのパラメトロンの変調サイクル数で数え, デジタル化され, データは紙テープに出力された。この装置は1966年にトランジスター化された。

1961年に原子核研究所ではパラメトロンを使った電子計算機(INS-I)が開発され¹¹³, デジタル化された EAS データはこの計算機で解析されるようになった。この計算機はパラメト

¹⁰⁸ T. Matano, I. Miura, M. Oda, K. Suga, G. Tanahashi and Y. Tanaka: "Total absorption Cerenkov detectors and a measurement of energy flow in the extensive air shower", INSJ-9 (1958).

¹⁰⁹ S. Fukui, H. Hasegawa, T. Matano, I. Miura, M. Oda, K. Suga, G. Tanahashi and Y. Tanaka: "A study on the structure of the extensive air shower", Prog. Theor. Phys., Suppl. 16 (1960) 1.

¹¹⁰ S. Miyake, K. Hinotani, T. Kaneko and I. Katsumata: "An Experimental Study of Extensive Air Showers", J. Phys. Soc. Japan, 13 (1958) 782.

¹¹¹ T. Kameda, Y. Toyoda and T. Maeda: "On the Electron Component of Extensive Air Showers near the Axis", J. Phys. Soc. Japan, 15 (1960) 1565.

¹¹² 三浦功, 柴田進吉, 鎌田甲一, 佐々木不可止: 「空気シャワーの自動記録装置」日本物理学会年会講演予稿集, (1959-10-8) 11a-B-12..

¹¹³ 林巖雄, 三浦功, 大塚昌雄, 佐藤之康, 柴田進吉: 「INS-I型計算機説明書(I)」(原子核研究所) (1961).

ロン約 9000 個が使用され、励振周波数は 2.007 Mc である。記憶容量は長語 512 語、短語 1024 語であった。西村・鎌田(NK)関数をグライセンが使い易い形にまとめた NKG 関数⁷¹にフィットさせて、EAS の中心とサイズを決めるプログラムがこの少ない容量内で書かれたことは驚きである。

EAS の芯を微細に観測する目的で、直径 1 cm のネオン管を前より大きな面積に敷き詰めたネオンホドスコープで観測したところ、2 つの芯がある EAS が観測されたり、2~3 m² の面積にわたって、「ぞうりむし」のような形にネオン管がびっしり点灯する奇妙な事象が観測され、結果は 1961 年に京都で開催された国際会議で発表され注目を浴びた¹¹⁴。

より分解能をあげる目的で発明されたのが、福井崇時と宮本重徳によるスパークチェンバー(放電箱)である¹¹⁵。これは 1959 年に当初 Discharge chamber として発表されたが、その後スパークチェンバーとして、宇宙線観測のみならず、高エネルギー加速器実験、衛星でのガンマ線観測など、それぞれの目的に合うよう改良されて発展している。放電箱の 1970 年頃までの発展について、福井、宮本による詳しい解説を参照されたい¹¹⁶。

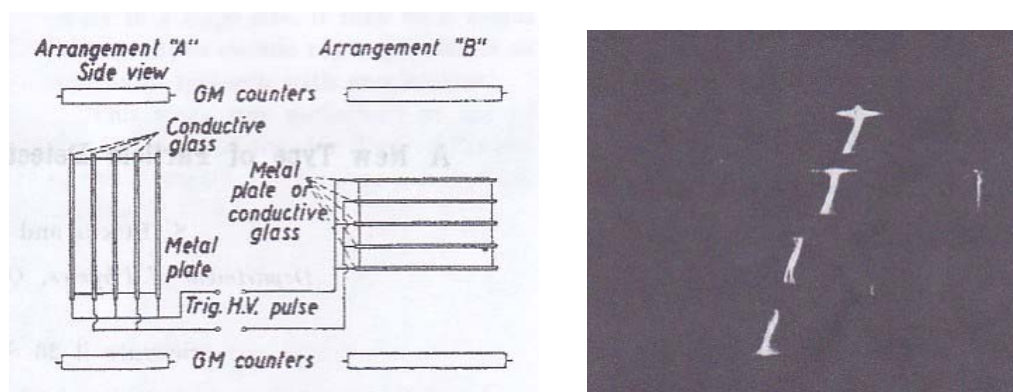


図 3-2 福井，宮本による Discharge chamber の回路と撮像されたミューオンの飛跡¹¹⁵

¹¹⁴ M. Oda and Y. Tanaka: “Fine Structure of the Core of Extensive Air Showers”, J. Phys. Soc. Japan, 17 Suppl. AIII (1962)282.

¹¹⁵ S. Fukui and S. Miyamoto: “A New Type of Particle Detector: the Discharge Chamber”, Nuovo Cimento, XI (1959) 113; “The Discharge Chamber and Its Characteristics”, J. Phys. Soc. Japan, 16 (1961) 2574.

¹¹⁶ 福井崇時，宮本重徳：「放電箱」，(宇宙線研究，武谷三男編，岩波書店) (1970) 236.

3.2.3 EAS 中の全粒子数 (N_e) とミューオン数 (N_μ) の関係

EAS を解析しながら、小田、菅、長谷川等によってモデル的に EAS 中の全粒子数 (N_e) とミューオン数 (N_μ) の関係が描かれた。図 3-3 左はその概念図⁸⁴で、右が初めて発表された N_e - N_μ ダイアグラムの観測結果¹⁰⁹で、核研空気シャワー装置が稼働して約 20 日間のデータである。このダイアグラムの解析から、核研ばかりでなく、以後 Akeno, AGASA, KASCADE などから多くの結果が発表されている。

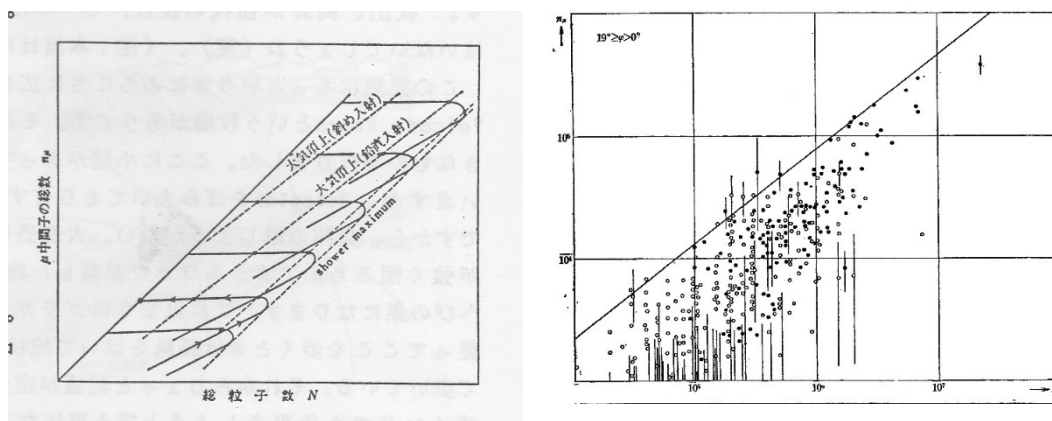


図 3-3 N_e - N_μ ダイアグラムの概念図(左)⁸⁴。右は最初に発表された約 20 日間の実験結果¹⁰⁹。印の違いは EAS の選択条件の違い。

この図をよく見ると、シャワーマキシマムになると N_μ は減らないが N_e は減る。多くのエネルギーのカーブが描かれるので、同じ (N_e , N_μ) の組合せのところでは、EAS のシャワーマキシマムに達する以前を見ているのか、以後をみているのかかわかわからない。わかるためには、シャワーマキシマムとなる非常に高い高度で観測をしなければならない。また、もし一次宇宙線に鉄などの重い原子核が存在すれば、陽子を親とするシャワーに比べミューオンが多いシャワー (μ rich shower) となり、一次ガンマ線が存在すれば、電磁カスケードなのでミューオンが極端に少ないシャワー (μ less shower) になる筈である。との議論がなされた⁸⁴。

1952 年に早川¹¹⁷により、宇宙線が銀河系内を伝播中に星間物質と核相互作用をおこし、発生した π^0 が崩壊して出来るガンマ線の存在が提唱され、高山でこの宇宙起源ガンマ線を観測しようとする気運が高まった。

3.2.4 チャカルタヤに始まる地表アレイでの一次ガンマ線探索

1959 年のモスクーの宇宙線国際会議で、菅浩一が中心になり、原子核研究所, MIT, ボリビアのサン・アンドレ大学が共同でボリビアのチャカルタヤ山上(高度 5200 m)でガンマ

¹¹⁷ S. Hayakawa: "Propagation of the Cosmic Radiation through Interstellar Space", Prog. Theor. Phys., 8 (1952) 571.

線探索実験をおこなうことが決まった。日本では、小田、菅等が当時の茅東大総長に直接陳情に行き、概算要求もせず、年度途中で異例の速さで予算を獲得されたとのことである⁸⁴。直ちに菅は MIT でミュオン検出器を準備し¹¹⁸、1960 年からチャカルタヤ山のボリビア宇宙線観測所で、村上一昭も加わり、60 m²のミュオン検出器を設置した。気圧が海面高度の半分しかない山上で、人力で 600 トンの吸収層(コンクリート 132 g/cm²の上に PbS 鉱石 165 g/cm²と鉛 23 g/cm²)を設置する苦労は想像を絶する重労働だったそうである。MIT のアガシスから移動してエルアルトに設置してあった EAS 観測装置を山上に移動し(2.3.2 節参照), Bolivian Air Shower Joint Experiment(BASJE)の初代の装置が完成した¹¹⁹。

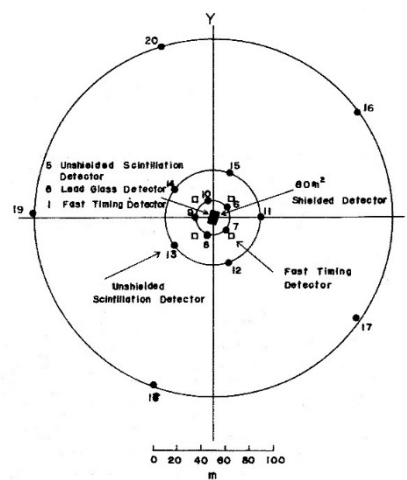
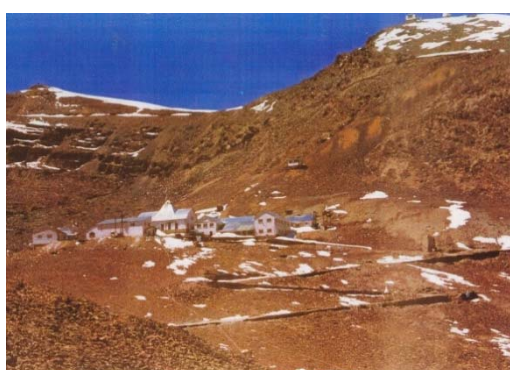


図 3-4 チャカルタヤ宇宙線観測所と BASJE 空気シャワーアレイ。1962 年のスタート時、検出器は半径 40 m の円内に配置されたが、1964 年に半径 150 m の円上に追加され、記録も自動化された¹²⁰。

60 m²のミュオン検出器のまわりに 20 台のシンチレーション検出器(各 0.9 m²)と 5 台の FT(Fast Timing)検出器、7 台の鉛ガラスのエネルギーフロー検出器から成り、1962 年初頭から一次ガンマ線観測が開始された。開始当初は、粒子数密度や FT データはオシロスコープに記録され、信号の目盛を読みとって到来方向やサイズを決める大変な作業であったが、1964 年に記録は自動記録化され、5 台のシンチレーション検出器が半径 150 m の円上に追加された(図 3-4 右の配置図)。観測を始めてすぐに、シャワーサイズ $5 \times 10^5 \sim 5 \times 10^6$ で、ミュオンと電子数の比が小さい一群のシャワーが観測され(図 3-5 左)、それらの μ less シャワーの赤経分布は $200^\circ \sim 220^\circ$ 方向に増大が観測された(等方分布の期待値 8.8

¹¹⁸ K. Suga, G. Clark and I. Escobar: "Scintillation Detector of 4-m² Area and Transistorized Amplifier with Logarithmic Response", Rev. Sci. Instr., 32 (1961) 1187.
¹¹⁹ K. Suga, I. Escobar, G. Clark, W. Hazen, A. Hendel and K. Murakami: "Bolivian Air Shower Joint Experiment", J. Phys. Soc. Japan, 17 Suppl. A-III (1962) 128.
¹²⁰ BASJE 実験の歴史的経過については、金子達之助他:「ボリヴィア空気シャワー実験、研究経過・成果と現在および将来計画(1988 年 3 月)」, 東京大学宇宙線研究所, (1988).

事象に対し、21 事象. 図 3-5 右). 5 年間のデータで、選択条件を厳しくし、 4σ の増大が観測されたが¹²¹, 核相互作用の変動による μ less シャワーとの決定的な判別はつかず、一次ガンマ線であるとの結論には至らなかった.

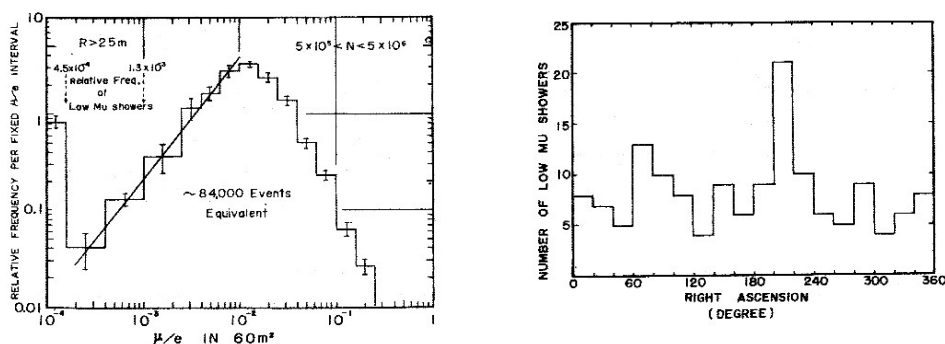


図 3-5 ミューオン検出器で観測された μ とその上の電磁成分 e の粒子数比をパラメータとしたシャワー分布(左)¹²¹. 全シャワーから μ/e 比の小さいシャワー順に 0.1% のシャワーを選別した到来方向の赤経分布(右)¹²²

しかし 5200 m の高度は 10^{14} eV から 10^{16} eV の EAS 発達 of 最大に相当し、このエネルギー領域での一次宇宙線エネルギースペクトルや、傾いたシャワーから大気中のシャワーカーブの決定、一次陽子の生き残りの観測による陽子-空気核非弾性衝突断面積の決定、チェレンコフ光との同時観測による組成の研究に成果をあげ、観測目的を変えながら、今日まで高山を利用した研究が継続されている。これらの詳細は 9.1 節参照。

3.2.5 20 m² スパーク・チェンバーによる成果

原子核研究所では、ネオンガスを 50 cm × 50 cm × 2.5 cm のガラス箱に密封し、長期にわたり使用できるスパーク・チェンバーが開発され¹²³, 面積 20 m² にしきつめて 1964 年から 1970 年頃まで EAS の中心部(芯またはコアと呼ばれる)の観測がおこなわれた。

(1) 超高エネルギー核反応における大横運動量

EAS のコアは変化に富んでおり、コアが一つばかりでなく、二個、三個以上のコアの存在は核研のネオン・ホドスコープ¹¹⁴ の他、大阪市大の乗鞍宇宙線観測所の大型霧箱¹²⁴, シ

¹²¹ K. Kamata, S. Shibata, O. Saavedra, V. Domingo, K. Suga, Y. Toyoda, K. Murakami, M. LaPointe, J. Gaebler and I. Escobar: "Predominantly electromagnetic air showers of energy 10^{14} eV to 10^{16} eV", Can. J. Phys., 46 (1968) S72,

¹²² Y. Toyoda, K. Suga, K. Murakami, H. Hasegawa, S. Shibata, V. Domingo, I. Escobar, K. Kamata, H. Bradt, G. Clark and M. La Pointe: "Studies of primary cosmic rays in the energy region 10^{14} to 10^{17} eV", Proc. 9th ICRC, London, 8 (1965) 708.

¹²³ M. Nagano and S. Shibata: "Spark Chamber Suitable for Observation of Multiple Particles", J. Phys. Soc. Japan, 20 (1965) 685.

¹²⁴ S. Miyake, K. Hinotani, N. Ito and T. Kaneko: "Double Core Event in Extensive Air

ドニー大学のコンパクト・アレイで観測されていた(2.4.3 節参照)。しかしその頻度やエネルギーの推定は実験毎で大きく異なっていた。20 m² スパーク・チェンバーは分解能が良いので、コアの粒子数の横広がりをも NK 関数にフィットさせ、その発生高度とエネルギーを求め p_t 分布を求めることができる(図 3-7 左)¹²⁵。複数のコアの EAS のうち、主コアから離れた副コアと天井の梁との位置の相関は見られなかった。これらを大気発生として解析すると、その発生高度は低く、一次宇宙線中の重い原子核が分裂したものではありません。多重発生における「大横運動量(p_t)」の存在との結論に達した。5 GeV/c 以上の p_t 分布は $p_t^{-1.7 \pm 0.2}$ で(図 3-7 右)、その頻度はシャワーあたり約 2% である。これによりシドニー大学の一次宇宙線の重い核による説(2.3.3 参照)を明確に否定した。

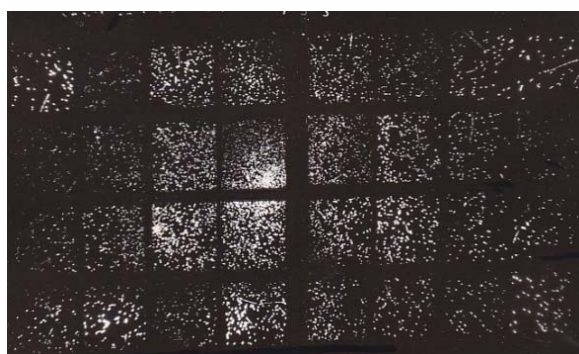


図 3-6 核研スパークチェンバーによる double core の例¹²⁵

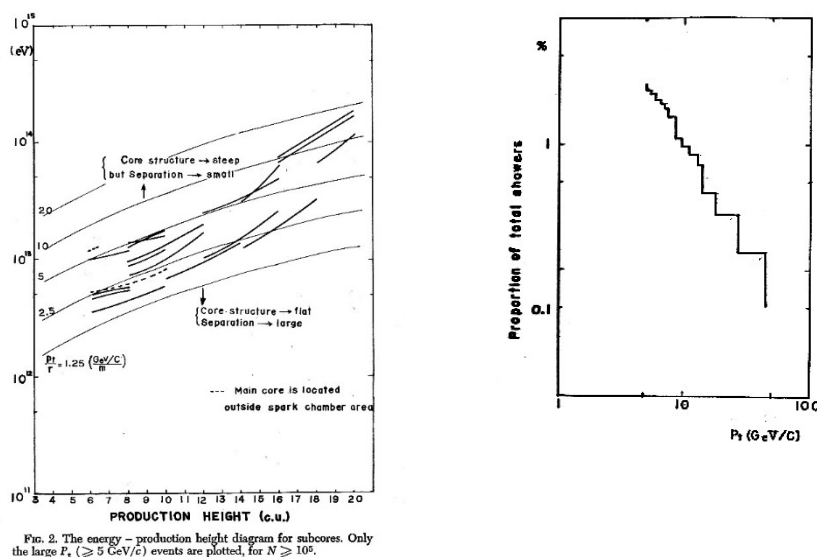


図 3-7 副芯の横広がり分布から、その発生高度(横軸)とエネルギーの関係を決定する図(左図)。右図は決定された p_t 分布¹²⁵。

Shower”, J. Phys. Soc. Japan, 18 (1963) 592.

¹²⁵ T. Matano, M. Nagano, S. Shibata, K. Suga, G. Tanahashi and H. Hasegawa: “Fine structure of air shower cores”, Can. J. Phys., 46 (1968) S56.

(2) 水平シャワー(Horizontal Air Shower, HAS)の観測

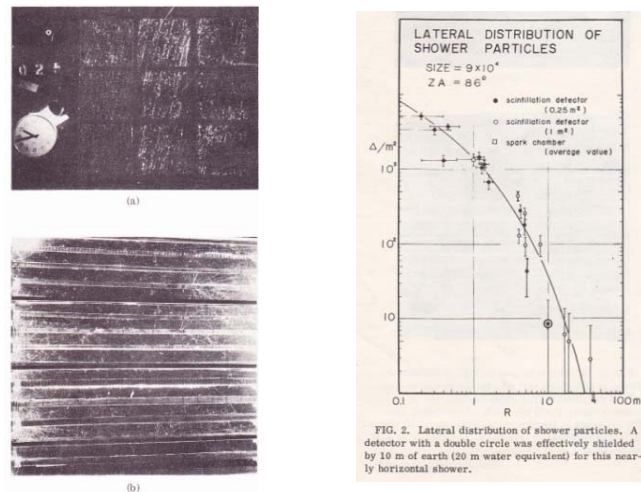


図 3-8 観測された最大エネルギーの水平シャワー. 天頂角 86 度, 約 3×10^{14} eV. 図左下の霧箱写真の上から 3 番目の鉛板で核反応を起こしており, このシャワーは電磁カスケードでなく核カスケードと判定された¹²⁶.

スパーク・チェンバーを 20 m²に拡大しながら観測を開始した 1965 年に, 天頂角 86 度で約 3×10^{14} eV の EAS が観測された¹²⁶. 天頂角 86 度の大気層は 12,000 g/cm² もあり, 陽子による EAS は完全に吸収され到達できない. ところがこの EAS 中に霧箱で 30~50 GeV と推定されるハドロンが観測され, 核カスケードの可能性が高く, ミューオンによる核反応, 大気起源又は宇宙起源のニュートリノによる核反応の可能性が論じられた. このような大天頂角から来る EAS は「水平シャワー(Horizontal Air Shower, HAS)」と名付けられた.



図 3-9 ネオンホドスコープで観測された「ぞうりむし」状の現象(左)とスパークチェンバーによる「水平シャワー」(右)の例¹²⁷

¹²⁶ T. Matano, M. Nagano, S. Shibata, K. Suga, K. Kameda, Y. Toyoda, T. Maeda and H. Hasegawa: "Possible Evidence for Nuclear Interaction of Muon above 3×10^{14} eV", Phys. Rev. Lett., 15 (1965) 594.

¹²⁷ H. Akiyama, F. Ishikawa, T. Matano, M. Nagano, S. Shibata, K. Suga, M. Takano and K. Uchino: "Spark Chamber Pictures of Air Showers", INSJ-100, (Institute for Nuclear Study, University of Tokyo) (1966).

ネオンホドスコープによる「ぞうりむし」と名付けられた奇妙な現象(図 3-9 左)はスーパーチェンバーで見ると、 $10^{11} \sim 10^{12}$ eV 領域のミュオンが実験室の鉄骨の骨組み中で起こす制動輻射によることが判明した。また多数の空气中で作られた水平方向からくる 10^{13} eV を超える EAS が観測され、ミュオンが空气中で起こす制動輻射であることが判明し、電磁石やミュオンの depth-intensity から求められたミュオンのエネルギー・スペクトルを超えるエネルギーまで測定することも主目的の一つになった。

ミュオンの制動輻射による HAS とミュオン又はニュートリノによる核カスケードによる HAS を区別するために、HAS シャワー中のミュオン数を測定すべく、ミュオン検出器が設置され 1966 年から HAS 観測が始まった¹²⁸。結果は 10.2.1 節参照。

3.3 乗鞍観測所における初期の空気シャワー実験

3.1 節に述べたように、乗鞍観測所での研究は 1953 年のコスモトロンの稼働後は、核子-核子相互作用の研究から 10^{14} eV を超える宇宙線の核相互作用、一次宇宙線の組成など、EAS の主として中心部を観測する研究、宇宙線の到来方向の異方性などの研究に移行していく。1975 年以降の研究について、平成元年に発行された「乗鞍観測所の研究活動報告」に、各グループの研究報告がまとめられている¹²⁹。1957 年に始まった大阪市大三宅グループの実験、名古屋大学グループによる小空気シャワーの連続観測、1974 年に始まった CAOS (Computer Supervised Air Shower Observation System) グループについてまとめる。

3.3.1 大阪市大三宅グループ

乗鞍宇宙線観測所では三宅三郎が率いる大阪市大グループが 1957 年から EAS 観測を開始した。実験内容、結果、論文リストは、三宅の解説¹³⁰に、いわゆる「三宅のつつこみ理論」¹³¹も含めて書かれている。

当初の装置は図 3-10 に示すように、約 5 m 四方に格子状に配置された 90 本の GM 計数管アレイ、中央におかれたコア検出器(10 cm 鉛の下に GM 計数管トレイ)、小型霧箱、世界最大の大型霧箱(2 m × 1.3 m × 0.65 m)、透過性粒子検出器から成る。これらの装置を使って、EAS の芯のエネルギー流のシャワー毎の変動の測定、シャワー全体の核活性成分の測定、サイズ・スペクトルの測定等をおこなった。

図 3-10(右)に観測されたサイズ・スペクトルを示す¹¹⁰。クリコフとクリスチャンゼンが地上で観測したサイズ・スペクトル(図 2-5)とほぼ同時期に、折れ曲がりの観測を発表した。

¹²⁸ T. Matano, M. Nagano, S. Shibata, K. Suga, G. Tanahashi, T. Kameda, Y. Toyoda and H. Hasegawa: "Horizontal air showers induced by muons with energy above 10^{13} eV", Can. J. Phys., 46 (1968) 369.

¹²⁹ 「乗鞍観測所の研究活動報告」, 湯田利典編, 東京大学宇宙線研究所附属乗鞍観測所 (1989)

¹³⁰ 三宅三郎: 「空気シャワー(II)」, (宇宙線研究, 武谷三男編, 岩波書店) (1970) p.118.

¹³¹ S. Miyake: "An Analysis of Experimental Data on Extensive Air Showers", Prog. Theor. Phys., 20 (1958) 844.

積分スペクトルはサイズ $1.5 \times 10^5 \sim 5.5 \times 10^5$ の範囲で $6.1 \times 10^{-9}(N/10^5)^{-1.5} / \text{cm}^2 \text{ sec sr}$ であるが、サイズが 10^6 より大きい領域で冪は -1.9 と急になる。

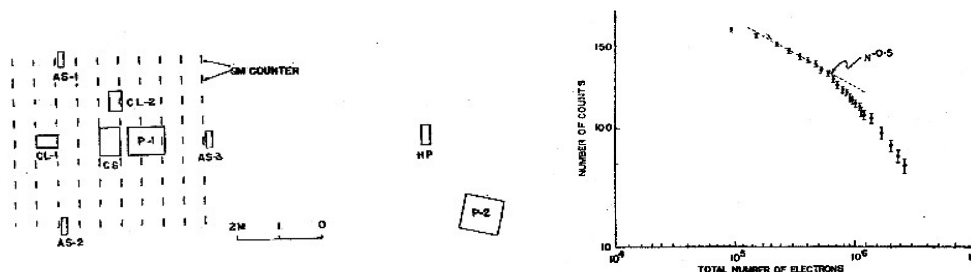


図 3-10 1957 年に EAS 観測を開始した時の EAS アレイ(左). 折れ曲がりを観測したサイズ・スペクトル 130

サイズ・スペクトルの折れ曲がり、乗鞍で亀田等¹¹¹も確認し、地上では福井等¹⁰⁹により精度よく測定され、高度により $10^5 \sim 10^6$ とサイズは異なるが、折れ曲がりが存在することは事実となった。その成因が「一次宇宙線の成分の変化」(重い原子核の割合の変化)によるのか、「核相互作用の変化」によるのか論争の焦点となる。三宅等は乗鞍と地上における、density spectrum, energy flow spectrum の比較等から、折れ曲がりの原因は「核相互作用の変化」と結論づけている¹³²。

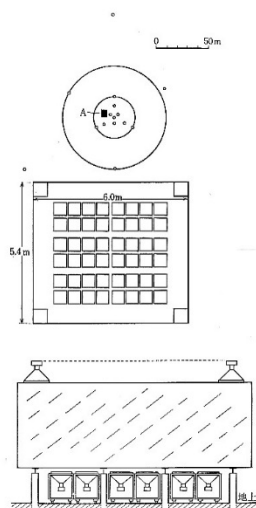


図 3-11 乗鞍宇宙線観測所における大阪市大グループの EAS 観測装置¹³⁰。上図のシンチレーション検出器アレイの A の位置に、シャワーの中心部観測器(中図上面, 下図は側面)が置かれた。

大型霧箱では数例のダブルコアが観測され、その頃わかっていた多重発生の際の二次粒

¹³² S. Miyake, K. Hinotani, I. Katsumata, T. Kaneko and N. Ito: "A Study on EASs at Mt. Norikura", J. Phys. Soc. Japan, Suppl., AIII (1962) 266 .

子の横運動量数 100 MeV よりも、約 10 倍大きい横運動量の存在が推定された¹²⁴。EAS の芯の構造とシャワーの遷移曲線を詳しく測定するため、1965 年に図 3-11 のように、アレイをシンチレーション検出器で構成し、中央部に 2 m 水深のタンクが置かれ、その上下に各 48 個のシンチレーション検出器が格子状に配置された¹³⁰。

水と空気の輻射単位(それぞれ 37.1, 37.7 g/cm²)、臨界エネルギー(83.8, 84.2 MeV)、核相相互作用平均自由行程(81, 89 g/cm²)はよく似ているので、空気中の遷移状態はそのまま水中で演じられる。地上で測定される電磁成分の横ひろがり分布から決められるシャワーのエイジ S は、平均的には水中での減衰行程と一致するが、個々のシャワーで見ると同じ S でも減衰行程は幅広い分布をしている。定性的には核相互作用で作られる二次粒子の変動が大きい¹³³。

水槽の上下のシンチレーション検出器で複数の芯のある事象が多数観測され、多重発生における「大横運動量(p_t)」の存在が確認され、 S やミューオンとの相関が論じられた¹³⁴。より詳細にサブコアを調べるために、シンチレーション検出器アレイの下に大型霧箱(1.3 m × 2 m × 0.3 m)が設置された¹³⁵。霧箱で観測される大部分のサブコアは高度 1~2 km で発生した 1 TeV~10 TeV の π^0 による電磁カスケードで核活性成分を含まないことが判明し、それらの平均 p_t は約 6 GeV/c との結果を得た。

EAS の電磁成分、ミューオン成分、高エネルギーハドロン(>200 GeV)成分、低エネルギーハドロン(>20 GeV)成分の横広がり分布のサイズ依存性を調べ、 10^{17} eV 付近での核相互作用の変化と発表した¹³⁶が、その後モンテカルロ・シミュレーションにより、一次宇宙線の組成の変化の可能性も含めて検討された。

3.3.2 名古屋大学グループ

10^{14} eV 以上の EAS の頻度の恒星時日変化の研究は 1950 年頃から世界各地でなされた。1960 年代初期までの世界中の異方性観測の結果が名古屋大の榊原志津子によりまとめられている¹³⁷。このエネルギー領域では太陽磁気圏の影響は殆どないが、EAS 発達は大気気圧効果、気温効果ばかりでなく、検出器の温度依存性など、慎重な配慮が必要である。

名古屋大学では、乗鞍で 1969 年から 10^{10} から 10^{11} eV の宇宙線の変動を観測するために、

¹³³ N. Ito: "Transition of Extensive Air Showers in the Atmosphere", J. Phys. Soc. Japan 22 (1967) 6.

¹³⁴ S. Miyake, K. Hinotani, N. Ito, S. Kino, H. Sasaki, H. Yoshii, H. Sakuyama and E. Kato: "Study of extensive air showers at Mount Norikura III. Core structure and high-energy events", Can. J. Phys. 46, part 2 (1968) S25.

¹³⁵ S. Miyake, K. Hinotani, N. Ito, S. Kino, H. Sakuyama, S. Kawakami and N. Hayashida: "Study of Multicores of Extensive Air Showers", Acta Phys. Hungaricae, 29, Suppl. 3 (1970) 471.

¹³⁶ S. Miyake, N. Ito, S. Kawakami, N. Hayashida and Y. Hayashi: "A Change of the Interaction Character around 10^{17} eV", Proc. 13th ICRC, Denver, 5 (1973) 3220.

¹³⁷ S. Sakakibara: "Anisotropy of Cosmic Rays in the Galactic Arm", J. Geomag. Geoelectr., 17 (1963) 99.

上下2層からなる36 m²シンチレーション検出器からなる「高精度宇宙線中間子計」が、1971年から平均 2×10^{13} eV宇宙線の恒星時日変化を調べる「方向別空気シャワー観測装置」が稼働され、それぞれ太陽系空間の磁場構造、太陽系空間近傍の銀河系磁場構造の研究がおこなわれた¹³⁸。

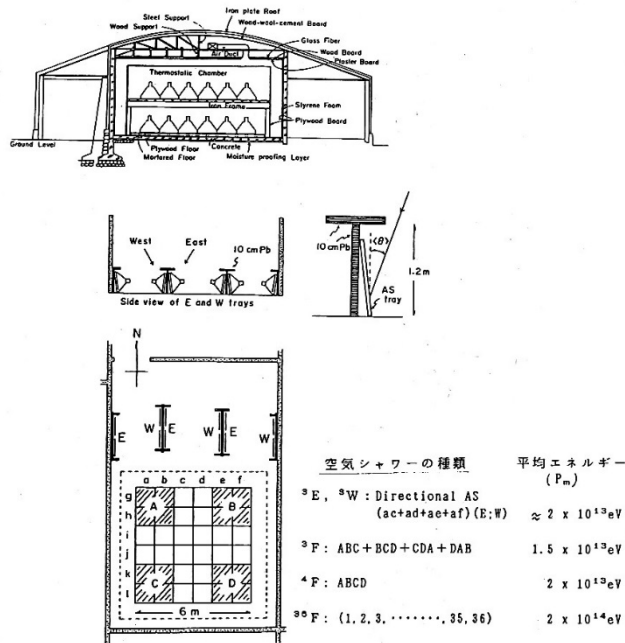


図 3-12 名古屋大学高精度宇宙線中間子計および方向別空気シャワー観測装置 ¹³⁸

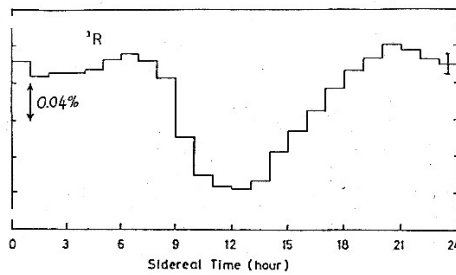


図 3-13 2×10^{13} eV 以上の空気シャワー強度の恒星時に対する時間変動 ¹³⁸

図 3-13 は 2×10^{13} eV 以上の宇宙線の恒星時日変化の 17 年間の観測の平均であり、1 年毎で見てもほぼ同じ形をしている。これは上述した大気変動による太陽時日変化を除去したもので、真の恒星時日変化といえる。恒星時 12 時を中心として前後約 2 時間、宇宙線強度が小さい空間の存在を示す。この解釈として、太陽系の位置するオリオンアームの中で、

¹³⁸ 安野志津子, 上野裕幸, 藤本和彦, 藤井善次郎, 村上一昭, 織戸賢, 山田良実, 長嶋一男, 近藤一郎:「乗鞍岳における高精度中間子強度および小空気シャワーの連続観測」, 乗鞍観測所の研究活動報告(1975~1989), 東京大学宇宙線研究所附属乗鞍観測所, (1989) 1.

アームの中心から銀河系の北極の方向に宇宙線が漏れ出していく磁場構造が推定され、「ロスコーン・モデル」と呼ばれている。詳細な結果の解釈は K. Nagashima 等により発表されている¹³⁹。

その後異方性のエネルギー依存性を求めるために、約 200 m×150 m の領域に比例計数管を配置し、 2×10^{14} 領域の観測がなされた。

3.3.3 CAOS (Computer Supervised Air Shower Observation System) グループ

当時まだ普及していなかったマイクロコンピュータを製作し、装置の管理と大容量データの即時処理により、EAS 観測の種々のバイアス問題を解決する目的で CAOS (Computer Supervised Air Shower Observation System) グループが結成され、乗鞍岳での装置建設が 1974 年から開始され、観測は 1977 年からおこなわれた¹⁴⁰。

図 3-14 の左上がシンチレーション検出器のアレイの配置図で、その中央に 54 m² のスパークチェンバーとその下にシンチレーション検出器のアレイが設置された(同右上図)。10¹⁵ eV 領域の EAS 芯部の構造観測が主目的である。観測されたサブコアの内、天井の梁の影響のない約 35% のサブコアのみ解析に使用し、核研と同じ手法で(図 3-7 左図)発生高度とエネルギーを決め、主コアからの距離を使って p_t を求めた。サブコアの p_t が 30 GeV/c 以上のシャワーを 5 例観測しており¹⁴¹、その積分 p_t 分布を図 3-15 に示す。この大 p_t で放出されたジェットは quark-quark, quark-gluon, gluon-gluon 反応で生じたとして QCD を適用して計算された結果が実線と鎖線で示されている¹⁴²。

¹³⁹ K. Nagashima, K. Fujimoto, S. Sakakibara, Z. Fujii, H. Ueno, I. Morishita and K. Murakami: “Galactic cosmic-ray anisotropy and its modulation in the heliomagnetosphere, inferred from air shower observation at Mt. Norikura”, *Nuovo Cimento*, 12C (1989) 696.

¹⁴⁰ 木野茂, 北島隆男, 新居誠彦, 嶽鐘二, 尾田汎史, 杉原雄, 佐々木宏, 楠瀬昌彦, 実野邦久, 中西祥彦, 中塚隆郎, 大盛信晴, 坂田通徳, 山本嘉昭, 裕道生, 川本勝, 西川善良, 中本正一郎, 柳田友士, 葉田野義和, 由良剛: 「CAOS プロジェクト」, 乗鞍観測所の研究活動報告(1975~1989), 東京大学宇宙線研究所附属乗鞍観測所, (1989) 34.

¹⁴¹ T. Nakatsuka, K. Nishikawa, M. Sakata, Y. Yamamoto, T. Yura, M. Kusunose, N. Ohmori, T. Yanagita, S. Dake, M. Kawamoto, T. Sugihara, S. Kino, K. Jitsuno, T. Kitajima and M. Hazama: “Large p_t Spectrum of EAS Subcores Observed by the 54 m² Spark Chamber Array at Mt. Norikura”, *Nuovo Cimento*, 78A (1983) 205.

¹⁴² D.B. Cline: “High Energy Particle Interaction from 10-1000 TeV: Cosmic Ray Data and Proton-(Anti)Proton Colliders”, *Proc. 16th ICRC, Kyoto*, 14 (1979) 271.

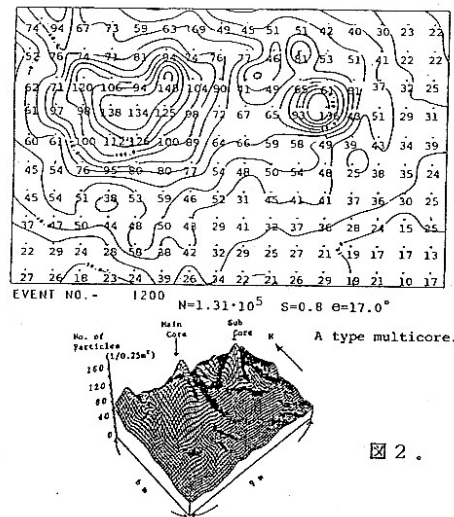
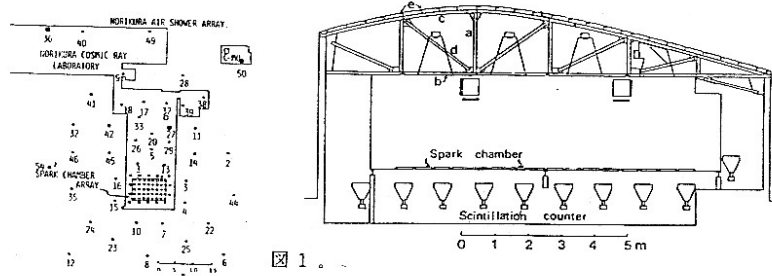
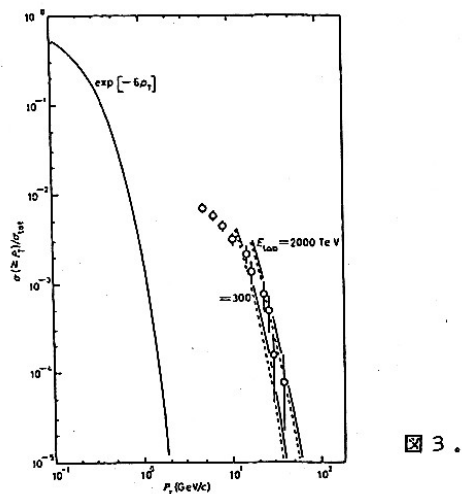


図 3-14 上図の左側が全体の空気シャワーアレイであり、中央部の Spark chamber array と書かれている部分のスパークチェンバーとシンチレータ・アレイの配置を横から見た図が右図である。下図は典型的な複芯構造のシャワーの粒子数分布とその3次元図 140.



Integral P_t spectrum. The theoretical curves are calculated by CLM (solid curves) and by DING (dashed curves) applying QCD to the large- P_t jets: \circ experiment ($P_{T, \Sigma p}$).

図 3-15 観測されたサブコアの積分 p_t 分布 141.

第4章 GZK 上限を超えると推定された宇宙線の観測

4.1 Volcano Ranch Array

10^{18} eV を超えてエネルギー スペクトルがどこまで伸びているかを求めて、ニューメキシコのアルバカーキーの郊外のヴォルカノ・ランチという牧場に(高度 1770 m で、大気 834 g/cm²相当)、リンズレー(J. Linsley)、スカルシ(L. Scarsi)とロッシ(B. Rossi)が空気シャワー観測装置を設置し、1959 年から観測を開始した¹⁴³。面積 3.3 m²のプラスチックシンチレータに、5 インチの PMT をとりつけた検出器で、鉛 10 cm の上下に配置した装置 19 台を 1959 年から 1960 年までは約 2 km²に(検出器間隔 442 m)、その後は約 8 km²の領域内(検出器間隔 884 m)に配置したもので、信号はオッシロスコープに記録された。鉛をはさんで上下にシンチレータをおく「レッドバーガー検出器」のはしりである。検出器をワラで保温し熱を遮断したところ、ガラガラへびの絶好の巣となったそうである。検出器の保守には、長靴をはいて、蛇にかまれたらすぐ切って吸い出すキットを持って見回らなければならず、大変怖いところだった。

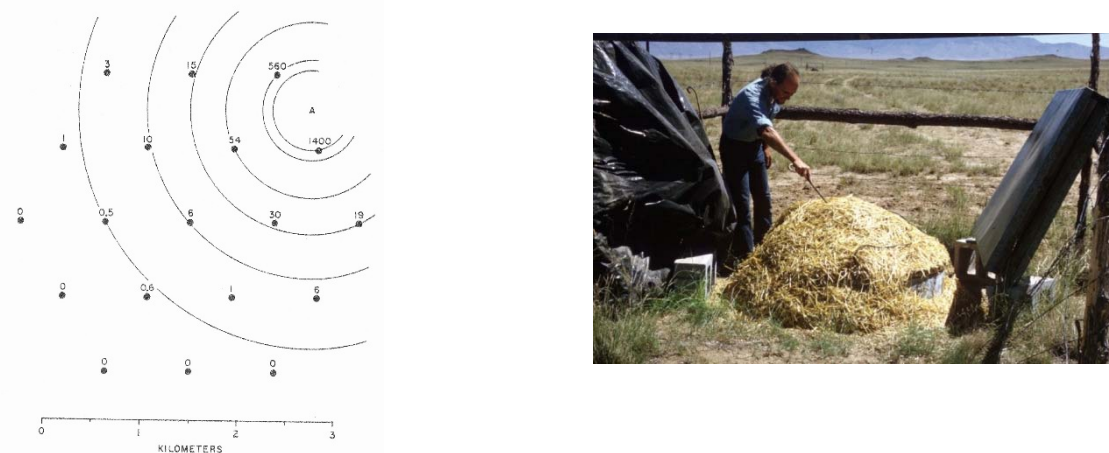


図 4-1 Volcano Ranch Array の検出器配置図(左)。検出器横の数字は世界で初めて観測された、当時の推定 10^{20} eV のシャワーの事象について、観測された粒子数が書かれている¹⁴⁴。右図は検出器を覆うワラの中にあるガラガラへびを指している J. Linsley。

まずは 1959 年から 1960 年のデータを使い、 10^{18} eV 以上の宇宙線の到来方向は統計の範囲内で等方的であることを示した¹⁴⁵。この高度ではシャワーサイズ(N_e)が 4×10^7 を超えるシャワーはほぼ最大発達点にあることを利用し、総ミューオン数(N_μ)と N_e との比の分布

¹⁴³ J. Linsley, L. Scarsi and B.B. Rossi: “Extremely energetic cosmic-ray event”, Phys. Rev. Lett., 6 (1961) 485. , J. Phys. Soc. Japan, 17 Suppl. A-III (1962) 91

¹⁴⁴ J. Linsley: “Evidence for a primary cosmic-ray particle with energy 10^{20} eV”, Phys. Rev. Lett., 10 (1963) 146.

¹⁴⁵ J. Linsley, L. Scarsi, P.J. Eccles and B.B. Rossi: “Isotropy of cosmic radiation”, Phys. Rev. Lett., 8 (1962) 286. ,

幅が狭いことから、一次宇宙線の組成はほぼ単一成分であること、電磁成分の横広がりエイジ分布の幅から、その単一成分は鉄ではないという結論を発表した¹⁴⁶。

1961年に検出器間隔を広げて、有効面積を8 km²にして観測してすぐ、今から約50年前の1962年、すなわち宇宙線発見50年の記念の年に、当時の推定10²⁰ eVの宇宙線を観測した¹⁴⁴。約4年間の観測だったので、今から考えると極めてラッキーな事象と言えよう。エネルギーは横広がり分布からサイズN_eを決め、観測地点がシャワーの最大発達の深さ(X_{max})となっているとして、シャワーカーブを積分して決定された(track-length integral法)。現在、このエネルギー領域ではX_{max}はヴォルカノ・ランチより約50 g/cm²上空であるから、平均的にはエネルギーは低く推定されていたと言える。しかしシャワー毎のX_{max}の変動は大きいから、10²⁰ eV事象のエネルギーが必ずしも下方に推定されたとは言えない。なお、この発見は1965年のペンジアス(A.A. Penzias)とウイルソン(R.W. Wilson)による2.7 K宇宙背景輻射の発見¹⁴⁷以前である。

リンズレーはこの装置を1978年まで稼働し、数々の新しい結果、新しい解析方法を提案している。電子とミュオンへの到着時間分布の測定¹⁴⁸や、一次宇宙線の組成の決定に、X_{max}のエネルギーによる変化の割合(Linsleyはelongation rateと名付けた)の測定の提唱¹⁴⁹などである。特に1983年の18th ICRCでレポートとしてまとめた論文¹⁵⁰とその後の論文¹⁵¹で、観測量から、組成Aの対数の平均<ln A>とその分散σ(ln A)を求める方法を示した。この手法はN_μ分布やX_{max}分布の測定から<ln A>を求める手法として最近でも広く使われている。

4.2 GZK カットオフ

2.7 K宇宙背景輻射が発見されるとすぐに、グライセン(K. Greisen)¹⁵²と、ザツェピンとクズーミン(G.T. Zatsepin and V.A. Kuzmin)¹⁵³が、独立に「たとえ10²⁰ eVを超える銀河系外起源の宇宙線が存在しても、宇宙背景輻射光子と光核反応によりエネルギーを損失する。観測するには衝突回数が少ない距離(およそ1.5億光年)に限られ、その範囲には加速できそ

¹⁴⁶ J. Linsley and L. Scarsi: "Cosmic-ray composition at 10¹⁷–10¹⁸ eV", Phys. Rev. Lett. 9 (1962) 123.

¹⁴⁷ A.A. Penzias and R.W. Wilson: "A measurement of excess antenna temperature at 4080 Mc/s", Astrophys. J., 142 (1965) 419.

¹⁴⁸ J. Linsley and L. Scarsi: "Arrival times of air shower particles at large distances from the axis", Phys. Rev. 128 (1962) 2384.

¹⁴⁹ J. Linsley: "Structure of large air showers at depth 834 g/cm² III-Applications", Proc. 15th ICRC, Plovdiv, 12 (1977) 89.

¹⁵⁰ J. Linsley: "Spectra, Anisotropies and Composition of Cosmic Rays above 1000 GeV", Proc. 18th ICRC, 12 (1983) 135.

¹⁵¹ J. Linsley: "Proton-Air and Proton-Proton Cross Sections from Air Shower Data", Proc. 19th ICRC, San Diego, 6 (1985) 1.

¹⁵² K. Greisen: "End to the cosmic ray spectrum?", Phys. Rev. Lett., 16 (1966) 148.

¹⁵³ G.T. Zatsepin and V.A. Kuzmin: "Upper limit of the spectrum of cosmic rays", JETP Lett., 4 (1966) 78.

うな天体はほとんどないので、光核反応の閾エネルギー(4~6) $\times 10^{19}$ eV の近傍に宇宙線エネルギーの上限が存在するであろう」と予測した。この上限は提唱者の頭文字をとって「GZK カットオフ」又は「GZK 上限」と呼ばれる。

宇宙線が加速されてできたものとする、そのメカニズムは電磁加速なので、加速エネルギーの上限は加速領域のサイズと磁場の強さの積に比例する。この積の値が一定以上でないと 10^{20} eV を超えることが出来ない(この関係を描いた図は **Hillas diagram**¹⁵⁴ と呼ばれる)。これは必要条件で、磁場が強すぎるとシンクロトロン放射などでエネルギーを損失する。天体が GZK カットオフを起こさない程近いとすると、その加速天体候補の数が限られ、それらを発見できる可能性がある。しかし源から伝播途中に軌道が曲がってしまつては加速天体を発見できない。

これまでわかっている銀河系内での磁場構造を取り入れて陽子の軌跡をシミュレーションにより追いかけてみると、 10^{20} eV では殆ど曲がらない。銀河系の外では磁場の強さはまだ明確ではないが、もし nG 程度とすると、GZK カットオフをおこさない距離内からだとほぼ直進し、荷電粒子による点源探索が期待できる。

GZK カットオフを超える Linsley の 10^{20} eV の事象に触発されて、1960 年代後半に、粒子検出器アレイによる観測が 4 ヶ所で始まった。水チェレンコフ検出器を約 12 km^2 の面積に配置した 英国リーズ大学のハベラパーク・アレイ、地下 1.7 m にミュオン検出器を約 60 km^2 に配置した 豪州シドニー大学の SUGAR、極寒の地シベリアに建設を始め、1974 年に 18 km^2 に拡大されたヤクーツクの宇宙物理研究所のアレイ、日本の原子核研究所(核研)で始まった簡易巨大アレイである。ハベラパーク、SUGAR、核研では 10^{20} eV 事象が観測され、ヤクーツクは観測されず、その後 30 年にわたり GZK カットオフ「ある・なし」論争が続くことになる。

4.3 ハベラ・パーク・アレイ (英国 Leeds 大学)

ハベラ・パークは英国リーズ大学から約 25 km 離れたところにあるなだらかな起伏の羊の放牧場である。2.2.2 節で述べた Harwell 空気シャワー・アレイが 1958 年に閉じられ、ロンドン近郊のシルウッド・パークでプロトタイプ・アレイのテストが行われた後、英国の共同利用観測所の空気シャワーアレイとしてウイルソン(J.G. Wilson)が主導して 1964 年に建設が始まった¹⁰。水チェレンコフ検出器から成る観測ステーションが約 500 m 間隔で約 12 km^2 の面積に配置された¹⁵⁵。それぞれのステーションは $2.25 \text{ m}^2 \times 1.2 \text{ m}$ の水タンク 15 台(計 33.75 m^2)で構成される。半径約 200 m 以内の中央部には、30 台の 1 m^2 の水チェレンコフ検出器、鉛シールドの下におかれた液体シンチレータの 10 m^2 ミューオ

¹⁵⁴ A.M. Hillas: “The Origin of Ultra-High-Energy Cosmic Rays”, Ann. Rev. Astron. Astrophys., 22 (1984) 425.

¹⁵⁵ M.A. Lawrence, R.J.O. Reid and A.A. Watson: “The cosmic ray energy spectrum above 4×10^{17} eV”, J. Phys. G, 17 (1991) 733.

ン検出器(>250 MeV), ミューオン観測用電磁石スペクトロメータなどがおかれ, 10^{15} eV からの観測を可能にした. トリガーや時刻情報は 7.0 GHz のマイクロウェーブが使用され, 信号は各ステーションのオシロスコープで記録された. タンク内部を亜鉛メッキした結果, 1967 年から 20 年の運転期間の間, 水の劣化は全くなかった. この結果は後にオージェプロジェクトでの水チェレンコフ検出器採用を後押しした.

観測して間もなく GZK カットオフを超える宇宙線の観測を発表している¹⁵⁶. 芯から 500 m 以遠でのエネルギー損失量(E_{500})を観測データから求め, 蓄積されたデータによる lateral distribution を使って 100 m 以遠の E_{100} に変換する. E_{100} から一次宇宙線エネルギーへの変換にはシミュレーションを使用する. それぞれ控えめなデータを採用し, 最低でも 5×10^{19} eV を超えると推定した. またこの事象の到来方向($322^\circ, 47^\circ$)と Linsley の 10^{20} eV(4.1 節)の到来方向($310^\circ, 47^\circ$)が実験誤差内でほぼ一致することを指摘しているのは, 私たちがよく経験してきた少数例の偶然の一致の 1 例であろう.

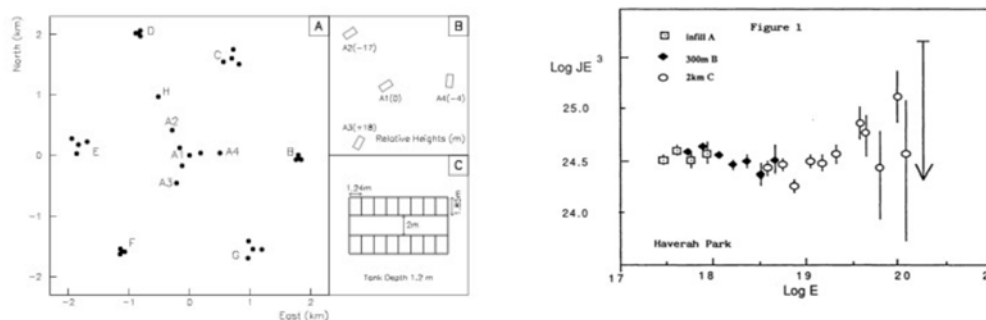


図 4-2 ハベラパークの水タンク・アレイ(左図)と 1991 年に発表されたエネルギースペクトル¹⁵⁵

1970 年にヒラス(A.M. Hillas)は新しいエネルギー決定方法を提案した¹⁵⁷. ヒラスは, ハベラ・パーク・アレイの場合 EAS の中心から 500m 近傍での水タンクで測定された粒子密度は, 一次宇宙線の種類や核相互作用の組み合わせに依らず, ほぼ 12%以内でエネルギーに比例することをシミュレーションにより示した. 一般的にどの距離の粒子密度が良いかは, 検出器の種類やそれらの配置等で変化する. その後多くの核カスケード・シミュレーションにより, 観測データが電磁成分の場合は, 相互作用モデルや組成への依存度は小さく, この手法は有効であるが, 水タンクのようにミューオン成分が主の場合は, モデル, 組成に依存する割合がより大きいことが示された¹⁵⁸.

¹⁵⁶ D. Andrews, A.C. Evans, R.J.O. Reid, R.M. Tennent, A.A. Watson and J.G. Wilson: "Evidence for the Existence of Cosmic Ray Particles with Energy $\geq 5 \times 10^{19}$ eV", Nature, 219 (1968) 343.

¹⁵⁷ A.M. Hillas: "Derivation of the EAS spectrum", Acta Phys. Acad. Sci. Hung., 29 Supple 3 (1970) 355.

¹⁵⁸ 例えば, H.Y. Dai, K. Kasahara, Y. Matsubara, M. Nagano and M. Teshima: "On the

ハベラパークでは1987年に稼働を止めるまでの約20年間に4例の 10^{20} eV候補を観測し、GZKカットオフは観測されないと発表した¹⁵⁵。しかし約10年後の2003年、より改善されたシミュレーションにより、水タンクで観測されるエネルギー損失を詳しく解析し、エネルギーは約30%下方修正され¹⁵⁹、明確なGZKカットオフを超える宇宙線は観測されていないと発表した。

検出器に到達する粒子の時間分布は検出される信号の立ち上がりで反映される。軸から一定の距離では、立ち上がりが遅いほど、大気深く発達したシャワーを見ることになる。ハベラパークでは、検出器データはオッシロスコープ上にアナログで記録されてきたことを利用し、この立ち上がりの分布から最大発達の深さ(X_{\max})とその変動の幅($\sigma(X_{\max})$)のエネルギー依存性を調べ、 $10^{17}\sim 10^{19}$ eV領域で組成は一定であるとの結果を得た¹⁶⁰。

なお1970年代に空気シャワーからの電波の活用が検討され、ハベラパークやモスクワ大学で精力的な実験がおこなわれた。結論としては、電波強度は気候に左右され、大きく変動すること、到来方向が決まらないことなどで、実用にはいたらなかった¹⁶¹が、第11章で詳説する。

4.4 SUGAR(The Sydney University Giant Air-Shower Recorder)

シドニー大学のマッカスカー(C.B.A. McCusker)が中心となり、オーストラリアのシドニーの北西約540 kmのナラブライ(Narrabri)近郊の森 Pilliga State Forest に SUGAR が建設された。主目的は一次宇宙線の源の発見である。当時弱い銀河磁場の存在が明らかになっており、荷電粒子で源を発見するには、 3×10^{18} eV以上のエネルギーの宇宙線をとらえなければならず、大きな有効面積で到来方向を精度よく決める必要がある¹⁶²。約1.6 km間隔で56個所に観測ステーションが面積60 km²の領域に配置された(図4-3左)¹⁶³。それぞれのステーションには、面積6 m²の液体シンチレーション検出器2台が50 m離して地下

energy estimation of ultra-high-energy cosmic rays observed with the surface detector array”, J. Phys. G: Nucl. Phys., 14 (1988) 793, M. Nagano, D. Heck, K. Shinozaki, N. Inoue and J. Knapp: “Comparison of AGASA data with CORSIKA simulation”, Astropart. Phys., 13 (2000) 277.

¹⁵⁹ M. Ave, J. Knapp, J. Lloyd-Evans, M. Marchesini and A.A. Watson: “The energy spectrum of cosmic rays above 3×10^{17} eV as measured with the Haverah Park array”, Astropart. Phys., 19 (2003) 47.

¹⁶⁰ R. Walker and A.A. Watson: “Measurement of the fluctuations in the depth of maximum of showers produced by primary particles of energy greater than 1.5×10^{17} eV”, J. Phys. G: Nucl. Phys., 8 (1981) 1131.

¹⁶¹ 詳しい解説は H.R. Allan: Progress in Elementary Particle and Cosmic Ray Physics, 10 (1971) 169.

¹⁶² C.B.A. McCusker and M.M. Winn: “A new method of recording large cosmic-ray air showers”, Nuovo Cimento, 28 (1963) 175.

¹⁶³ B.G. Brownlee, A.J. Fisher, L. Goorevich, P.C. Kohn, C.B.A. McCusker, H.B. Ogelman, A.F. Parkinson, L.S. Peak, M.H. Rathgeber, M.J. Ryan and M.M. Winn: “Design of an array to record air showers of energy up to 10^{21} eV”, Can. J. Phys. 46 (1968) S259.

1.7 m に埋設された。時刻情報は中央から無線で送られ、各ステーションでは、2 台の検出器のコインシデンスがあるとき、信号の大きさ(粒子数)と、入射時刻をテープレコーダーに記録する。検出器は地下埋設で、 $0.75 \text{ sec } \theta$ (θ は天頂角)以上のミューオンを観測することにした理由は①各ステーションでの局所的な小シャワーの頻度を減らす、② 装置の温度変化を減らすことその他、③ 頻発する森林火災から検出器を守る事情があったようである。それぞれのステーションのテープレコーダーに記録されたデータは、数日毎に回収され、オフラインで多くのデータを一台の計算機で処理し、3ステーション以上のコインシデンスした事象が EAS として解析された。この処理には当時としては先端の技術が使われた。

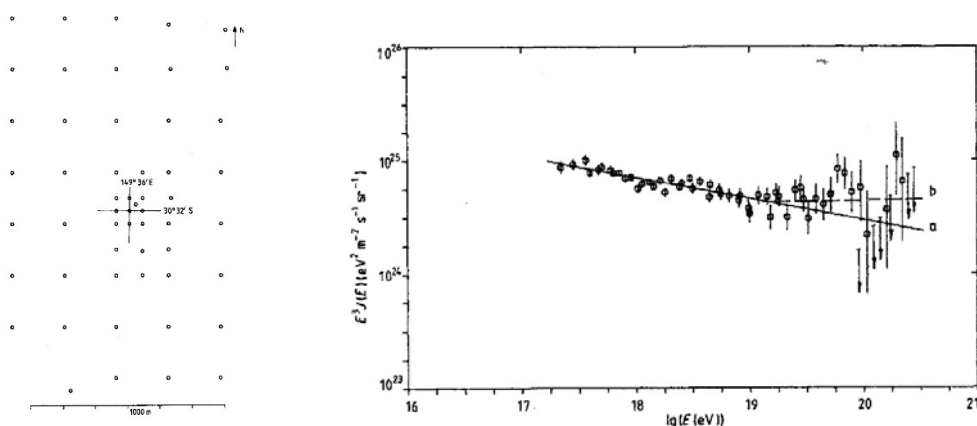


図 4-3 SUGAR の検出器配置図(左)¹⁶³と 1986 年に発表されたエネルギースペクトル¹⁶⁴

一部のアレイの観測は 1967 年から開始された。使用された光電子増倍管 EMI9623B には after pulse があり、対数増幅器で粒子数が大きくなること、ミューオンで観測するにはステーション間隔が 1.6 km と大きく、エネルギー、到来方向を精度よく決めるにはヒットする検出器数が少なすぎることに、ミューオン数からエネルギーを推定するには組成、核相互作用のモデル依存性が大きいことなど、エネルギー・スペクトルを求めるには多くの苦労があった。

エネルギー・スペクトルは 1986 年に発表され(図 4-3 右)¹⁶⁴, GZK カットオフは観測されないと報告されている。同じ年に超高エネルギー EAS の 24 事象について、それぞれの粒子数マップが発表されたが、約 10 年の観測で 9 例の 10^{20} eV 候補が報告されている¹⁶⁵。これらの事象を AGASA で求められたミューオンの横ひろがり分布を使って再解析すると、こ

¹⁶⁴ M.M. Winn, J. Ulrichs, L.S. Peak, C.B.A. McCusker and H. Horton: “The cosmic-ray energy spectrum above 10^{17} eV”, J. Phys. G: Nucl. Phys., 12 (1986) 653.

¹⁶⁵ M.M. Winn, J. Ulrichs, L.S. Peak, C.B.A. McCusker and H. Horton: “EAS with energies $>8 \times 10^{18}$ eV from the Sydney Array(SUGAR)”, in Catalog of Highest Energy Cosmic Rays (ed. by M. Wada, Institute of Physical and Chemical Research, Tokyo) v.2, (1986) p.1.

のうち 2 例が 10^{20} eV 候補として残る¹⁶⁶.

同時に到来方向分布も発表された¹⁶⁷. それまで南半球のデータはなく, 銀河中心が見える SUGAR のデータは極めて貴重である. 結果は, 異方性は観測されなく等方的である. 後にアデレード大学グループが, SUGAR データを再解析した結果, $10^{17.9}-10^{18.5}$ eV の宇宙線(3732 事象)が銀河中心から約 7.5 度離れた箇所に excess があり, SUGAR の天頂角決定精度以内の点源である(Chance probability 0.005)可能性が高いと発表している¹⁶⁸. 後述する AGASA の銀河方向からの excess 発表(図 6-7)を受けての解析であるが, SUGAR ではミューオン・シャワーを観測していることを考慮すると, 一次宇宙線が中性子である可能性が高いとして注目された.

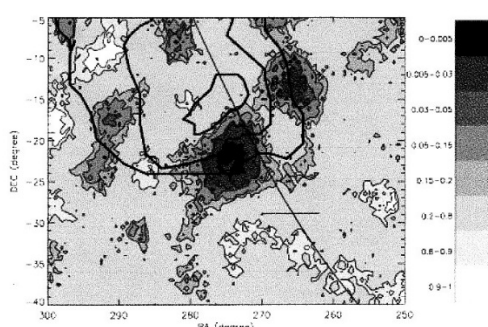


図 4-4 SUGAR データを再解析して得られた $10^{17.9}-10^{18.5}$ eV の宇宙線の到来方向分布¹⁶⁸. 黒色の濃さで excess の大きさを示している. 細い線は銀河面, 水平の短い線との交点が銀河中心. 等方分布の場合一番色の濃い部分にこれだけの excess が起こる確率は 0.5%. 実線の等高線は AGASA の結果¹⁶⁹で, 中央から 4σ , 3σ , 2σ の excess を示す.

2012 年に発表されたピエール・オージェ観測所の結果では¹⁷⁰, 10^{18} eV 以上のエネルギー領域で, 緯度 $-90^{\circ}\sim+15^{\circ}$ の範囲で点源は観測されておらず, AGASA や SUGAR の結果は確認されなかった.

¹⁶⁶ M. Nagano: “Historical review on ultrahigh-energy cosmic ray experiments”, J. Phys. Soc. Japan, 70 Suppl. B (2001) 1.

¹⁶⁷ M.M. Winn, J. Ulrichs, L.S. Peak, C.B.A. McCusker and H. Horton: “The arrival direction of cosmic-rays above 10^{17} eV”, J. Phys. G:Nucl. Phys., 12 (1986) 675.

¹⁶⁸ J.A. Bellido, R.W. Clay, B.R. Dawson and M. Johnston-Hollitt: “Southern hemisphere observations of a 10^{18} eV cosmic ray source near the direction of the Galactic Centre”, Astropart. Phys., 15 (2001) 167.

¹⁶⁹ N. Hayashida, M. Nagano, D. Nishikawa, H. Ohka, N. Sakaki, M. Sasaki, M. Takeda, M. Teshima, R. Torii, T. Yamamoto, S. Yoshida, K. Honda, N. Kawasumi, I. Thushima, N. Inoue, E. Kusano, K. Shinozaki, N. Souma, K. Kadota, F. Kakimoto, K. Kamata, S. Kawaguchi, Y. Kawasaki, H. Kitamura, Y. Matsubara, K. Murakami, Y. Uchihori and H. Yoshii: “The anisotropy of cosmic ray arrival directions around 10^{18} eV”, Astropart. Phys., 10 (1999) 303.

¹⁷⁰ P. Abrei et al.(The Pierre Auger Collaboration): “A search for point sources of EeV neutrons”, Astrophys. J., 760 (2012) 148.

4.5 ヤクーツク・アレイ (ヤクーツクの宇宙物理研究所)

ヤクート自治共和国ヤクーツクにある宇宙物理学・超高層大気研究所のクラシルニコフ (D.D. Krasilnikov) は 1949 年頃から宇宙線空気シャワー現象に注目し、1953 年にヤクーツク市内に小さい空気シャワー・アレイを作って実験を開始した。1966 年宇宙線エネルギー・スペクトルに GZK カットオフがあるだろうと提唱されてすぐ、その検証実験を計画し、ヤクーツク市から約 50 km 離れたレナ河の岸部にある広大な牧草地に、クラシルニコフとエフィモフ (N.N. Efimov) が中心となり 1969 年にまず 13 台のシンチレーション検出器を 1 km 半径の円内に配置し、実験を開始した¹⁷¹。粒子検出器アレイの有効検出面積は 1974 年に 18 km² に拡大された。各ステーションにおかれた地表検出器は 2 m² シンチレーション検出器 2 台と空気シャワー中の電子が空気中で発するチェレンコフ光を測定する上空に向けて開口された光電面の面積 176 cm² の PMT である。アレイの中心部には 96 m² のミュオン検出器(>0.5 GeV) が 2 か所、20 m² のミュオン検出器(>0.5 GeV) が 6 か所に配置された。

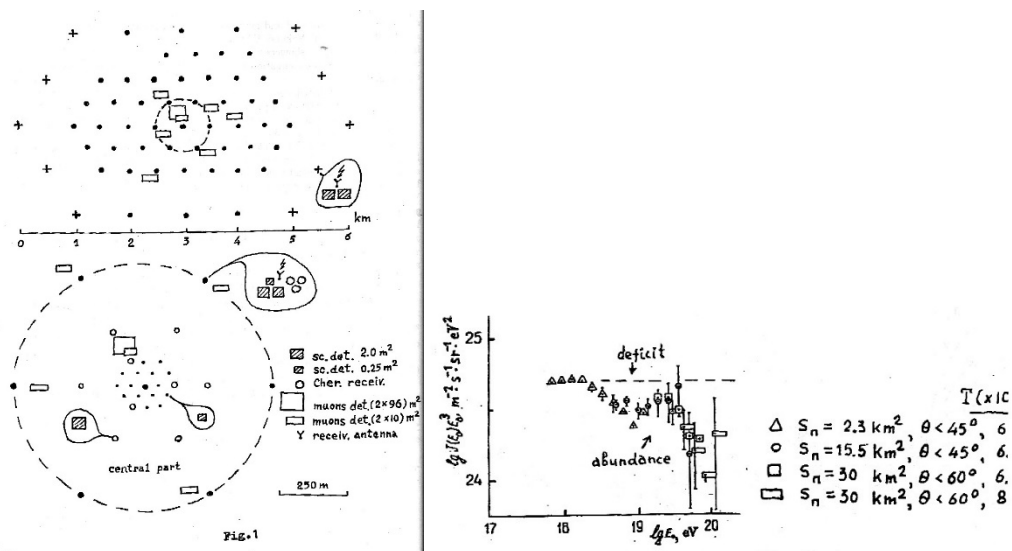


図 4-5 ヤクーツク空気シャワーアレイの検出器配置図(左)と 1993 年に発表されたエネルギー・スペクトル¹⁷²。印の違いは右に示された条件の違い。明確な GZK カットオフが観測されている。この結果によりエフィモフとクラシルニコフはレーニン賞を受賞した。

この装置の特色は、35 箇所に配置された PMT でチェレンコフ光を同時観測し、空気シャワーの上空でのエネルギー損失(E_{ei})を測定したことである。地表アレイで測定した電磁成分のエネルギー(E_{ei})、ミュオン検出器で測定したミュオンの荷うエネルギー(E_{μ})に、測

¹⁷¹ I.M. Kerschenholz, D.D. Krasilnikov, A.I. Kuzmin, V.A. Orlov, I.Ye. Sleptsov, T.A. Yegorov: "The results of the first stage observations at the Yakutsk EAS Complex Array", Proc. 13th ICRC, Denver, 4 (1973) 2509.

定できないエネルギー(約 8%)をシミュレーションにより推定し、一次宇宙線エネルギーをモンテカルロ・シミュレーションに殆ど依らず実験的に求めた。 Yakutsk 実験の結果では 5×10^{19} eV 近辺でスペクトルは急落しており、 GZK カットオフを観測したと結論づけた¹⁷²。これにより エフィモフ(N.N.Efimov)とクラシルニコフ(D.D.Khrasilnikov)はレーニン賞を受賞している。しかし、各検出器への粒子同時入射判定の時間幅が、遠方での空気シャワー面の厚さに比べて短く、大空気シャワーの記録もれがあるとの批判もあり¹⁷³、この実験で GZK カットオフが世界的に受け入れられたとは言えなかった。

ミューオン成分の割合が 10^{19} eV 付近で変化している傾向を観測し、1990 年頃にこのエネルギー領域をより詳細に測定する目的で、アレイを 2.5 km^2 に縮小し、1992 年に再び 7.2 km^2 に拡大している。全ての期間を含め、チェレンコフ光観測による E_{ei} の測定など精度をあげた結果で、GZK カットオフの存在を示した¹⁷⁴。

組成については、チェレンコフ光観測による X_{\max} の分布を QGSJET01 モデルによるシミュレーションとの比較では、ankle 近傍では約 80 %が陽子か He であり、それより重い核は 30 %を超えない¹⁷⁵。

なお Yakutsk のチェレンコフ観測については 7.3 節でより詳細に述べる。

4.6 原子核研究所の簡易巨大アレイ (INS-LAS array)

ハベラパーク・アレイ、SUGAR、Yakutsk・アレイと次々と「GZK カットオフ」の検証実験が始まる中、日本では、核研の菅浩一等が核研の周辺の小学校の屋上や、東大農場の一面を借りて三角形の簡易アレイをつくり、1967 年頃から実験を開始した¹⁷⁶。このアレイはシャワー毎にサイズを決め、サイズ・スペクトルを求めるのではなく、decoherence

¹⁷² B.N. Afanasiev, M.N. Dyakonov, T.A. Egorov, V.P. Egorova, A.N. Efimov, N.N. Efremov, A.V. Glushkov, S.P. Knurenko, V.A. Kolosov, A.D. Krasilnikov, I.T. Makarov, A.A. Mikhailov, E.S. Nikiforova, V.A. Orlov, M.I. Pravdin, I.Ye. Sleptsov, N.I. Sleptsov and G.G. Struchkov: “Recent results from Yakutsk experiment”, in Proc. of the Tokyo Workshop on Techniques for the Study of the Extremely High Energy Cosmic Rays, ed. by Nagano (Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo, Tokyo, Japan), (1993) p.35.

¹⁷³ A.A. Watson: “A critique of the energy estimation made of ultra high energy cosmic rays detected by the Yakutsk array”, Proc. 28th ICRC, Tsukuba (Universal Academy Press) (2003) 373.

¹⁷⁴ V.P. Egorova, A.V. Glushkov, A.A. Ivanov, S.P. Knurenko, V.A. Kolosov, A.D. Krasilnikov, I.T. Makarov, A.A. Mikhailov, V.V. Olzoev, M.I. Pravdin, A.V. Sabourov, I.Ye. Sleptsov and G.G. Struchkov: “The spectrum features of UHECRs below and surrounding GZK”, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 136 (2004) 3.

¹⁷⁵ S.P. Knurenko, V.P. Egorova, A.A. Ivanov, V.A. Kolosov, I.T. Makarov, Z.E. Petrov, I.Ye. Sleptsov and G.G. Struchkov: “Characteristics of EAS and primary particle mass composition in the energy region of 10^{17} - 3×10^{19} eV by Yakutsk data”, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 151 (2006) 92.

¹⁷⁶ T. Matano, M. Nagano, K. Suga and G. Tanahashi: “Tokyo large air shower project”, Can. J. Phys., 46 (1968) S255.

法によりてっとりばやくエネルギー・スペクトルの曲がりを確認することにあつた。データ収集はテレビ中継機を利用したテレメータでおこなわれた。decoherence 法ではスペクトルの曲がり を明確に示すには至らなかつた。

1969 年頃からステーションを 1 台増やした図 4-6 のような配置で観測していたところ、1971 年に 4×10^{21} eV の宇宙線を観測したと発表した¹⁷⁷。世界中に大きな反響があつたが、大きな三角形のアレイの外に落ちたシャワーで、その横広がり分布の決定、結果としてサイズの決定に多くの異論がだされ、世界的に受け入れられるに至らなかつた。

明野観測所のデータを使用し、後に永野が解析したところ、 4×10^{21} eV は明らかに過大評価であるが、S(600)をエネルギー指標とする限り 10^{20} eV は下らないと評価した¹⁶⁶。

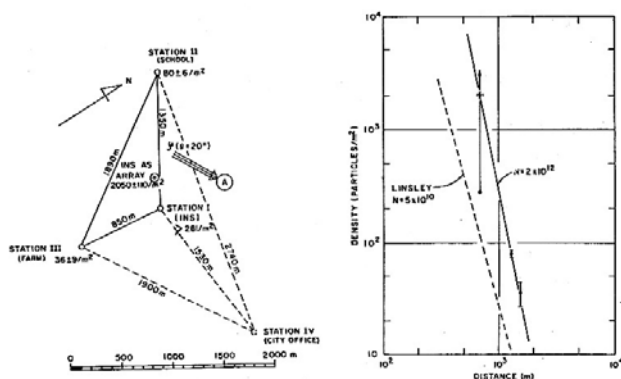


図 4-6 核研 Large array の検出器配置図(左)。検出器横の数字は最大エネルギーEAS の粒子数。A は芯の位置。その時の横広がり分布が右図に示されている¹⁷⁷。

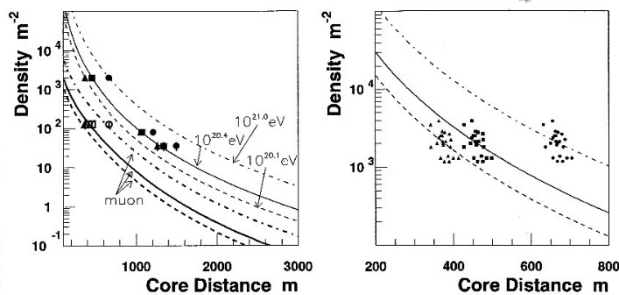


図 4-7 AGASA で決められた大シャワーの電磁成分とミュオン横ひろがり分布を地表レベルに変換し、INS-LAS の最大シャワーのエネルギーを推定したもの¹⁶⁶。左図は芯の位置を変えて横広がり分布にフィットしたもので、印の違いは芯の位置の違いを示す。黒印は電磁成分、白抜き印はミュオン成分。右図はそれぞれの芯の位置における INS-array の 1 m^2 シンチレーション検出器の分布。

¹⁷⁷ K. Suga, H. Sakuyama, S. Kawaguchi and T. Hara: "Evidence for a primary cosmic-ray particle with energy 4×10^{21} eV", Phys. Rev. Lett., 27 (1971) 1604. 菅浩一: 「大空気シャワーの発見」, 自然, (1972) 78.

第5章 空気シャワーの軌跡の撮像(蛍光観測法)

5.1 蛍光観測法の提案は乗鞍シンポジウム

EAS 中の陰陽電子が大気中の窒素分子や分子イオンを励起して発する蛍光を捕らえる。すなわち地球をとりまく大気を発光体として EAS を観測する可能性が初めて論じられ、記録に残っているのは、1958 年の夏に乗鞍岳で行われたシンポジウムである。菅浩一が「EAS の作る大きなイオン柱に電波をぶつけ、その反射波を観測する方法(以下レーダー法)」について発表した後の議論として記録されている¹⁷⁸。図 5-1 のように巨大な放物鏡で蛍光を集め、その焦点に光電子増倍管を並べて EAS を観測する方法(以下蛍光観測法)が議論された。

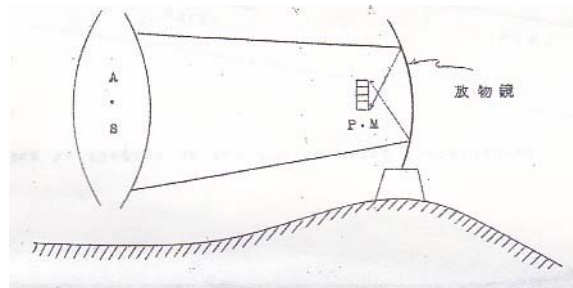


図 5-1 乗鞍シンポジウムで描かれた蛍光法による EAS 観測法¹⁷⁸

1 気圧の大気中での蛍光効率¹⁷⁹は、核研のサイクロトロン¹⁷⁹の陽子ビームを使って 1960 年に菅、棚橋によりおこなわれている。1 気圧で 320 nm 以上の光子数は 9.5 photons/MeV と報告されており¹⁷⁹、最新の値の約半分である。

1962 年にボリビア、ラパスでおこなわれた 5th Interamerican Seminar で、菅が蛍光観測法とレーダー法を提案した¹⁸⁰。面積 10 m² の鏡を使えば、100 km 遠方の 10¹⁹ eV のシャワーからの蛍光を S/N \sim 50 で観測できると推定している(レーダー法については 13.1 節参照)。この発表後の議論で、チュダコフ(A. Chudakov)は 1955 年 \sim 1957 年にかけて蛍光観測法の検討をおこなった結果をコメントした¹⁸⁰。天頂に向けた開口角 90 $^\circ$ の PMT を約 7 km 間隔で多数並べて観測する方法だが、実用になるのは 10²¹ eV 以上であり、チェレンコフ光による EAS 観測をおこなっていた装置(7.2 節参照)の延長で考察したのであろう。

5.2 コーネル大学の軌跡撮像方法の開発

実際に蛍光観測法による EAS 観測の実用化にとり組んだのは、グライセン(K. Greisen)のコーネル大学グループである。このコーネル大学の開発研究には、1962 年から 1964 年ま

¹⁷⁸ 村山喬：「乗鞍シンポジウム報告」，宇宙線研究 3, No.5 (1958) 449.

¹⁷⁹ 菅浩一：「一次宇宙線のエネルギー上限の観測」，第五回宇宙空間科学研究会報告(東京大学原子核研究所)(1964) p.1.

¹⁸⁰ K. Suga: "Methods for Observing Extremely Large Extensive Air Showers", Proc. 5th Interamerican Seminar on Cosmic Rays, La Paz, (eds. I. Escobar et al.), 2 (1962) XLIX-1.

で大阪市大の尾崎誠之助が，1964年から1966年まで核研の棚橋五郎が貢献した．バーナー(A.N. Bunner)は重陽子ビームによる空気の蛍光発光効率の測定をし、EASからの蛍光の測定法につき詳細に博士論文で論じている¹⁸¹．この論文は蛍光観測法のバイブルのように引用されている．

コーネル大学グループは，ニューヨーク州のイサカ近郊の丘(Mt. Pleasant)に15インチの光電子増倍管(PMT)(図5-2)を，垂直及び東西南北に向けて5本並べた装置を設置し，1964年から観測を開始した．一辺がそれぞれ11 km, 16 km, 12 kmの三角形の頂点となる場所に，1965年,1966年と第2, 第3ステーションを追加し，1967年まで観測が続けられた．観測されるデータはブラウン管上に記録されたが，波形の殆どが近くに入射したEASからのチェレンコフ光やその他の種々の光ノイズであり，明確なEASとして判定される事象は観測されず，この型の検出器の限界を示すものであった¹⁸²．

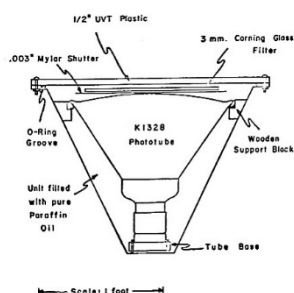


図 5-2 Mt. Pleasant とその近郊の 3 ステーションに設置された光電子増倍管ユニット。1ステーションで，このユニット 5 本をそれぞれ天頂，東西南北に向ける¹⁸²。

グライセンは1965年のロンドンで開催された宇宙線国際会議で，レンズ群とそれぞれの焦点においたPMTの組み合わせで天球を500に分割し，各PMTで信号のパルス幅と光子数，PMT間の到達時間差等を記録することにより，EASの軌道とシャワーのlongitudinal developmentを決定できることを示し，尾崎，棚橋の協力を得て小さな観測装置の準備を始めていることを発表した¹⁸³．コーネル大学では1965年末から装置の設計と製作が始まり，1966年の夏には25面のレンズをもった観測室(図5-3)が完成し，1967年から一部の装置で観測が開始された．不幸にも観測地イサカは天候に恵まれず，レンズも小さかった(直径60 cm)ため観測可能領域が狭く，EASの観測には至らなかった¹⁸⁴．しかしこの蛍光観測

¹⁸¹ A.N. Bunner: “Cosmic Ray Detection by Atmospheric Fluorescence”, Ph.D Thesis, Cornell University (1967).

¹⁸² 棚橋五郎: 「大気の蛍光観測による宇宙線実験の始まり．コーネルと日本での仕事」, 宮古短期大学研究紀要, 8 (1998) 1; 「空気シャワー観測の新側面」, 科学(岩波書店), 40 (1970) 294.

¹⁸³ K. Greisen: “Highlight in air shower studies, 1965”, Proc. 9th ICRC, London, Invited paper, (1965) 609.

¹⁸⁴ A.N. Bunner, K. Greisen and P.B. Landecker: “An imaging system for EAS optical

法の基本的設計は、後に米国ユタ大学のフライズ・アイ(蠅の目, Fly's Eye、以後 FE) として花開き、その後の蛍光観測法の基礎となっている。

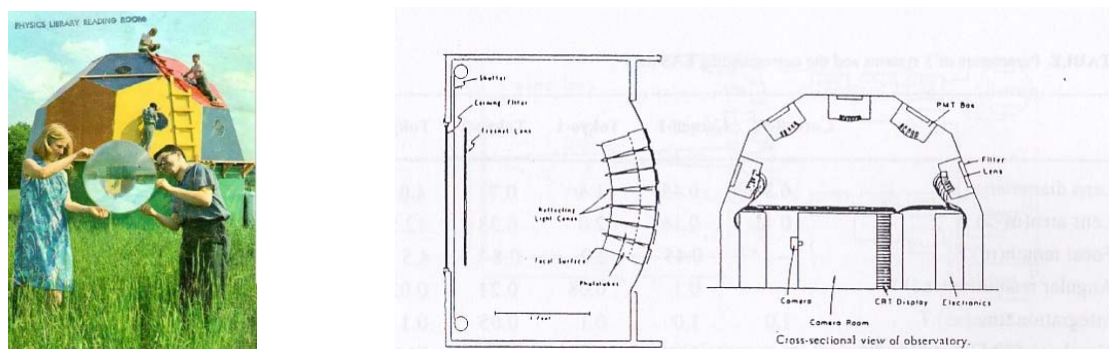
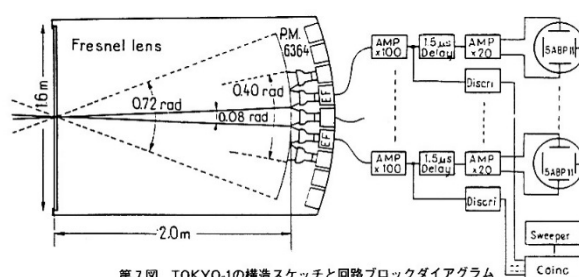
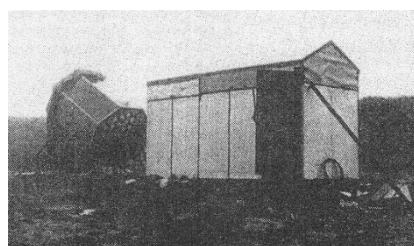


図 5-3 1967 年から稼働開始した、コーネル大学のイメージング型蛍光検出器ユニットと観測室内部の配置¹⁸²。天球をセグメントに分けて口径 60 cm のフレネル・レンズで集光し、EAS の軌跡を撮像する。

5.3 堂平山で世界で初めて空気シャワー軌跡をとらえる

5.3.1 堂平山での実験

コーネル大学から帰国した棚橋五郎を中心として、核研グループは、1968 年に埼玉県
の堂平山(海拔 876 m)の国立天文台堂平観測所¹⁸⁵の一角に、口径 1.6 m のフレネルレンズの焦
点に 27 本の光電子増倍管を並べた装置を設置した。天空の一部に限られるが、レンズの面
積がコーネルの約 10 倍、記録の時間分解能はコーネルの 1/10 にして、EAS 発達の初期の
段階を撮像しようとの目的であった¹⁸²。フレネルレンズはポリメタクリル酸メチル
(PMMA)有機ガラス板で、レンズは 1.6 mm ピッチで切削された。波長 300 nm 以上の光透
過率は約 90%である。



第 7 図 TOKYO-1の構造スケッチと回路ブロックダイアグラム

図 5-4 堂平山に設置された EAS からの蛍光観測装置¹⁸²。右はレンズと光電子増倍管アレイとの関係図と電子回路のブロック図。

emission”, Can. J. Phys., 46 (1968)10-S266.

¹⁸⁵ 現在はときがわ町に移管され、「星と緑の創造センター」の一部として活用されている。

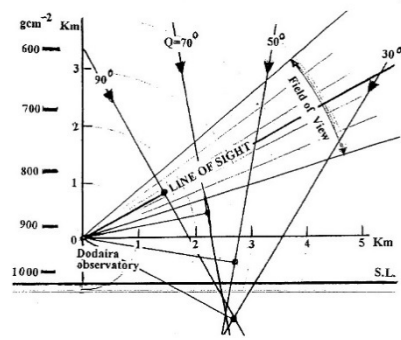
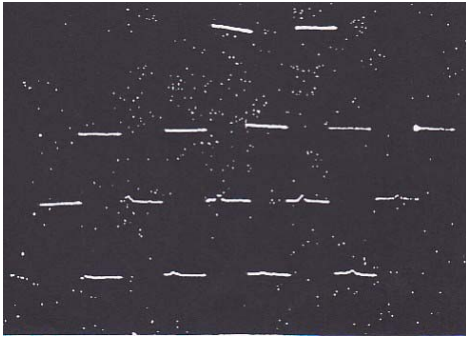


図 5-5 世界で初めて観測された蛍光による EAS のオッシロスコープ記録写真 (左) とその到来方向と芯からの距離の再構成図¹⁸⁶。

この大型レンズで光子を集めた結果、晴天、月の無い夜 90 時間に観測された 6000 事象のうち、エネルギーが約 10^{19} eV の宇宙線が観測された¹⁸⁶。視野角 18.4° にわたって 8 本の PMT を次々と $1.9 \mu \text{ sec}$ かけて横切り、それぞれの PMT の信号の大きさは殆ど変わらない(図 5-5 左)。すなわち EAS の角速度の大きさは $0.08 \text{ rad}/0.45 \mu \text{ sec}$ で、視線方向と直角に入射したとすると、シャワー軸までの距離は 1.7 km に相当し、大気深さは 800 g/cm^2 以上となる。信号の大きさが空気層約 100 g/cm^2 相当の間変わっていないことは、視線方向でシャワーの発達がほぼ最大になっている箇所を観測していることを示す。時間差と信号の大きさの変化を同時に満足するのはチェレンコフ光でなく、2.6 km 遠方に天頂角がほぼ垂直に通過した EAS の軌跡であることを示し(図 5-5 右)、世界で初めて蛍光法で EAS の観測に成功した。

この堂平山の事象は、後にチェレンコフ光ではないかとの批判も出されたが、2011 年にドーソン(B.R. Dawson)等による再解析の結果、信号の大きさの変化は蛍光でなければ説明できないとして、原等の結果を支持している¹⁸⁷。

全天観測を可能にするために、1970 年にコーネル型の装置(図 5-3)に変更して約 82 時間の観測が行われた。ただし、レンズの直径は 70 cm、時間分解能を $0.05 \mu \text{ sec}$ と、コーネルの装置と比べて受光量は 1.4 倍、時間分解能は 20 分の 1 であり、S/N が向上されている。約 13,000 事象の中で、明らかな蛍光のみの事象は観測されなかった。しかし EAS のシャワー軸から約 30 度以内のチェレンコフ領域から 30 度以上の蛍光領域へと広がっているシャワーが 7 例観測され、EAS からの蛍光量がバーナーの測定した $4.6 \text{ photons/m} \cdot \text{electron}$ が実験的に確認される第一歩となった¹⁸⁸。

¹⁸⁶ T. Hara, F. Ishikawa, S. Kawaguchi, Y. Miura, M. Nagano, K. Suga and G. Tanahashi: "Detection of the Atmospheric Scintillation Light from Air Showers", Acta Phys. Acad. Sci. Hung., Suppl. 3, 29 (1970) 369.

¹⁸⁷ B.R. Dawson: "Comment on a Japanese detection of fluorescence light from a cosmic ray shower in 1969", arXiv:submit/0386903[physics_hist_ph] 24 Dec. 2011.

¹⁸⁸ 原忠生:「光による空気シャワーの研究」, 博士論文, 大阪市立大学 (1978)

5.3.2 伊豆での実験

棚橋五郎，原忠生等は，EAS 発達の初期の段階を精度よく追跡する目的で，集光面積

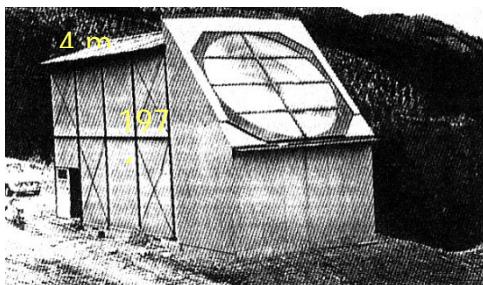


図 5-6 伊豆での 4 m フレネルレンズを設置した観測室概観¹⁸²

の拡大を目指し，直径 4 m のフレネル・レンズを製作し，1973 年から伊豆で観測を開始した．下田から約 10 km 離れた南伊豆町青野で，レンズは南方向の海に向けて設置された．予備観測を始めた直後，レンズが紫外線を通さないという予期しなかった状況が明らかになり，蛍光観測は断念された．棚橋は「この障害，災難は致命的な製造管理のミスによっておこった．レンズに使用したプラスチック材質仕様のルーズな指定がそのミスである．使われた材料はほぼ 400 nm 以上で透過率が 90%以上となる一般の紫外線遮断剤が入ったものが使用されたことが原因だった．」と反省を込めて書いている¹⁸²．

もし紫外線遮断剤が入っていないレンズであったら，華々しい成果があったことが予測され，惜しまれる実験であった．

5.3.3 シドニー大学 SUGAR との連動実験

堂平山で観測された蛍光による EAS 観測の確証を得るために，棚橋はオーストラリアに赴き，SUGAR 空気シャワーアレイとの連動実験を 1973 年の 10 月から 1974 年の 5 月までおこなった¹⁸⁹．直径 1.6 m のフレネル・レンズの焦点に，12 個の PMT を 2 段に並べ，水平から 26 度と 34 度の方向を $4.6^\circ \times 27.6^\circ$ の視野で観測する．装置は SUGAR の中央部 0.25 mile array の中心から約 1.3 km 離れた場所に設置された．293 時間の観測中，装置から 0.4 km～2.1 km 離れた場所に，17 事象がアレイと望遠鏡で同時に観測された．エネルギーは $4 \times 10^{16} \sim 7.4 \times 10^{17}$ eV である．2 事象に蛍光として期待値と合致する時間経過と信号が見られたが，S/N がギリギリのレベルであり，蛍光観測としての確証は得られなかった．チェレンコフ光を避けるために，シャワー軸とほぼ直角方向のシャワーを見ているため，海面レベルに近い SUGAR では，シャワー最大発達地点を過ぎており，シャワー粒子数がかなり減衰し，観測される蛍光数が少なすぎたことが原因だったと考えられる．

¹⁸⁹ G. Tanahashi, L. Goorevich, L. Horton, C.B.A. McCusker, P. Rapp and M.M. Winn; "Atmospheric scintillation light from EAS", Proc. 14th ICRC, Munich, 12 (1975) 4385.

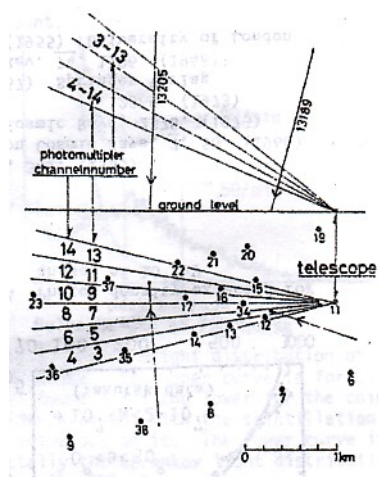


図 5-7 望遠鏡の視野と SUGAR 検出器との幾何学的関係¹⁸⁹。側面図と上面図で、黒点は地下検出器の場所と検出器番号。実線は PMT それぞれの視野を示す。13189 と 13205 は蛍光事象候補の到来方向を示す。

5.4 フライズ・アイ (蠅の目, Fly's Eye, FE)

5.4.1 ヴォルカノ・ランチ・アレイとの連動による蛍光法の実証実験

米国ユタ大学グループは1973年頃から天球を蠅の目のようにモザイク状にわけるグライセンの観測方法の技術開発に取り組み、フライズ・アイ (FE) のプロトタイプを製作し、1976年からヴォルカノ・ランチの EAS アレイとの連動をおこなった。この同時観測で蛍光法により宇宙線を捕らえる手法の有効性を実証した¹⁹⁰。

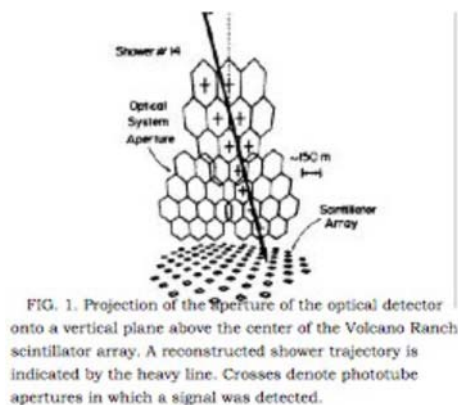


図 5-8 地表アレイの上に降ってきた EAS を蛍光観測で同時に捕らえた事象。太線が光電子増倍管の信号から構築されたシャワーの軌跡¹⁹⁰

¹⁹⁰ H.E. Bergeson, G.L. Cassiday, T.W. Chiu, D.A. Cooper, J.W. Elbert, E.C. Loh, D. Steck, W.J. West, J. Linsley and G.W. Mason: "Measurement of Light Emission from Remote Cosmic-Ray Air Showers", Phys. Rev. Lett., 39 (1977) 847.

5.4.2 ダグウェイでの FE I と FE II のステレオ観測

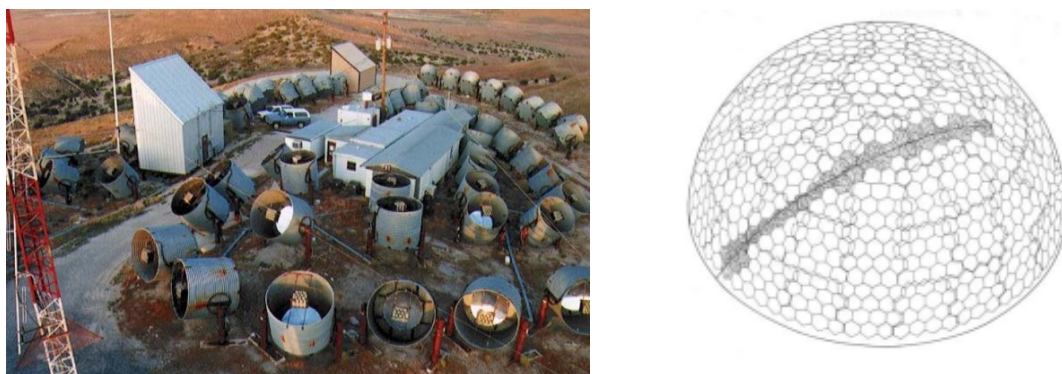


図 5-9 Fly's Eye I の全景(左図)¹⁹¹. 大きなドラム缶のような容器の底に反射鏡がおかれ、その焦点に光電子増倍管アレイが配置されている。写真撮影のために内部が見えるようにしてあるが、通常は日中太陽光が入らないように、装置はさかさまにされる。観測された光電子増倍管の信号からシャワーの軌跡を描いたもの(右図)¹⁹².

この予備実験の成果に基づき、ソルトレーク市の南西約 160 km のところにあるダグウェイの小高い丘の上 2 箇所に、フライズ・アイ I (FE I) とフライズ・アイ II (FE II) が建設された¹⁹². ここは軍用地であり、入口の検問所で審査を受けないと入れない、極めて安全な場所として選ばれたとのことである. FE I は直径 1.6m の反射鏡 67 枚の各焦点に 12~14 本の PMT が取り付けられ、それぞれが約 5.5 度の視野を覆い、合計 880 本の PMT で全天を観測するものである. 図 5-9 の左図に示すように、反射鏡はそれぞれドラム缶のような容器に入れられ、昼間は太陽光を避けるためにさかさまにされる. それぞれ PMT で受光量の大きさと光の到達時間が記録される. 光が閾値以上に入射した PMT を全天に投影すると、図 5-9 の右図のように EAS の軌跡が描かれる.

FE II は 36 枚の反射鏡、総計 464 本の PMT で全天の半分を観測する. FE I から 3.4 km 離れた場所に視野を FE I に向けて配置された. すなわち FE I の一部の視野を同時観測し、ステレオで観測することにより、エネルギーと到来方向の決定精度をあげる目的である.

1981 年から建設が始まり、1986 年 11 月から 1992 年まで観測がおこなわれた. PMT の受光量からその視野での EAS の粒子数を推定するには、粒子の空気中での蛍光発光量、PMT に達するまでの蛍光の減衰量、観測装置の光学システムの較正が必要である. 1994 年に FE I によるエネルギースペクトルを発表した¹⁹³. 図 5-10(左)に示すように GZK 上限

¹⁹¹ P. Sokolsky: "UHE Cosmic Rays: Setting the Stage", Slides at Int. Symp. on Future Directions in UHECR Physics, Feb. 2012 at CERN.

¹⁹² R.M. Baltrusaitis, R. Cady, G.L. Cassiday, R. Cooper, J.W. Elbert, P.R. Gerhardy, S.Ko, E.C. Loh, M. Salamon, D. Steck and P. Sokolsky: "The Utah Fly's Eye Detector", Nucl. Instrum. Methods, A 240 (1985) 410.

¹⁹³ D. Bird, S. Colbato, H.Y. Dai, R.B. Dawson, J.W. Elbert, B.L. Emerson, K.D. Green,

の存在が見られるが、 2σ であり、上限の存在についてはより統計が必要であると慎重な表現をしている。この発表が観測時期より大幅に遅れた理由は、光学システムのキャリブレーション¹⁹⁴、天候のモニタリング¹⁹⁵などの確立に時間を要したからである。観測方法、較正方法、解析方法について地道な開発は、以後の蛍光法観測の基礎となっている。

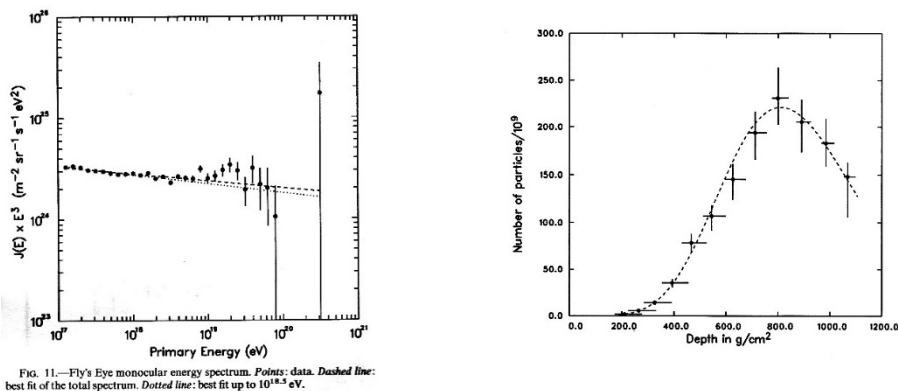


Fig. 11.—Fly's Eye monocular energy spectrum. Points: data. Dashed line: best fit of the total spectrum. Dotted line: best fit up to $10^{18.5}$ eV.

図 5-10 FE I のみで決めたエネルギースペクトル¹⁹³(左図)。 6×10^{18} eV でスペクトルの冪が変化し(dip と呼ばれる)、 4×10^{19} eV 以上に上限が見える。エネルギー 3.2×10^{20} eV に、これまでの最大エネルギーの宇宙線 EAS が観測されている。右図はその EAS の発達カーブ¹⁹⁷。

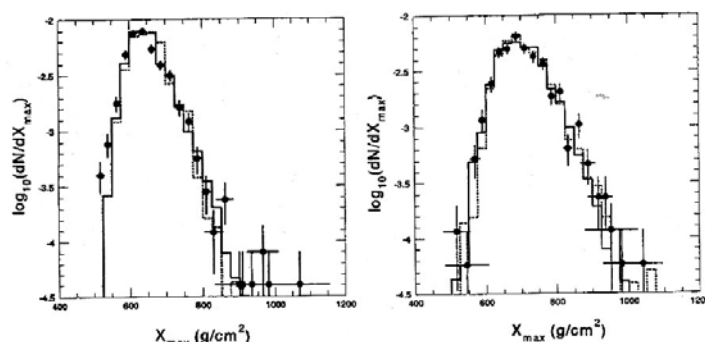


FIG. 30. Comparison of the experimental X_{\max} distribution with the fitted Monte Carlo distributions for energies (left) $(0.3-0.5) \times 10^{18}$ eV and (right) $\geq 10^{18}$ eV: solid histograms, OCD pomeron model; dotted histograms, minijet model. Fraction of protons are (left) 0.21 (OCD pomeron)-0.12 (minijet), and (right) 0.43-0.39. From Gaisser *et al.*, 1993.

図 5-11 エネルギー $(0.3-0.5) \times 10^{18}$ eV(左)と 10^{18} eV 以上(右)のシャワーの X_{\max} 分布。実

M.A. Huang, D.B. Kieda, M. Luo, S. Ko, C.G. Larsen, E.C. Loh, M.H. Salamon, J.D. Smith, P. Sokolsky, P. Sommers, J.K. Tang and S.B. Thomas : "The Cosmic-Ray Energy Spectrum Observed by the Fly's Eye", Ap. J. 424 (1994) 491.

¹⁹⁴ D. Bird, S. Colbato, H.Y. Dai, J.W. Elbert, M. Kidd, D. Kieda, E.C. Loh, P. Sokolsky, P. Sommers, J.K. Tang, S.B. Thomas, L. Wiencke, Q. Zhu : "The calibration of the absolute sensitivity of photomultiplier tubes in the High Resolution Fly's Eye Detector", Nucl. Instrum. Methods, A 349 (1994) 592.

¹⁹⁵ P. Sokolsky: "Sky Noise and Atmospheric Transmission", in Proc. of the Tokyo Workshop on Techniques for the Study of Extremely High Energy Cosmic Rays, ed. by M. Nagano (ICRR, U. of Tokyo, Tokyo, Japan) (1993) p.280.

験で求めた X_{\max} 分布に最もよく合うように、三つの核反応モデルでシミュレーションのそれぞれで、一次宇宙線の陽子の割合を変えたヒストグラム¹⁹⁶。

蛍光観測法の特徴の一つは、EASの発達カーブを測定し、その最大発達の深さ(X_{\max})を決定できることである。 X_{\max} やその変動の広がり是一次宇宙線の組成と密接に関係する。FEではこれらの測定をシミュレーションと比較することにより、その組成を推定した¹⁹⁶。しかし図に示すように、組成は一次宇宙線の核相互作用のモデルに依存しており、一次宇宙線の陽子の割合は0.12から0.43まで変わる。

1995年に、この上限をはるかに超えるこれまでの最高エネルギーの宇宙線(3.2×10^{20} eV)の観測が発表された¹⁹⁷。図5-10の右図はこのEASの発達カーブである。この事象のエネルギーはその後測定された大気中の発光効率の結果を使っても殆ど変わっていない。

X_{\max} の分布の裾は指数関数的 $\exp(-X_{\max}/\lambda)$ に減少する。この λ は大気深く突っ込んできた陽子と空気核との非弾性衝突断面積(σ_{p-Air})を反映する。この λ の値から $\sqrt{s}=30$ TeVで $\sigma_{p-Air}=530 \pm 66$ mbを得、この値からp-p全衝突断面積 $\sigma_{pp}^{tot}=120 \pm 5$ mbを導出した¹⁹⁸。

5.5 High-Resolution Fly's Eye (HiRes)

FEの詳細な最終結果の公表は1993-4年と遅れたが、結果を更に精度をあげて検証すべく、1990年頃からHigh-Resolution Fly's Eye(HiRes)の検討が始まった^{199, 200}。当初計画では一辺が15 kmの三角形の各頂点に同じステーションを三か所配置する予定であったが、後に2ステーションHiRes IとHiRes IIに変更された。

HiRes Iの球面反射鏡1素子は4枚の鏡を四葉のクローバ型にとりつけたもので、有効直径は約2 mである。それぞれの焦点には256(16×16)本のPMTで構成される撮像カメラが設置された。1本のPMTは約1°四方の天空をカバーする。22素子がリング状に並べられ、方位は 2π を覆うが、仰角は3°から17°までしか観測できない。従って X_{\max} を観測で

¹⁹⁶ T.K. Gaisser, T. Stanev, S. Tilav, S. Colbato, H.Y. Dai, B.R. Dawson, B. Emerson, J.W. Elbert, D. Kieda, M. Luo, S. Ko, C. Larsen, E.C. Loh, M.H. Salamon, J.D. Smith, P. Sokolsky, P. Sommers, J.K. Tang, S.B. Thomas and D.J. Bird: "Cosmic-ray composition around 10^{18} eV", Phys. Rev. D, 47 (1993) 1919.

¹⁹⁷ D. Bird, S. Colbato, H.Y. Dai, J.W. Elbert, K.D. Green, M.A. Huang, D.B. Kieda, S. Ko, G. Larsen, E.C. Loh, M.Z. Luo, M.H. Salamon, J.D. Smith, P. Sokolsky, P. Sommers, J.K. Tang and S.B. Thomas: "Detection of a Cosmic Ray with Measured Energy Well Beyond the Expected Spectrum Cutoff Due to Cosmic Microwave Radiation", Astrophys. J., 441 (1995) 144.

¹⁹⁸ R.M. Baltrusaitis, G.L. Cassiday, J.W. Elbert, P.R. Gerhardy, S. Ko, E.C. Loh, Y. Mizumoto, P. Sokolsky and D. Steck: "Total Proton-Proton Cross Section at $s^{1/2}=30$ TeV", Phys. Rev. Lett., 52 (1984) 1380.

¹⁹⁹ E.C. Loh, Fly's Eye group: "High Resolution Fly's Eye Detector", Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.), 14 (1990) 256.

²⁰⁰ E.C. Loh et al.: "The High Resolution Fly's Eye Detector", in Proc. of ICRR Int. Symp. on Astrophysical Aspects of the Most Energetic Cosmic Rays, ed. by M. Nagano and F. Takahara (World Scientific) (1991) p.345

きるシャワーのみ選択するには、遠方に落ちた 10^{19} eV 以上のシャワーに限られることになる。HiRes II は HiRes I から 12.6 km 離れた地点に設置された。42 素子が 2 つのリング状に並べられ、仰角 3° から 31° を覆うので、より近傍に落ちた $10^{17.2}$ eV 以上のシャワーから観測できる。

先ず HiRes I が 14 素子、HiRes II が 4 素子から成る HiRes prototype と、すでに稼働中であったシカゴ大学の地表アレイ CASA、ミシガン大学の地下ミュオン検出器アレイ MIA との連動実験が 1992 年から 1996 年まで実施された²⁰¹。 10^{17} eV から 3×10^{18} eV でのエネルギー・スペクトルは FE の結果をより低いエネルギーに伸ばし、新しく 4×10^{17} eV における 2nd knee が存在することを支持する結果を得た²⁰²。一次宇宙線の組成は、 X_{\max} のエネルギー依存性と、芯から 600 m でのミュオン密度のエネルギー依存性の結果をシミュレーションと比較することにより、両者共、その elongation rate の変化はこのエネルギー間で化学組成が重い核からより軽い核へと変化していることを示した²⁰³。ただしミュオン密度の絶対値は、どのモデルによるシミュレーションでも、 10^{17} eV 近辺で、鉄で期待される値より大きくなる。この実験は地表アレイと蛍光望遠鏡のハイブリッド観測の先駆けであった。

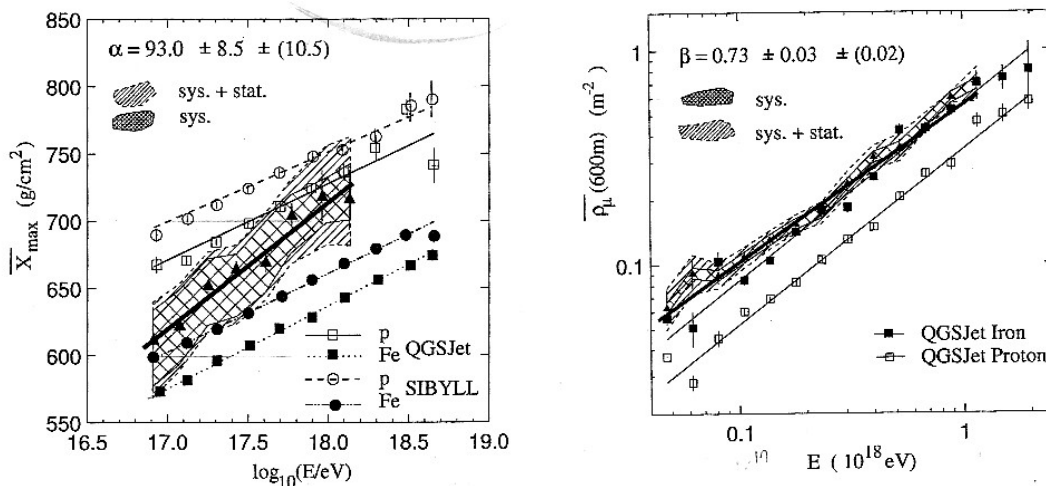


図 5-12 HiRes-prototype, CASA, MIA のハイブリッドで決めた X_{\max} と、芯から 600 m でのミュオン密度のエネルギー依存性²⁰³。

²⁰¹ D.J. Bird et al. (HiRes prototype+CASA+MIA collaboration): “Coincident Observation of Air Showers by the HiRes Prototype and CASA/MIA Experiments”, Proc. 23rd ICRC, Calgary, 4 (1993) 283.

²⁰² T. Abu-Zayyad et al. (HiRes prototype+CASA+MIA collaboration): “Measurement of the Cosmic Ray Flux and Composition from 10^{17} to $10^{18.3}$ eV Using a Hybrid Fluorescence Technique”, Astrophys. J. 557 (2001) 686.

²⁰³ T. Abu-Zayyad et al. (HiRes prototype+CASA+MIA collaboration): “Evidence for Changing of the Cosmic Ray Composition between 10^{17} and 10^{18} eV from Multicomponent Measurements”, Phys. Rev. Lett., 84 (2000) 4276.

1994年にHiResの予算がNSFで承認され、1995年に建設が始まった。HiRes Iの全体が完成し、稼働が開始されたのは1997年6月である²⁰⁴。HiRes IIの稼働開始は1999年で、両者による観測は2006年までおこなわれた。HiRes IとHiRes IIの視野角の関係を図5-13の左に示す。また同じシャワーをそれぞれで決めたlongitudinal developmentの例を同図の中央と右に示す¹⁹¹。

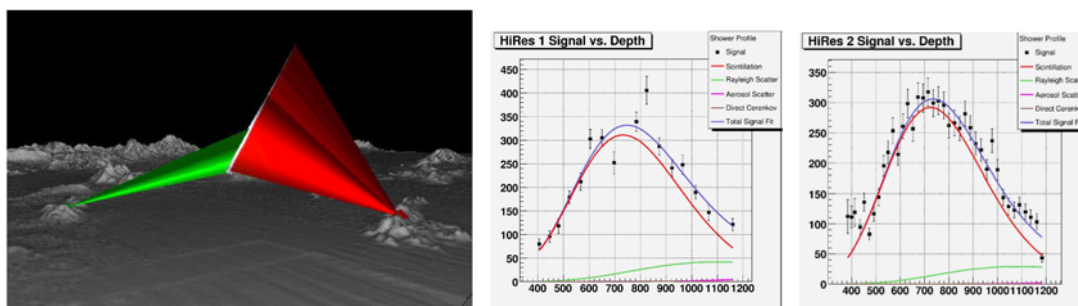


図 5-13 HiRes I(緑)とHiRes II(赤)の視野角の関係(左)¹⁹¹。HiRes IとHiRes IIによるlongitudinal developmentの例を中央と右に示す。

図5-14はHiRes I, HiRes IIそれぞれで決めた(monocular)エネルギー・スペクトルと両者で決めた(stereo)スペクトルである²⁰⁵。ステレオで決めたスペクトルはエネルギー分解

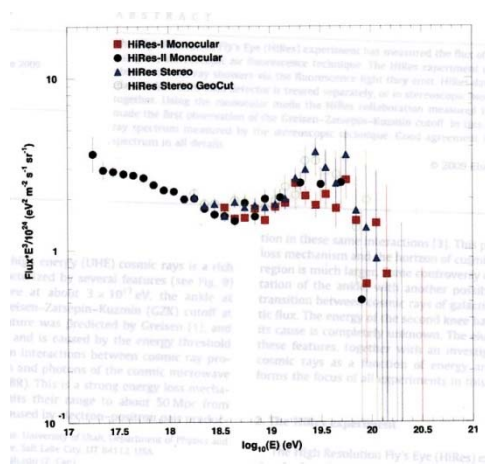


図 5-14 HiRes I, HiRes IIそれぞれで決めたエネルギー・スペクトルと、ステレオ観測で決めたスペクトル(▲)²⁰⁵。

²⁰⁴ T. Abu-Zayyad et al. (HiRes collaboration): “Status of the High Resolution Fly’s Eye Detector: Operation and Installation”, Proc. 26th ICRC, Salt Lake City, 5 (1999) 349.

²⁰⁵ R.U. Abbasi et al. (High Resolution Fly’s Eye Collaboration): “First Observation of the Greisen-Zatsepin-Kuzmin Suppression”, Phys. Rev. Lett., 100 (2008) 101101.
R.U. Abbasi et al. (High Resolution Fly’s Eye Collaboration): “Measurement of the flux of ultra high energy cosmic rays by the stereo technique”, Astropart. Phys., 32 (2009) 53.

能が良い。スペクトルを決定するには、Aperture を決定する必要がある、これは一次宇宙線の組成などに依存する。GeoCut とあるのは、より制限された視野角内に入った事象のみのスペクトルで、大気透明度の変化やその他の系統誤差に殆ど依存しない。結果は 4×10^{18} eV に ankle, 6×10^{19} eV にカットオフ(5.3 σ)があり、GZK カットオフの予想と一致している。

ステレオ観測で決められた X_{\max} の深さ分布を図 5-15(左)に示す²⁰⁶。 $10^{18.2}$ eV から $10^{19.8}$ eV のシャワーを使用している。HiRes I, HiRes II のそれぞれで決めた X_{\max} の差分布から、 X_{\max} の決定誤差は 25 g/cm^2 以下と推定された。QGSJET 相互作用モデルを使い、実験にともなう系統誤差を含めたモンテカルロ・シミュレーションによる X_{\max} 分布(ヒストグラム)と比べたもので、左上の図が一次宇宙線は全て陽子としたもの、左下が鉄としたものである。殆どが陽子とする分布に合致する。右図はエネルギー毎の分布の平均値のエネルギー依存性を、シミュレーションによる依存性と比べたものである。比較した 3 つの相互作用モデルのどれでも陽子とする結果を支持する。

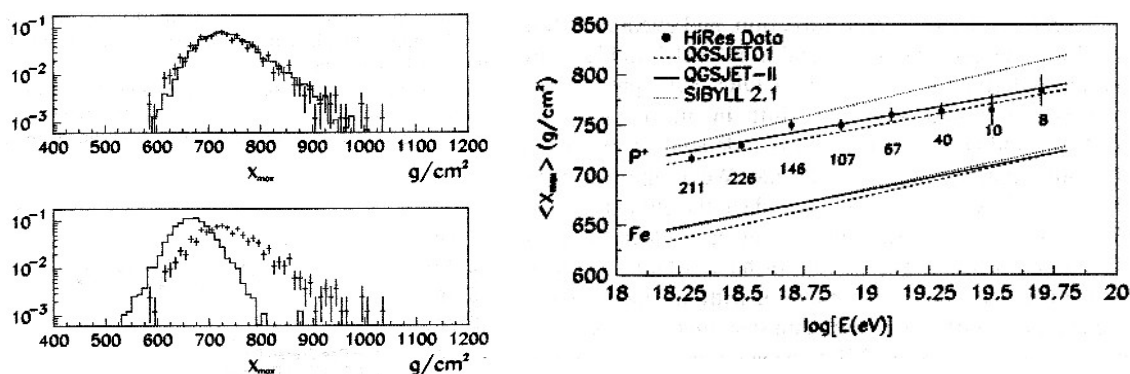


図 5-15 ステレオ観測で決められた X_{\max} の深さ分布(誤差付の十字)をモンテカルロシミュレーションの結果(ヒストグラム)と比べたもの²⁰⁶。左上が陽子、左下が鉄。右図は分布の平均値のエネルギー依存性。

Auger Group が 5.6×10^{19} eV を超える宇宙線の到来方向が、南半球で見える近傍の AGN ($z < 0.018$, 約 75 Mpc) の方向と相関があると発表²⁰⁷したのをを受けて、HiRes で観測された宇宙線 (1.58×10^{19} eV 以上) の到来方向と北半球の近傍 AGN と QSO ($z < 0.016$) との相関が調べられたが、有意な相関は見つからなかった²⁰⁸。

²⁰⁶ R.U. Abbasi et al. (High Resolution Fly's Eye Collaboration): "Indication of Proton-Dominated Cosmic-Ray Composition above 1.6 EeV", Phys. Rev. Lett., 104 (2010) 161101.

²⁰⁷ J. Abraham et al. (The Pierre Auger Collaboration): "Correlation of the Highest-Energy Cosmic Rays with Nearby Extragalactic Objects", Science, 318 (2007) 938.

²⁰⁸ R.U. Abbasi et al. (High Resolution Fly's Eye Collaboration): "Search for correlations between HiRes stereo events and active galactic nuclei", Astropart. Phys., 30 (2008) 175.

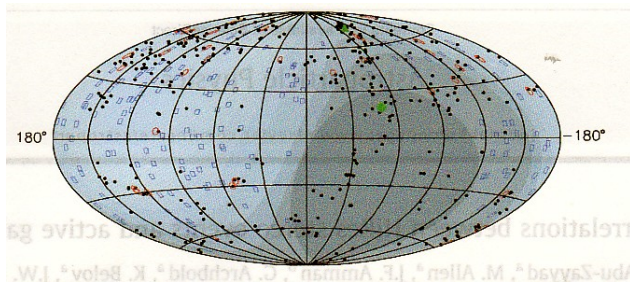


図 5-16 黒・が 389 個の AGN と 14 個の QSO ($z < 0.016$)。赤い○が AGN と QSO から 2° 以内の視野角に入った 36 個の宇宙線の到来方向。青の□が 162 個の相関の無い宇宙線の方向²⁰⁸。

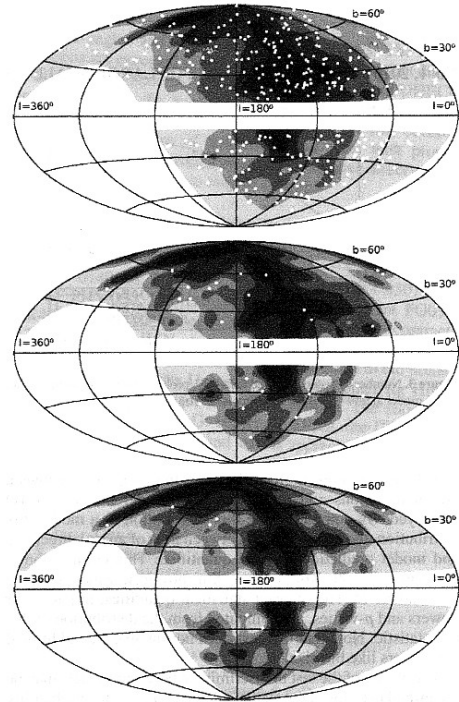


図 5-17 (右図) 白点が宇宙線の到来方向で、上から 10, 40, 60 EeV 以上。色が濃いほど HiRes の露出を考慮した Matter density が多い方向を示す²⁰⁹。

GZK cutoff が存在するならば、60 EeV を超える宇宙線の起源は比較的近傍に限られ、銀河系内、外の磁場による偏向も小さく、それらの到来方向分布は銀河の局所的な(約 250 Mpc 以内)大規模構造(large scale structure, LSS)を反映した非等方性が期待される。エネルギー 10, 40, 60 EeV 以上の宇宙線の到来方向との相関が調べられたが、有意な相関は検出されておらず、等方分布と矛盾しない²⁰⁹。

ステレオデータのみ使用し、 X_{\max} の分布の裾から求めた $\lambda = 52.88 \pm 1.98 \text{ g/cm}^2$ から、FE より一桁エネルギーの高い $10^{18.5} \text{ eV}$ での p-Air 非弾性衝突断面積を求めた。結果は $\sigma_{\text{p-Air}} = 456 \pm 17(\text{stat}) + 39(\text{sys}) - 11(\text{sys}) \text{ mb}$ と小さい²¹⁰。

大気を $10,000 \text{ g/cm}^2$ 以上突っ込んだニュートリノが空気核と衝突しシャワーを発生し、遠方を水平に横切る down-going shower や、地球の表面をかすめた τ ニュートリノが岩石中で相互作用し発生した τ 粒子が空中に飛び出しハドロンシャワー(up-going shower)として観測される可能性がある。このようなシャワーは蛍光観測が適しており、HiRes による観測結果は 10.3.2 節で述べる。

²⁰⁹ R.U. Abbasi et al. (High Resolution Fly's Eye Collaboration): "Analysis of Large-Scale Anisotropy of Ultra-High Energy Cosmic Rays in HiRes Data", *Astrophys. J. Lett.*, 713 (2010) L64.

²¹⁰ K. Belov for the HiRes Collaboration: "p-Air cross-section measurement at $10^{18.5} \text{ eV}$ ", *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)*, 151 (2006) 197.

5.6 蛍光発光効率の測定

宇宙線のエネルギー・スペクトルについて、FEの結果はGZK上限が「あり」、第6章で述べるようにAGASA結果が「ない」と食い違っていた。この差の原因として、FEではバーナーによる蛍光発光効率¹⁸¹を使用していたが、その値の誤差は±30%であることによるのが一因ではないかと考えられた。そこで東京大学原子核研究所の電子シンクロトロンを使用して、AGASAとFEの関係者が協力してより精度よく測定することが企画された。

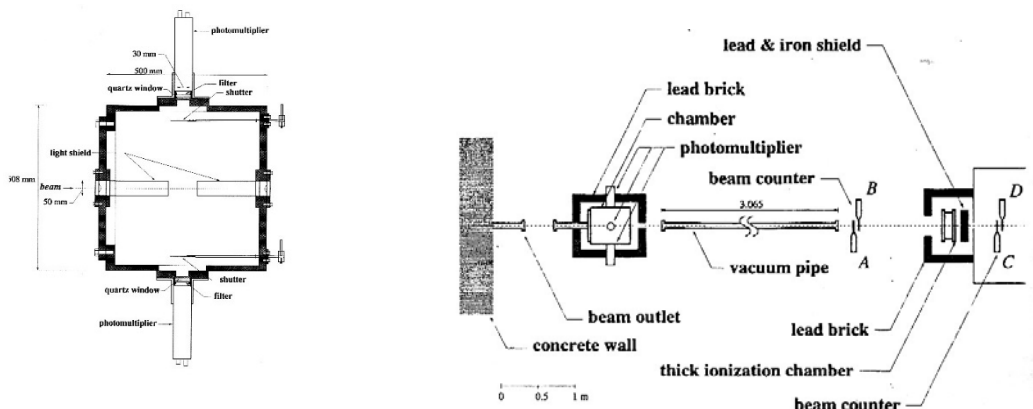


図 5-18 真空から1気圧まで、蛍光発光効率測定に使用されたチェンバー(左図)と、加速器による実験装置の概念図²¹¹。左方から電子ビームを通し、チェンバーの側面にとりつけた光電子増倍管で蛍光を計測する。

$^{90}\text{Sr} \rightarrow ^{90}\text{Y} \rightarrow ^{90}\text{Z}$ の崩壊で放出される最大エネルギー2.28 MeVの β 線(平均エネルギー1.4 MeV)と加速器による300, 650, 1000 MeVビームによる測定である(図5-18)²¹¹。波長337.1, 357.7, 391.4 nmでバンド幅10 nmのフィルターと、FE実験で使用された300~400 nmのワイドバンドのフィルターが用いられた。発光効率は1.4 MeVから1000 MeVまでエネルギー損失に比例することが示され、発光効率の気圧、温度の関数式がEAS実験に適用しやすい形で決定された。系統誤差は約10%である。

このKakimoto et al.の測定はnarrow bandでは3波長に限られたので、ほぼ同じ手法により、福井工大で14波長について測定が実施された²¹²。2001年に最初の結果が宇宙線国際会議で報告²¹³されたが、気圧依存性の小さい1st negative bandの391.4 nmでの発光効率がKakimoto et al.の測定の半分しかないことが示され、この値が遠方のシャワーのエネルギー推定に影響を与えることから反響を呼び、その他のバンドでもより精度よい蛍光発光

²¹¹ F. Kakimoto, E.C. Loh, M. Nagano, H. Okuno, M. Teshima and S. Ueno: "A measurement of the air fluorescence yield", Nucl. Instrum. Methods, A 372 (1996) 527.

²¹² M. Nagano, K. Kobayakawa, N. Sakaki and K. Ando: "Photon yields from nitrogen gas and dry air excited by electrons", Astropart. Phys., 20 (2003) 293.; "New measurement on photon yields from air and the application to the energy estimation of primary cosmic rays", Astropart. Phys., 22 (2004) 235.

²¹³ M. Nagano, K. Kobayakawa and N. Sakaki: Proc. 27th ICRC, Hamburg, (2001) 675.

効率の測定の必要性が認識され、世界中で 10 グループ以上が発光効率の精密測定に取り組むようになった。

2002 年に米国ユタ大学で第 1 回 “Fluorescence Workshop on Air Fluorescence” が開催され、その後毎年のように開催されたワークショップで、測定値が比較され、かつ問題点が議論された。2011 年ドイツ、カールスルーエで開催された第 8 回のワークショップ²¹⁴で測定データがほぼ出そろい、EAS 観測に適用すべく、蛍光効率の気圧、温度、湿度依存性について精密な測定値がまとまったといえる²¹⁵。

なお EAS 観測に必要な蛍光の測定に関する 2000 年までの歴史的レビューについては F. Arqueros²¹⁶に詳しい。

福井工大以降の主たる測定を列挙すると、スタンフォードの線形加速器の 28.5 GeV 電子ビームを使って測定した FLASH 実験²¹⁷、CERN の SPS-electron-test beam からの 50 GeV 電磁シャワーを使って測定した MACFLY 実験²¹⁸、⁹⁰Sr を使った精密実験としてはパリのフランス国立科学研究センター(CNRS)グループ²¹⁹、ドイツ・カールスルーエ研究センター(FZKA)グループ²²⁰があげられよう。中でも最も精度の高いのは国際共同の AIRFLY グループの結果で、各波長の気圧依存性の相対値について²²¹、各波長の温度、湿度依存性について²²²、337 nm の絶対強度の精密測定について²²³それぞれ公表されている。図 5-19 に AIRFLY により測定された蛍光スペクトル²²¹の例を示す。Pierre Auger Observatory では 2013 年の宇宙線国際会議からエネルギー・スペクトルの決定に AIRFLY の結果を採用して

²¹⁴ <http://www.kceta.kit.edu/8afw2011>

²¹⁵ まとめについては、B. Keilhauer: “Nitrogen fluorescence in air for observing extensive air shower”, slides presented at Int. Symp. on Future Direction in UHECR Physics, CERN, (2012).

²¹⁶ F. Arqueros, J.R. Hörandel and B. Keilhauer: “Air Fluorescence relevant for cosmic-ray detection – Review of pioneering measurements”, Proc. 5th Fluorescence Workshop, Nucl. Instrum. Methods, A 597 (2008) 23.

²¹⁷ R. Abbasi et al. (FLASH Collaboration): “Air fluorescence measurements in the spectral range 300-420 nm using a 28.5 GeV electron”, Astropart. Phys., 29 (2008) 77.

²¹⁸ P. Colin et al. (MACFLY Collaboration): “Measurement of air-fluorescence-light yield induced by an electromagnetic shower”, Astropart. Phys., 30 (2009) 312.

²¹⁹ G. Lefeuvre, P. Gododetzky, J. Dolbean, T. Patzak and S. Salin: “Absolute measurement of the nitrogen fluorescence yield in air between 300 and 430 nm”, Nucl. Instrum. Methods, A 578 (2007) 78.

²²⁰ T. Waldenmaier, J. Blümer and H. Klages: “Spectral resolved measurement of the nitrogen fluorescence emissions in air induced by electrons”, Astropart. Phys., 29 (2008) 205.

²²¹ M. Ave et al. (AIRFLY Collaboration): “Measurement of the pressure dependence of air fluorescence emission induced by electrons”, Astropart. Phys., 28 (2007) 41.

²²² M. Ave et al. (AIRFLY Collaboration): “Temperature and humidity dependence of air fluorescence yield measured by AIRFLY”, Nucl. Instrum. Methods, A 597 (2008) 50.

²²³ M. Ave et al. (AIRFLY Collaboration): “Precise measurement of the absolute fluorescence yield of the 337 nm band in atmospheric gas”, Astropart. Phys., 42 (2013) 90.

いる²²⁴.

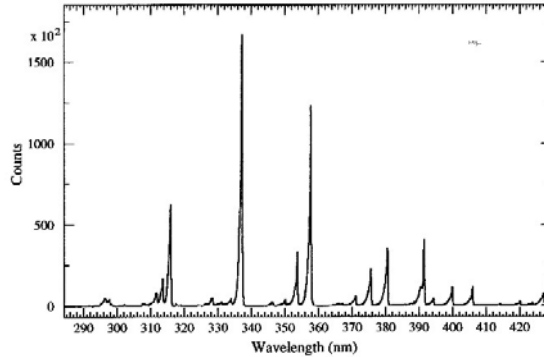


図 5-19 AIRFLY により測定された蛍光スペクトル(800 hPa, 293 K)の例²²¹

蛍光発光, 消滅のプロセスや, 空気中での発光に対する 2 次電子の役割, 各グループのデータを比較するときの問題点などについて, Arqueros et al. が詳しく論じている²²⁵.

一方 Telescope Array グループは実験サイトに電子ライナックを設置し, 望遠鏡の受光から計数までを含めた較正を開始した. この手法では, 宇宙線の軌跡から望遠鏡までの光子の減衰による補正以外の, 装置に関連する諸パラメータは一括して較正され, 宇宙線エネルギーの決定精度の向上が期待できる. 望遠鏡から 100 m 離れた地点から垂直に 40 MeV の電子数 10^9 のビームを 0.5Hz で放射し, 2012 年 7 月から 2013 年 3 月まで実施された結果が 2013 年の宇宙線国際会議で報告されている²²⁶. 今後 TA のエネルギー・スケールはこの結果に基づいて決定されるであろう.

²²⁴ V. Verzi for the Pierre Auger Collaboration: “The energy scale of the Pierre Auger Observatory”, Proc. 33rd ICRC, Rio de Janeiro (2013) id928.

²²⁵ F. Arqueros, F. Blanco and J. Rosado: “Analysis of the fluorescence emission from atmospheric nitrogen by electron excitation, and its application to fluorescence technique”, New J. Phys., 11 (2009) 065011.

²²⁶ T. Shibata, M. Fukushima, H. Sagawa, B.G. Cheon, B.K. Shin, J.N. Matthews for the Telescope Array Collaboration: “Absolute energy calibration of the Telescope Array Fluorescence detector with an Electron Linear Accelerator”, Proc. 33rd ICRC, Rio de Janeiro (2013) id507.

第6章 明野観測所と AGASA (Akeno Giant Air Shower Array)

6.1 明野観測所の設立まで

原子核研究所の空気シャワー観測装置(3.2 節参照)は, 全国共同利用施設として 15 年にわたり稼働されていたが, 場所が狭く, より高いエネルギー領域への発展が望めないため, 次期計画が 1970 年頃から議論され始めた. 空気シャワー実験の限界も指摘される中, 実施するなどのエネルギー領域を対象とし, 何を目的とするか, 夜を徹した喧々譁々の議論がなされた. 1970 年頃はあらゆる分野で過去の総括全盛時代であったから, より高いエネルギー領域でなく, 「核研空気シャワー実験をより精度良く根本からやりなおせ」との意見も強かった. 結果として, 原子核研究所を引き継ぐエネルギー領域を, これまでより精度よく, 大規模に観測するということになり. 新計画の責任者として 1972 年に鎌田甲一が就任した. 同時に乗鞍宇宙線観測所で, これまでのエネルギー領域を更に精度を上げて観測することを目的として始まったのが CAOS 計画(3.3.3 節参照)である.

新計画は約 1km 四方に検出器を約 100m 間隔で配置することが出来るということが条件で, 1974 年 3 月から土地探しが始まり, 山梨県北巨摩郡明野村(現在北杜市明野町)浅尾の東光地区に決まったのは 1975 年 9 月である. 1976 年 9 月から中央実験棟, 共同利用宿舎, シールド観測室, 周辺観測室の建設が始まり, 年度末までに当年度分の建設が完成した. 1977 年 4 月 18 日文部省令及び東京大学学内規則の改正により, 東大宇宙線研究所附属施設として明野観測所が発足した²²⁷.

6.2 明野 1 km² 空気シャワー観測装置

実験棟, 宿舎の建設が始まった 1976 年より 3 年計画で「明野空気シャワー観測装置」の特別設備費が認められ, 装置の設置も同時進行でおこなわれた. この装置の目的は, 空気シャワー中に含まれる, 電子, ミューオン, ハドロン成分を総合的に測定し, 加速器では及ばないエネルギー $10^{16}\sim 10^{18}$ eV 領域の核相互作用と, 宇宙線のエネルギースペクトル, 組成, 非等方性を測定し, その起源を探ることであった.

当初の装置の概要は以下のとおりである.

- ① 電子成分検出器(シンチレーション検出器) (1m² 169 台, 0.25m² 100 台)
- ② ミューオン検出器 (25m² 8 ヶ所, 50m² 2 ヶ所)
- ③ エネルギー流測定装置 (4 層カロリメータ : 100m² 中央)
- ④ チェレンコフ光観測装置 (2m 鏡 3 台, 中央から約 1.7 km)

これらのうち, ①, ②の配列を図 6-1 に示す²²⁸. 装置の建設は順調に進み, 1978 年秋に

²²⁷ 設立までのいきさつについては, 鎌田甲一:「明野空気シャワー観測所」, 月刊フィジクス, 1, 8月号(1979)211.; 永野元彦:「明野観測所開設 20 年に際して」, ICRR ニュース, No.33 (1997) 1.

²²⁸ T. Hara, T. Hatano, N. Hayashida, F. Ishikawa, K. Kamata, K. Kifune, M. Nagano, Y. Ohno, H. Ohoka, R. Torii, G. Tanahashi, M.F. Crouch, S. Kawaguchi, N. Nii, T. Kitajima,

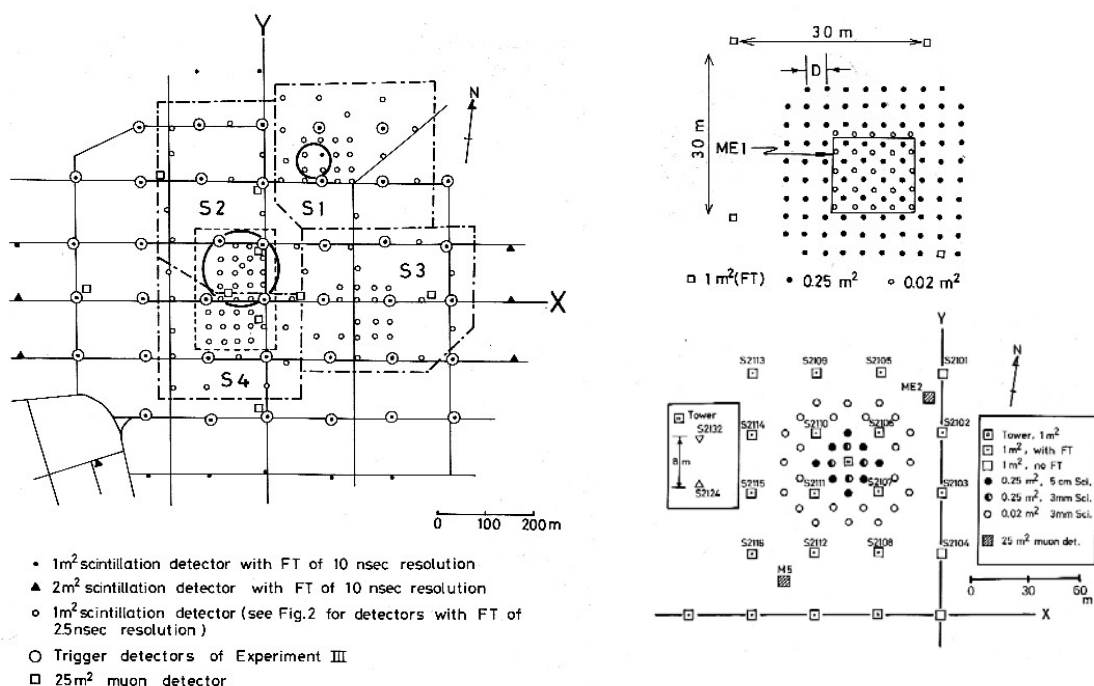


図 6-1 明野 1 km² 空気シャワー観測装置の検出器配置図²²⁸. 左側が検出器間隔が 120 m の基本アレイ. S1 と書かれた円内の拡大図が右上図. 検出器間隔を 1.2 m から 3 m と変えて, サイズ 10⁵ 以下までの観測に使用された. S2 と書かれた円内の拡大図が右下図で, 10⁵ ~10⁶ サイズ領域の観測に使用.

ほぼ全面的に運転を開始し, 1978 年 10 月 6 日に明野観測所開所式が行なわれた. 1979 年夏に京都で第 16 回宇宙線国際会議が開催され, 明野の最初の結果が報告された. 1983 年から将来計画(後の AGASA)への第一段階として 20 km² アレイへと拡張された. これは約 1 km 間隔で 2.25 m² のシンチレーション検出器 19 台を配置したものである²²⁹. 各検出器は 2 本の光ファイバーで接続され, 中央と双方向で通信するシステムの実験であった.

宇宙線のエネルギースペクトルは 10⁸ eV ~ 10²⁰ eV と 12 桁に及ぶが, 明野では後の AGASA を含めて, そのうち 10^{14.5} eV ~ 10²⁰ eV と 5 桁以上に及ぶエネルギー領域を系統的に測定したことがその特徴である. 図 6-1 (右) の小サイズアレイ (S1 アレイ, S2 アレイ), 1

H. Machida, T. Matano, K. Ohta, H. Sakuyama, K. Jitsuno, K. Hashimoto, K. Honda, K. Kawasumi, I. Tsushima, F. Arimura, N. Awaji, Y. Hayashi, N. Ito, S. Kawakami, N. Hasebe and H. Yoshi : "The Tokyo Air Shower Project", Proc. 16th ICRC, Kyoto, 8 (1979) 135. ; M. Nagano, Y. Hatano, T. Hara, N. Hayashida, S. Kawaguchi, K. Kamata, T. Kifune and G. Tanahashi: "The Lateral Distribution of Electrons of Extensive Air Shower Observed at Akeno (920 gm/cm²)", J. Phys. Soc. Japan, 53 (1984) 1667.

²²⁹ M. Teshima, H. Ohoka, Y. Matsubara, T. Hara, T. Hatano, N. Hayashida, C.E. He, M. Honda, F. Ishikawa, K. Kamata, K. Kifune, M. Mori, M. Nagano, M. Nishijima, Y. Ohno and G. Tanahashi; "Expanded Array for Giant Air Shower Observation at Akeno", Nucl. Instrum. Methods, A 247 (1986) 399.

km²アレイ, 20 km²アレイによるサイズ・スペクトルを図 6-2 の左に示す²³⁰. 記号は異なるアレイによるスペクトルで, サイズ領域を重ねながら, 広いサイズ領域でスペクトルが決定された.

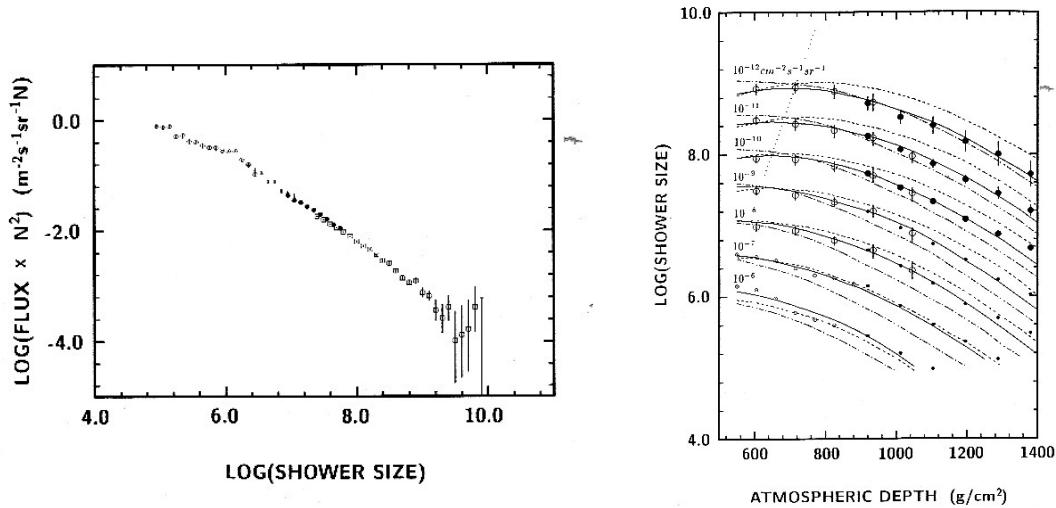


図 6-2 (左)S1 アレイ, S2 アレイ, 1 km²アレイ, 20 km²アレイで観測されたサイズスペクトルを重ねたもの²³⁰. (右) 天頂角にわたる積分スペクトル上で, 等しい頻度のサイズは同じ一次宇宙線エネルギーとして(等頻度法 equi-intensity cut 法), そのサイズを大気深さを横軸にプロットしたもの. ○はチャカルタヤ山のBASJEのデータ²³¹で, 頻度 $10^{-11} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ で規格化してある.

明野で決めたサイズを一次宇宙線エネルギー(E_0)に変換するには, チャカルタヤ山のBASJEで equi-intensity cut 法により導出されたシャワーの発達カーブ²³¹と合体させ(図 6-2 右), 明野でのシャワーサイズを最大発達のシャワーサイズ(N_{max})に変換し, モンテカルロシミュレーションで求めた, E_0 と N_{max} の関係を使って E_0 が決められた²³². この決定方法は, 核相互作用や親の組成への依存度が小さい. 決定されたエネルギー・スペクトル²³⁰はAGASAの結果と共に図 6-6 にプロットされている. Knee と ankle の間 $10^{17.8} \text{ eV}$ に 2nd knee の存在が示された.

²³⁰ M. Nagano, M. Teshima, Y. Matsubara, H.Y. Dai, T. Hara, N. Hayashida, M. Honda, H. Ohoka and S. Yoshida: "Energy spectrum of primary cosmic rays above $10^{17.0} \text{ eV}$ determined from extensive air shower experiments at Akeno", J. Phys. G: Nucl. Part. Phys., 18 (1992) 423.

²³¹ F. Kakimoto, K. Suga, N. Inoue, K. Tachi, N. Sugawa, T. Tamura, T. Inaba, Y. Matsumoto, Y. Mizumoto and T. Hara: "Character of nuclear interactions and composition of primary cosmic rays at 10^{15} eV to 10^{20} eV deduced from air showers observed at 5200 m and 900 m a.s.l.", Proc. 17th ICRC, Paris, 11 (1982) 254.

²³² M. Nagano, T. Hara, Y. Hatano, N. Hayashida, S. Kawaguchi, K. Kamata, T. Kifune and Y. Mizumoto: "Energy spectrum of primary cosmic rays between $10^{14.5}$ and 10^{18} eV ", J. Phys. G: Nucl. Part. Phys., 10 (1984) 1295.

EAS 中の 1 GeV 以上のミューオン数が大気中で殆ど減衰しないことを利用し、 10^{17} eV 領域での陽子—空気核(p-Air)衝突非弾性散乱断面積を推定できる。すなわち N_e と N_μ が一定のシャワーは、発達段階が同じと考えられ、そのようなシャワー頻度の天頂角による減衰から、一次宇宙線の平均自由行程が求められた²³³。図 6-3 の左図はシミュレーションによりシャワー発達の揺らぎの影響を補正して求めた結果である。p-Air 衝突非弾性散乱断面積は $10^{17.6}$ eV まで $260E^{0.052}$ mb(E は単位 TeV)で増大する。Glauber の多重回折散乱理論と核内形状分布にシェルモデルを仮定して求めた p-p 散乱の全断面積²³⁴が右図である。

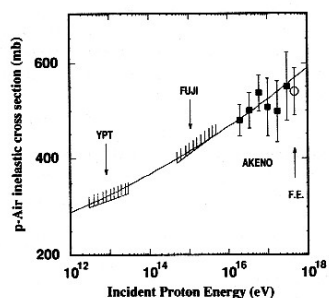


FIG. 2. Energy dependence of σ_{in}^{p-air} on incident proton energy. Present analysis (solid boxes); FE denote σ_{in}^{p-air} obtained by Fly's Eye group [8]; YPT [9] and FUJI [10] represent the lower limits on σ_{in}^{p-air} from the surviving proton flux at Mt. Chacaltaya and from the Mt. Fuji emulsion chamber experiment, respectively; the solid line represents best fit curve in the form of $\sigma_{in}^{p-air} = 290(E/1 \text{ TeV})^\alpha$ mb with $\alpha = 0.052$.

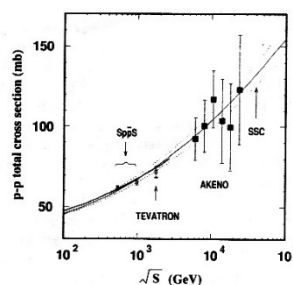


FIG. 4. Energy dependence of σ_{tot}^{p-p} obtained using the method given by Durand and Pi (large solid boxes) and its comparison with the results of σ_{tot}^{p-p} obtained from the accelerator data [15-17] (small boxes). The thin line shows the best fit curve in the form of $\sigma_{tot}^{p-p} = 38.5 + a \ln^2(\sqrt{s}/10 \text{ GeV})$ with $\alpha = 1.37$. The dotted lines correspond to 1 standard deviated values of a from the best fit value. The thick line shows the extrapolation of the least-squares fit to the accelerator data up to Tevatron energies [18].

図 6-3 陽子—空気核(p-Air)衝突非弾性散乱断面積(左)と陽子—陽子衝突全断面積に変換したもの(右)²³⁴

エネルギー流測定装置 (4 層カロリメータ : 100m^2)の比例計数管を使用し、ビッグバン時の相転移の際つくられたと予測される超重量モノポール探索が行われた。ヘリウムガスをモノポールにより励起させ、この励起エネルギーより小さいイオン化エネルギーをもつメタンガスを混合させることにより、光速度の 1 万分の 1 という遅い速度のモノポールを検出する(磁気励起機構)。6 年間の観測でモノポールの候補事象は検出されなかった²³⁵が、

²³³ T. Hara, Y. Hatano, N. Hayashida, M. Honda, K. Kamata, K. Kasahara, T. Kifune, Y. Mizumoto, M. Nagano, G. Tanahashi and S. Torii: "Inelastic p-Air Cross Section at Energies between 10^{16} and 10^{18} eV Estimated from Air-Shower Experiments", Phys. Rev. Lett., 50 (1983) 2058.

²³⁴ M. Honda, M. Nagano, S. Tonwar, K. Kasahara, T. Hara, N. Hayashida, Y. Matsubara, M. Teshima and S. Yoshida: "Inelastic Cross Section for p-Air Collisions from Air-Shower Experiments and Total Cross Section for p-p Collisions up to $\sqrt{s} = 24$ TeV", Phys. Rev. Lett., 70 (1993) 184.

²³⁵ T. Hara, M. Honda, Y. Ohno, N. Hayashida, K. Kamata, T. Kifune, G. Tanahashi, M. Mori, Y. Matsubara, M. Teshima, M. Kobayashi, T. Kondo, K. Nishijima and Y. Totsuka: "Slow-monopole search with large-area Helium gas proportional counter array", Phys. Rev. Lett., 56 (1986) 553.

この方法では最も低い上限値を得ている。

6.3 AGASA

明野観測所がある明野村全村にわたる 20 km²アレイは 1983 年から稼働されたが、近隣の須玉町、高根町、長坂町にまたがる約 100 km²アレイへの拡張が 1987 年から開始された。2.2 m²のシンチレーション検出器 111 台が約 1 km 間隔で、地形によって異なる面積のミュオン検出器が 27 台、図 6-4 のように配置され、1990 年から全体が稼働された²³⁶。図中の実線が光ファイバーケーブルで、東電や NTT の電柱に共架された。河川、山など地形によっては電柱がなく、距離が近くても検出器間を直接接続することができず、大きな迂回路を通じて同時計数をする必要がある箇所がある。最初は図 6-4 の鎖線で分けられた 4 つの領域が独立に稼働されたが、1995 年に新しいデータ収集システムが完成し²³⁷、全体が統一して稼働された。

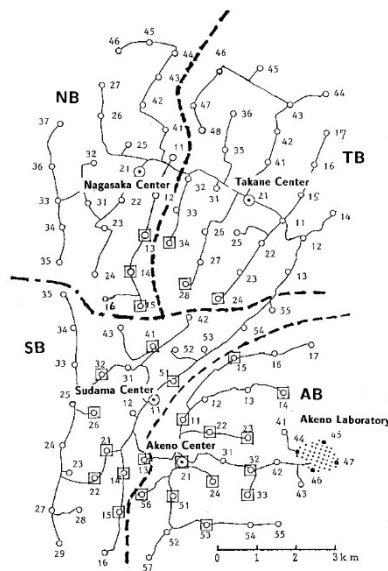


図 6-4 AGASA の検出器配置図²³⁶。○印がシンチレーション検出器。□がミュオン検出器。実線が光ファイバーケーブル。

²³⁶ N. Chiba, K. Hashimoto, N. Hayashida, K. Honda, M. Honda, N. Inoue, F. Kakimoto, K. Kamata, S. Kawaguchi, N. Kawasumi, Y. Matsubara, K. Murakami, M. Nagano, S. Ogio, H. Ohoka, To. Saito, Y. Sakuma, I. Tsushima, M. Teshima, T. Umezawa, S. Yoshida and H. Yoshii : “Akeno Giant Air Shower Array (AGASA) covering 100 km² area”, Nucl. Instrum. Methods, A 311 (1992) 338.

²³⁷ H. Ohoka, M. Takeda, N. Hayashida, K. Honda, M. Honda, N. Inoue, K. Kadota, F. Kakimoto, K. Kamata, S. Kawaguchi, N. Kawasumi, Y. Matsubara, K. Murakami, M. Nagano, M. Teshima, I. Tsushima, Y. Uchihori, S. Yoshida and H. Yoshii : “Further development of data acquisition system of the Akeno Giant Air Shower Array”, Nucl. Instrum. Methods, A 385 (1997) 268.

観測を開始して間もなく 1993 年 12 月に、 10^{20} eV をはるかに超えると推定される宇宙線が観測された²³⁸。AGASA のエネルギー推定においては、電磁成分の芯からの距離、数 100 m での電磁成分密度は、一次宇宙線の種類や核相互作用モデルによる依存性は小さく、一次宇宙線のエネルギーにほぼ比例するとする Hillas の提案¹⁵⁷を受けて、シミュレーション結果²³⁹に基づいて距離 600 m での粒子密度 $S(600)$ がエネルギー指標として使用された。1997 年までのデータで、GZK カットオフがない可能性を示唆するエネルギースペクトルを発表²⁴⁰し、2003 年に 10 年間のデータを仔細に検討し、 10^{20} eV を超えて宇宙線が存在する²⁴¹と発表した。ただし、芯から 1500 m 以遠でのシャワーフロントの厚さ、遅れてくる粒子(中性子)の割合は、AGASA で使用している対数増幅器による粒子数判定に影響を与えるが、測定の実験量が不十分であり、その量によっては、エネルギーを過大評価している可能性があった。

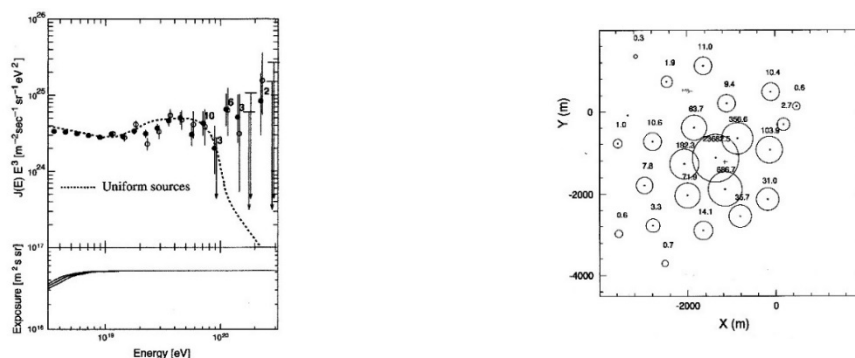


図 6-5 AGASA のエネルギースペクトル²⁴⁰(左)と最大エネルギー事象の粒子密度分布を、密度の対数を半径とする円で描いたもの²³⁸(右)。

1 km² アレイに芯がある 10^{17} eV より大きいシャワーのサイズから決めたエネルギーを同じシャワーについて 20 km² アレイで $S(600)$ を使って決めたエネルギーと比較すると、後者は前者より 10% 大きい²³²。1 km² アレイ・スペクトルは図 6.6 に示すように knee 領域のスペクトルによく一致するので、図 6-6 では、AGASA のエネルギーを 10% 減少してプロットしたものを示してある。

²³⁸ N. Hayashida, K. Honda, M. Honda, S. Imaizumi, N. Inoue, K. Kadota, F. Kakimoto, K. Kamata, S. Kawaguchi, N. Kawasumi, Y. Matsubara, K. Murakami, M. Nagano, H. Ohoka, M. Teshima, I. Tsushima, S. Yoshida and H. Yoshii: "Observation of a Very Energetic Cosmic Ray Well Beyond the Predicted 2.7 K Cutoff in the Primary Energy Spectrum", Phys. Rev. Lett., 73 (1994) 3491.

²³⁹ H.Y. Dai, K. Kasahara, Y. Matsubara, M. Nagano and M. Teshima: "On the energy estimation of ultra-high-energy cosmic rays observed with the surface detector array", J. Phys. G: Nucl. Phys., 14 (1988) 793.

²⁴⁰ M. Takeda et al. (他 27 名): "Extension of the Cosmic-Ray Energy Spectrum beyond the Predicted Greisen-Zatsepin-Kuz'min Cutoff", Phys. Rev. Lett., 81 (1998) 1163.

²⁴¹ M. Takeda et al. (他 31 名): "Energy determination in the Akeno Giant Air Shower Array Experiment", Astropart. Phys., 19 (2003) 447.

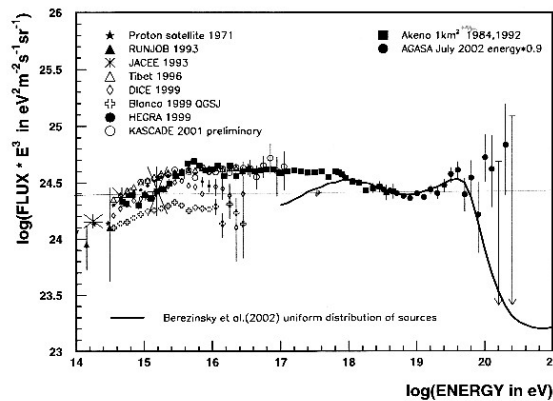


図 6-6 AGASA によるエネルギーを 10%減少したスペクトルを, knee 近辺の他の実験データと共に, 明野 1 km² アレイによるスペクトルと重ねて表示したもの²⁴².

AGASA の結果は Fly's Eye, HiRes の結果と相違し, GZK cutoff がなく更に高いエネルギー迄伸びているとして大きな注目を浴びたが, その後の Pierre Auger Observatory²⁴³や Telescope Array⁵の測定では支持されなかった. 粒子数密度からシミュレーションで求めたエネルギーが蛍光望遠鏡で実験的に測定したエネルギーより 27%大きい, すなわち地表アレイだけで決めたエネルギースペクトルはほぼ AGASA の結果と一致するという結果が TA で得られており⁵, その原因として核相互作用モデルが変化している可能性もあり, 今後の課題である.

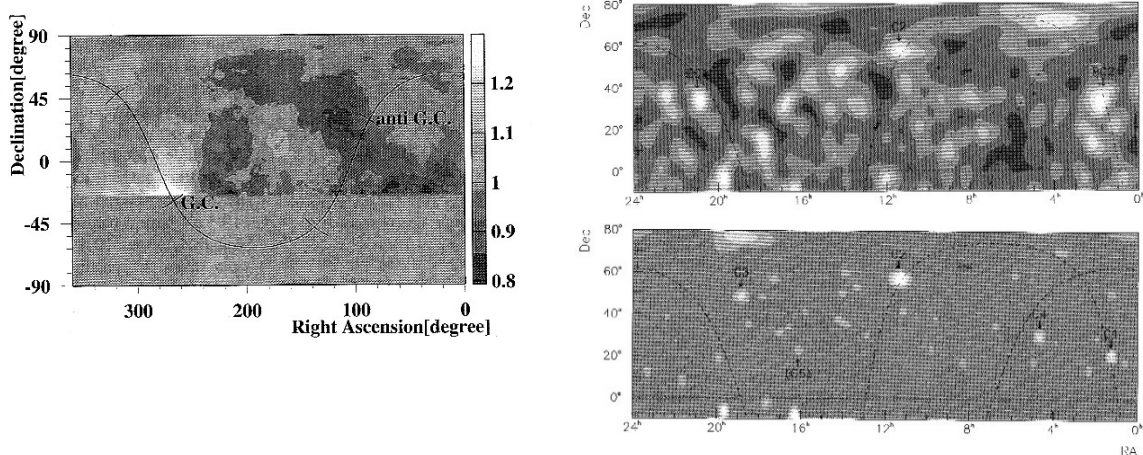


図 6-7 AGASA で観測された到来方向分布を, 頻度の平均からの偏差値を白黒の濃度で示したもの. 赤経座標で, 横軸が経度, 縦軸が緯度. (左図) 10^{17.9}—10^{18.3} eV²⁴⁴, (右上) 10¹⁹

²⁴² M. Nagano: “Ultra-high-energy Cosmic Rays: Results from Akeno Giant Air Shower Array and 1 km² Array”, Extremely High-Energy Cosmic Ray (ed. by M. Teshima and T. Ebisuzaki, Universal Academy Press, Inc. Tokyo) (2002) 3.

²⁴³ J. Abraham, et al. (Pierre Auger Collaboration): “Measurement of the energy spectrum of cosmic rays above 10¹⁸ eV using the Pierre Auger Observatory”, Phys. Lett. B, 685 (2010) 239.

eV 以上. (右下) 4×10^{19} eV 以上²⁴⁶.

到来方向分布は、どのエネルギーでも大局的には等方分布であるが、赤道座標で平均値からの偏差の分布を描くと、統計的に優位な数個のクラスターが観測された。

$10^{17.9} - 10^{18.3}$ eV 領域では銀河中心方向に 4σ の excess が観測された(図 6-7 左)²⁴⁴、明野では銀河中心は見えないが、AGASA の結果を受けてアデレード大学のグループが南半球の SUGAR の結果を再解析した結果、銀河中心方向に $10^{17.9} - 10^{18.5}$ eV の宇宙線の excess が観測され¹⁶⁸、それらの親粒子は中性子の可能性が期待された(4.4 節参照)。しかし銀河中心が見える Pierre Auger Observatory の観測結果では確認されていない²⁴⁵。

10^{19} eV 以上、 4×10^{19} eV 以上の領域での赤経座標分布を図 6-7 の右図の上下に示す²⁴⁶。大局的には等方分布であるが、 4×10^{19} eV 以上 59 事象のうち、到来方向決定精度 2.5° 以内に 3 個の事象(triplet)が集中したのが 1 例、2 個の事象(doublet)が集中したのが 5 例観測された。全事象から任意の 2 個の事象間の各距離の分布を図 6-8 に示す²⁴⁷。等方分布のとき期待される分布を実線で示す。このようなことが起こる確率は 0.1 % 以下であるので、今後の観測が期待されたが、HiRes²⁰⁸ や TA²⁴⁸ の観測ではより多い統計で確認されなかった。

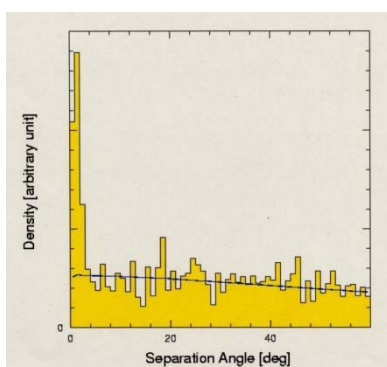


図 6-8 4×10^{19} eV 以上 59 事象について、任意の 2 事象間の角距離の分布²⁴⁷。実線が等方分布の場合期待される分布。

しかし (赤経, 赤緯)が($20^{\text{h}} 50^{\text{m}}, 32^\circ$)の方向に注意する必要がある。AGASA ではこの方

²⁴⁴ N. Hayashida et al. (他 28 名): “The anisotropy of cosmic ray arrival directions around 10^{18} eV”, *Astropart. Phys.*, 10 (1999) 303.

²⁴⁵ J. Abraham et al. (The Pierre Auger Collaboration): “Anisotropy studies around the galactic center at EeV energies with the Auger Observatory”, *Astropart. Phys.*, 27 (2007) 244.

²⁴⁶ M. Takeda et al. (他 27 名): “Small-scale anisotropy of cosmic rays above 10^{19} eV observed with the Akeno Giant Air Shower Array”, *Astrophys. J.*, 522 (1999) 522.

²⁴⁷ M. Teshima et al. (他 30 名): “The arrival direction distribution of Extremely High Energy cosmic rays observed by AGASA”, *Proc. 28th ICRC, Tsukuba, (2003)* 437.

²⁴⁸ Abu-Zayyad et al. (The Telescope Array Collaboration): “Search for Anisotropy of Ultrahigh Energy Cosmic Rays with the Telescope Array Experiment”, *Astrophys. J.*, 757 (2012) 26.

向から 0.1 EeV で 3.4σ , 1 EeV で 2.4σ の excess が観測されている²⁴⁹が, 同じ方向から Tibet で $4.5\sigma(3 \text{ TeV})$ ²⁵⁰, Milagro で $4.5\sigma(1 \text{ TeV})$ ²⁵¹ の excess が観測されている. 特に AGASA では MJD50720-50820 の間に $3.1\sigma(1 \text{ EeV})$, Tibet で MJD50820-50910 の間に $6.0\sigma(3 \text{ TeV})$ とフレア的に増大を観測している. EeV と TeV とエネルギー領域は大きく異なるが, ($20^{\text{h}} 50^{\text{m}}, 32^{\circ}$) は Cygnus Loop の方向であり, 1 EeV は中性子が崩壊せずに到達できる距離に相当しており, 今後の観測が注目される.

6.4 次期計画の準備研究

6.4.1 Pierre Auger 計画の準備研究

1990 年代になり, シカゴ大のクロニン(J.W. Cronin)やリーズ大のワトソン(A.A. Watson)等が $10^4 \text{ km}^2\text{-ster}$ の次世代超高エネルギー宇宙線観測計画を提案し, 最初の実質的な議論がおこなわれたのが 1992 年にパリで開催されたワークショップである²⁵². 1993 年 1 月にはアデレードで第 2 回ワークショップが開催され, 世界中から多くの研究者が集まった. 1993 年 9 月の東京ワークショップでクロニンが地表アレイの提案をおこなっている²⁵³. その後, 世界中の研究者を結集すべく, 年に 2,3 回, 研究会が世界各地で開催された.

新計画では, 当初から地表アレイと蛍光望遠鏡の混成が検討された²⁵⁴が, 先ず実施されたのが電磁成分とミューオン成分を分離するために, AGASA と連動した地表アレイ用検出器の開発である. 鉛 1 cm を挟んで上下にシンチレーション検出器を配置した検出器(鉛サンドイッチ検出器-lead burger 検出器)と, ハベラパーク型の水槽の得失を検討することになった. 1994 年には明野観測所において 12 m^2 鉛サンドイッチ検出器(図 6-8)を稼働²⁵⁵,

²⁴⁹ M. Takeda et al. (他 31 名): “A possible cosmic-ray source in TeV and EeV from the direction around Cygnus Loop”, Proc. 29th ICRC, Pune, India, 7 (2005) 179.

²⁵⁰ M. Amenomori (The Tibet AS γ Collaboration): “A Wide Sky Survey for Steady or Flare Type TeV Gamma-Ray Sources Using the Tibet-HD and Tibet-III Data”, The Universe Viewed in Gamma-Rays (Universal Academy Press, Inc., Tokyo) (2003) 303.

²⁵¹ R. Atkins et al. (他 37 名): “TeV Gamma-Ray Survey of the Northern Hemisphere Sky Using the Milagro Observatory”, Astrophys. J., 608 (2004) 680.

²⁵² ワークショップの記録, “Cosmic Rays above 10^{19} eV ”, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.), 26B (1992) (eds. M. Boratav, J.W. Cronin and A.A. Watson).

²⁵³ J.W. Cronin: “A Surface Array for the Highest Energy Cosmic Rays”, Proc. Tokyo Workshop on Techniques of the Study of Extremely High Energy Cosmic Rays (ed. M. Nagano, ICRR, University of Tokyo) (1993) 87.

²⁵⁴ B.R. Dawson: “Some Notes on the Hybrid Array Concept”, Proc. Tokyo Workshop on Techniques of the Study of Extremely High Energy Cosmic Rays (ed. M. Nagano, ICRR, University of Tokyo) (1993) 125.

²⁵⁵ K. Hashimoto, K. Honda, N. Kawasumi, T. Kutter, M. Nagano and I. Tsushima: “Performance test of leadburger: Detector for measurement of highest energy cosmic rays”, Proc. 24th ICRC, Rome, 1 (1995) 478. ; K. Hnoda, K. Hashimoto, N. Kawasumi, T. Kutter, M. Nagano and I. Tsushima: “Characteristics of muonic and electromagnetic components far from the core of giant air showers above 10^{18} eV ”, Phys. Rev. D 56 (1997)

1996 年にはプラスチック (polyvinyl chloride, PVC) 製の 10 m² 水タンクを設置し²⁵⁶, AGASA との連動が開始された. 検出器の特性と大シャワーの遠方での到来時間分布の詳細について, leadburger については K. Honda et al. に²⁵⁵, 10 m² 水タンク検出器については 榊直人の修士論文に²⁵⁷まとめられている.

1995 年に Fermilab で 6 ヶ月にわたるワークショップが開催され, 北, 南半球のそれぞれに 3,000 km² の面積の地表アレイを設置すること, 蛍光検出器とハイブリッドにすること, 地表アレイとしては水タンクを採用することなど, 重要なことが決定され, デザイン・レポートが発行された. 1995 年にパリで開催されたワークショップで南のサイトがアルゼンチンの Mendoza, Malargüe に決定した, 以後 Pierre Auger 計画と名付けられ, 建設準備が始まった.

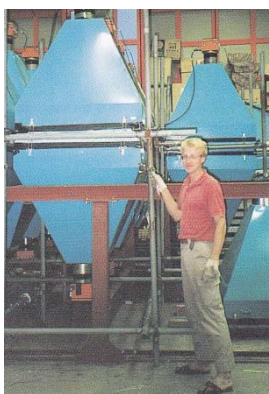


図 6-9 Auger 地表検出器としてテストされた 12 m²鉛サンドイッチ検出器(左)²⁵⁵と 10 m²水タンク検出器(右)²⁵⁶

6.4.2 Telescope Array の準備研究

日本では AGASA の定常運転に入った頃から, 次期計画の検討が始まり, 手嶋政廣が中心になり, 宇宙線望遠鏡計画 (Telescope Array, TA) が立案された²⁵⁸. これは多数の反射望遠鏡のアレイにより AGASA の 30-100 倍規模で, 最高エネルギー宇宙線の観測(蛍光)と高エ

3833.

²⁵⁶ N. Sakaki and M. Nagano: “Test of a Water Cherenkov Detector for the Auger Project at Akeno Giant Air Shower Array (AGASA)”, Proc. Int. Symp. on Extremely High Energy Cosmic Rays: Astrophysics and Future Observatories (ed. M. Nagano, ICRR, Univ. of Tokyo) (1997) 402.

²⁵⁷ N. Sakaki: “Characteristics of a Water Čerenkov Detector for the Auger Project far from the Cores of Giant Air Showers”, (Master Thesis, University of Tokyo)(1998).

²⁵⁸ M. Teshima (Telescope Array Collaboration): “The Telescope Array Project”, Proc. Tokyo Workshop on Techniques of the Study of Extremely High Energy Cosmic Rays (ed. M. Nagano, ICRR, University of Tokyo) (1993) 109.

エネルギーガンマ線の観測(チェレンコフ光)をおこない、飛躍的に超高エネルギー天文学を進めることを目的とする。そのための素子望遠鏡の1,2号機がそれぞれ1995,1996年に明野に設置され、試験運転がおこなわれた。1997年から米国フライズ・アイのサイトであるDugwayに7素子の望遠鏡の設置が始まり、建設にともない順次TeVガンマ線による点源探索が始まった。しかし1997年12月に、米空軍の巡航ミサイルが実験中にコントロールを失い落下、不幸にも望遠鏡を制御しているコンピューターが積まれていたトレーラーが壊され、計画されていた七素子望遠鏡とユタ大学HiResとの超高エネルギー宇宙線連動観測が大幅に遅れることになった。



図 6-10 米国ユタ州の砂漠ダグウェイに設置された七素子宇宙線望遠鏡の内の2基

東京大学宇宙線研究所では1997年から研究所将来計画の策定がなされていたが、1998年3月に計画がまとまり、TA計画は最高エネルギー宇宙線観測に一本化し、sub-TeVガンマ線観測は大型望遠鏡によるCANGAROO III計画(10 m口径望遠鏡4台)で推進されることになった²⁵⁹。当初のTA計画は、3 m口径蛍光望遠鏡42素子を配置し、方位360°×仰角34°を観測するステーションを、約30 km間隔で8ステーション設置し、約80,000 km²ster(稼働効率を入れて8,000 km²ster)と、AGASAの50~100倍とする計画であった。

1999年6月に福島正己がTA計画の責任者に決まり、建設が始まったPierre Auger計画を背景に、TA計画の見直しと予算申請の準備が始まった。

²⁵⁹ 「宇宙線研究所において今後推進すべき研究計画について」、ICRR ニュース, No.35 (1998.特集号)

第7章 チェレンコフ光による空気シャワー観測

7.1 チェレンコフ光の発見

ロシアのチェレンコフ(P.A. Cherenkov), タム(I.E. Tamm), フランク(I.M. Frank)は 1958 年に「チェレンコフ効果の発見と解釈」についてノーベル物理学賞を受賞した。いずれも 1930 年代の仕事である。最初の発表は 1934 年で²⁶⁰, フランクとタムによる入射粒子に対するチェレンコフ光の放出角度 θ は,

$$\cos \theta = 1/\beta n \quad (\beta \text{ は粒子と光の速度の比, } n \text{ は物質の屈折率})$$

であることなど, チェレンコフ光の特性²⁶¹を証明した実験は 1937 年に発表された²⁶².

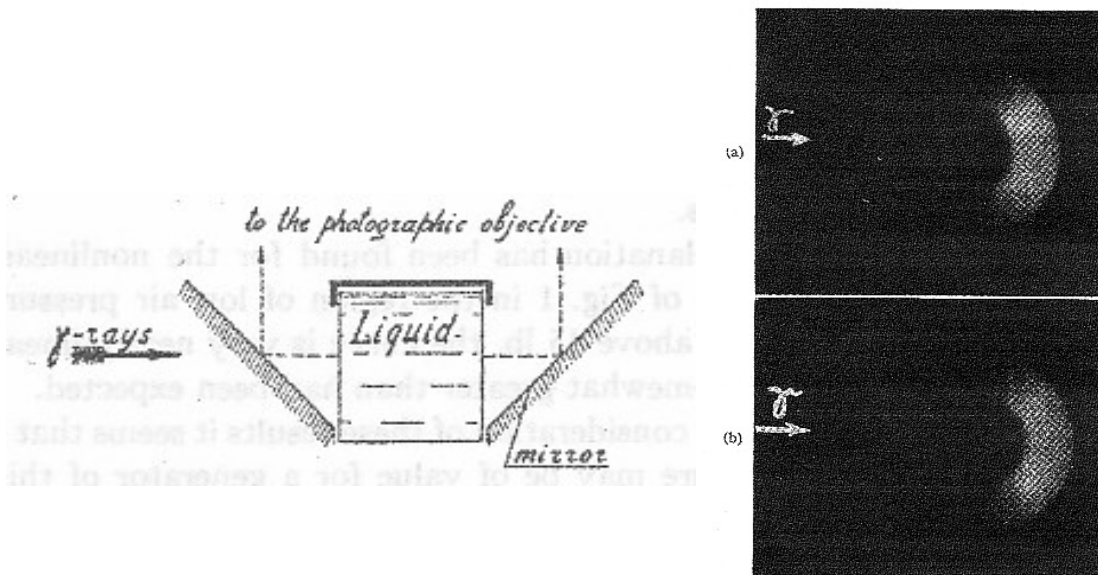


図 7-1 チェレンコフの実験装置²⁶⁰. 屈折率の異なる種々の液体で, 約 72 時間の露出時間で写真が撮られた。上は水($n=1.337$)で下はベンジン($n=1.513$). 発光は非対称であることを示す。

ロシア国内では, ヴァビロフ・チェレンコフ放射と呼ばれる理由や, チェレンコフが Academy of Science USSR の corresponding member に選ばれたのはノーベル賞受賞後の

²⁶⁰ P.A. Cherenkov: “Visible Glow of Pure Liquids Under the Influence of X-rays”, Compt. Rend. Acad. Sci. U.S.S.R., 8 (1934) 451.

²⁶¹ I.M. Frank and I.E. Tamm: “Coherent in-medium fast-electron radiation”, Compt. Rend. Acad. Sci. U.S.S.R., 14 (1937) 109.

²⁶² P.A. Cherenkov: “Visible Radiation Produced by Electrons Moving in a Medium with Velocities Exceeding that of Light”, Phys. Rev., 52 (1937) 378.

1964年であり, full member に選ばれたのはその6年後 66歳と非常に遅かったことなど, 逸話はワトソン(A.A. Watson)²⁶³に詳しい。

7.2 空気シャワーからのチェレンコフ光の検出

EAS をチェレンコフ光で観測しようとして試みられたのは, 2.2.2 節で述べたように, 1950代初期にさかのぼる。1948年に英国のブラケット(P.M.S. Blackett)は, EAS から発せられるチェレンコフ光は夜光の約 0.01%を占めると推定した⁷⁶。早速ガルブレイス(W. Galbraith)とジェリー(J.V. Jelley)が英国の Harwell で, 直径 25cm のサーチライトの反射鏡の焦点に直径 5cm の光電子増倍管を置き, 観測した光が EAS から発せられたものであることを確認するために, GM アレイとコインシデンスさせて 1952 年頃から観測をおこなった⁷⁷。EAS と連動して, 短い時間幅でノイズの 3 倍の光を観測したが, その光はチェレンコフ光である確証は得られなかった。翌 1953 年に装置を Pic du Midi 山に持っていき, 4 台の光検出器と 5 台の GM トレイ(1 トレイは 4 本の GM)で同時観測をおこなった。観測された光の偏光とその波長分布はチェレンコフ光と一致することを示し, そのトリガーの閾値から, EAS のエネルギーは約 10^{14} eV と推定している⁷⁷。

後に別の反射鏡の焦点においたイメージンシファイアーで撮像し, 確かに EAS はチェレンコフ光で光っていることを示したのが図 7-2 である²⁶⁴。

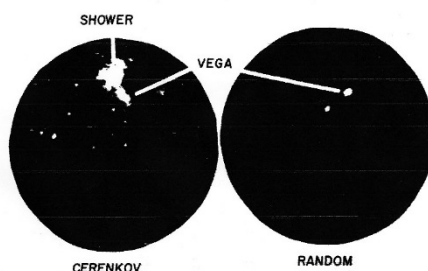


図 7-2 右図はランダムにトリガーされた夜空. ヴェガが写っている. 左は PMT でトリガーされてイメージンシファイアーで撮像された EAS 像²⁶⁴.

英国では天候が悪く, Harwell の実験は終了したが, 1950 年代にはチェレンコフ光観測は, ソ連ではチュダコフ(A.E. Chudakov)やネステローヴァ(N.M. Nesterova)によりパミーール山で²⁶⁵, 豪ではブレナン(M.H. Brennan)等によりシドニー大学²⁶⁶で実施された。

²⁶³ A.A. Watson: “The discovery of Cherenkov radiation and its use in the detection of extensive air shower”, Proc. of CRIS2010; Cosmic Ray International Seminar on ‘100 years of Cosmic Rays from Pioneering Experiments to Physics in Space’.

²⁶⁴ J.V. Jelley and N.A. Porter: “Čerenkov radiation from the night sky and its Application to γ -Ray Astronomy”, Quart. J. Astron. Soc., 4 (1963) 275.

²⁶⁵ N.M. Nesterova and A.E. Chudakov: “Observation of Cherenkov radiation accompanying extensive air showers of cosmic rays”, JETP, 28 (1955) 384.

²⁶⁶ M.H. Brennan, J. Malos, D.D. Millar and C.S. Wallace: “Air Showers of Size Greater

7.3 チェレンコフ光による一次宇宙線エネルギー・スペクトルや組成の決定

チェレンコフ光の横広がり分布(CLDF)がシャワーの発達段階を示すと予測し、シャワーサイズと、中心からの距離が一定での光子数分布の変動から、一次宇宙線の化学組成を推定したのはクリーガー(A.S. Krieger)とブラット(H.V. Bradt)²⁶⁷が最初であろう。チャカルタヤ山で、BASJE アレイ(3.2.4 節参照)と連動し、1966 年と 1967 年に実施された。BASJE アレイの中央から 15 m, 150 m, 300 m の円周上の 4 箇所(1966 年)[6 箇所(1967 年)]に、視野を 65° にした図 7-3 の装置を配置し、EAS にともなう CLDF が測定された。 10^{16} eV での組成は 10^{12} eV 領域での組成と殆ど変わらないという結果を得ている。

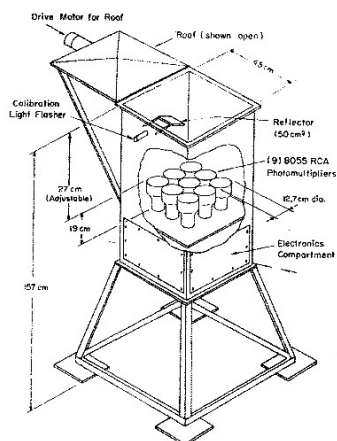


図 7-3 A.S. Krieger と H.V. Bradt の観測で使われたチェレンコフ光観測装置²⁶⁷。9本の5インチ PMT の感度と dynamic range を合わせて、光子数は束ねて記録された。PMT の光電面の高さを上下することにより、視野角を調整できる。

英国ダーラム大学のスミス(G.J. Smith)とターバー(K.E. Turver)は、CLDF が EAS の発達段階に依存しており、その変動の測定が組成決定に有効であることをモンテカルロ・シミュレーションにより示し、ハベラーパークでの測定と比較した²⁶⁸。ハベラーパークのエネルギー決定指標である、中心から 500 m での水タンクで測定した粒子密度 $\rho(500)$ で規格化した CLDF を図 7-4 に示す。観測値は 500 m 以内ではシミュレーション結果とよく一致するが、以遠ではより steep である。また 300 m でのチェレンコフ光密度 $\check{c}(300)$ は $\rho(500)$ に比例しており、良いエネルギー指標であることを示した。

than 10^5 Particles; (2) Čerenkov Radiation Accompanying the Showers”, Nature, 182 (1958) 973.

²⁶⁷ A.S. Krieger and H.V. Bradt: “Čerenkov Light in Extensive Air Showers and the Chemical Composition of Primary Cosmic Rays at 10^{16} eV”, Phys. Rev., 185 (1969) 1629.

²⁶⁸ G.J. Smith and K.E. Turver: “Optical Čerenkov emission from large cosmic ray air showers”, J. Phys. A: Math. Nucl. Gen., 6 (1973) L121.

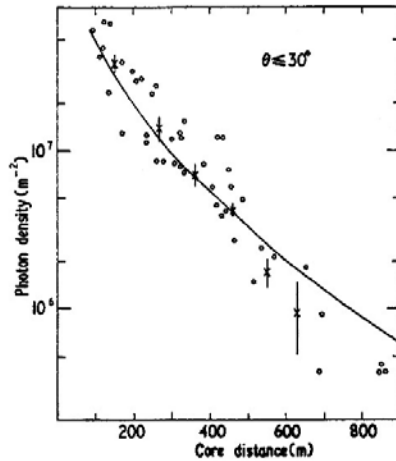


図 7-4 ○が測定されたチェレンコフ光(波長 300~500 nm)密度の横広がり分布²⁶⁸. エネルギー 5×10^{17} eV. ×印はヤクーツクでの実験結果. 実線がシミュレーションの結果.

4.5 節で述べたように, ヤクーツクでは早くからチェレンコフ光に注目し, シャワー毎のチェレンコフ光子密度(Q)の CLDF を測定し, 観測点でのチェレンコフ光総量(Q_{tot})を求めている. この量が荷電粒子の大気中での電離損失に比例するからである. 装置は直径 15 cm の PMT(FEU-49B)で, 視野は 55° , 波長領域は約 450 nm で最大となり, 300~800 nm に感度がある. ヤクーツク実験では個々のシャワーの親のエネルギーは, 4.5 節に述べたように, CLDF の測定から決めた荷電粒子の上空でのエネルギー損失 E_{ei} , 地上で測定した電磁成分の LDF から決めた電磁成分の荷うエネルギー E_{el} , ミューオンが荷うエネルギー E_{μ} の和に, シミュレーションで求めた測定できないエネルギー量(相互作用モデルに依存するが, 約 8%)を加えて決めている.

ヤクーツクのチェレンコフ観測装置や解析について, 多くは宇宙線国際会議やその他の会議の報告集に発表されているが, 紙数の関係で記述は簡潔すぎて読者に十分には理解されていなかった. 最近のイヴァノフ(A.A. Ivanov)等²⁶⁹に, 詳細な説明とチェレンコフ観測の結果が報告されている. 図 7-5 の左図は 10^{15} eV~ 10^{19} eV にわたる CLDF で, 実線は以下の実験式で表される.

$$Q(R) = Q(150) \frac{(R_1 + 150)(R_2 + R)^{1-b}}{(R_1 + R)(R_2 + 150)^{1-b}}$$

ここで, $R_1=60$ m, $R_2=200$ m, $b=(1.14 \pm 0.06) + (0.30 \pm 0.02) \times \lg Q(150)$. $Q(150)$ は $R=150$ m での光子密度. 右図はチェレンコフ観測によるエネルギー・スペクトルである.

²⁶⁹ A.A. Ivanov, A.P. Knurenko and I.Ye. Sleptsov: "Measuring extensive air showers with Cherenkov light detectors of the Yakutsk array: the energy spectrum of cosmic rays", New J. Phys., 11 (2009) 065008.

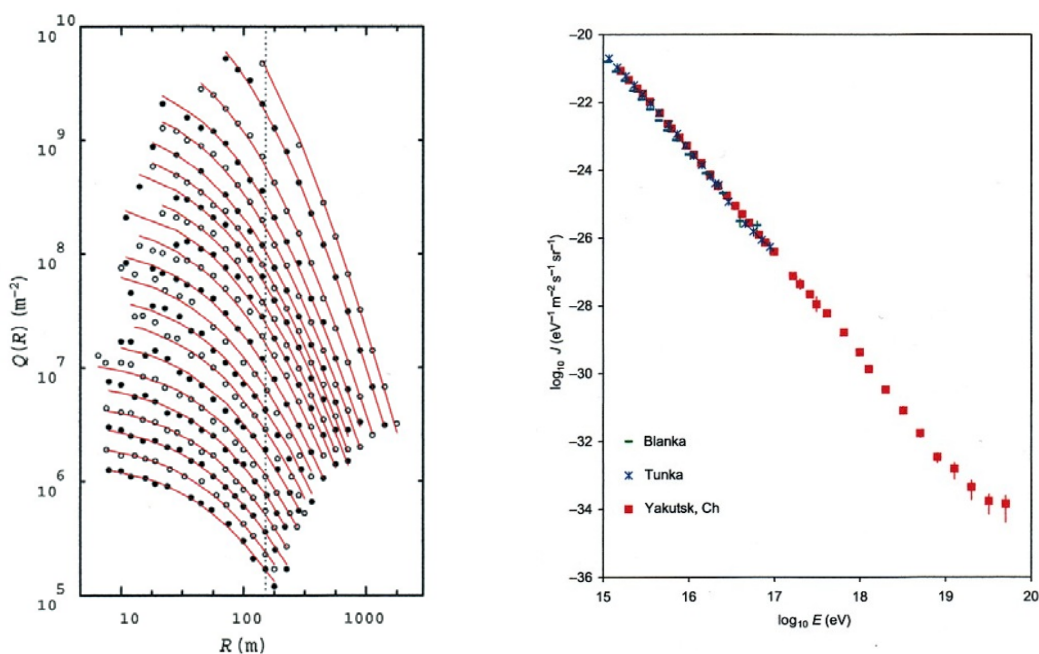


図 7-5 左図はヤクーツクで測定された CLDF²⁶⁹. 実験点がわかりやすいように、○と●が相互に使われている. 実線は本文に述べた実験式. 右図はチェレンコフ検出器だけで決めたエネルギー・スペクトル.

裸の PMT を天空に向け、CLDF の測定によるエネルギー・スペクトルと組成の決定が、主としてスペクトルの「knee」領域($\sim 10^{15}$ eV)でおこなわれた. バイカル湖から約 50 km 離れた Tunka 渓谷でなされた TUNKA²⁷⁰, 米国ダグウェイの CASA と連動しておこなわれた DICE²⁷¹と BLANKA²⁷², HEGRA アレイ (2200 m a.s.l.) と連動して行われた AIROBICC²⁷³等である. DICE, BLANKA, HEGRA のエネルギー・スペクトルは図 6-6 に Akeno など他の地表実験結果と比較してある.

7.4 チェレンコフ光による一次ガンマ線観測

7.4.1 最初の TeV ガンマ線探索実験

実際にチェレンコフ望遠鏡を使い、組織だった天体からの一次ガンマ線観測をおこなっ

²⁷⁰ D. Chernov et al.: “Primary energy spectrum and mass composition determined with the TUNKA EAS Cherenkov array”, *Int. J. Mod. Phys. A* 20, No.29 (2005) 6799.

²⁷¹ S.P. Swordy and D.B. Kieda: “Elemental composition of cosmic rays near the knee by multiparameter measurements of air showers”, *Astropart. Phys.*, 13 (2000) 137.

²⁷² J.W. Fowler, L.F. Forstson, C.C.H. Jui, D.B. Kieda, R.A. Ong, C.L. Pryke, P. Sommers: “A measurement of the cosmic ray spectrum and composition at the knee”, *Astropart. Phys.* 15 (2001) 49.

²⁷³ The HEGRA-Collaboration, F. Arqueros et al.: “Energy spectrum and chemical composition of cosmic rays between 0.3 and 10 PeV determined from the Cherenkov-light and charged-particle distribution in air showers”, *Astron. Astrophys.*, 359 (2000) 682.

たのは、1960～1964 年にかけてレベデフ研究所のチュダコフ(A.E. Chudakov)等 が Crimea でおこなった観測であろう。サーチライトに使われていた直径 1.5m の反射鏡 12 台を利用し、Crab Nebula, Cas A, Cyg A からの観測をおこない、4 TeV 以上での頻度の上限を求めている²⁷⁴。陽子からの宇宙線バックグラウンドが多く、如何にガンマ線を選ぶかということが課題となった。上限値を更に下げるにはガンマ線による EAS の選別が必要であり、1963 年にジェリーとポーターが Cherenkov Image を使うことを提唱している²⁶⁴。

1961 年 4 月に初めてのガンマ線衛星 Explorer XI が約 9 時間、ガンマ線を観測し、50MeV 以上での宇宙ガンマ線の全天での平均フラックスを測定した²⁷⁵。その結果から推定すると、TeV 領域での頻度が予想以上に低く、地表に設置した望遠鏡での観測は Threshold energy を TeV より更に下げる必要があると結論された。

3.2.4 節で述べた BASJE でガンマ線観測の準備が始まったのが 1959 年頃で、観測が始まったのは 1962 年初頭である。BASJE は日本、米国、ボリビアの共同研究だったが、米国の参加者は MIT のロッシ、クラーク等、ガンマ線衛星 Explorer XI や OSO-3 などの推進者で、MIT グループはその後衛星実験に集中することになる。

7.4.2 Mt. Hopkins の直径 10m のガンマ線望遠鏡

ガンマ線のエネルギーを下げて観測するために、1968 年にウィークス(T.C. Weekes)が中心になり、Mt.Hopkins に直径 10m のガンマ線観測を目的とした反射望遠鏡が設置された²⁷⁶。直径 61 cm の球面鏡(半径 14.6 m の球面)248 枚を組み合わせた反射鏡で、直径 7.3 m の球面上に、焦点を向けて並べられた。方向はコンピュータで制御された経緯台である。観測当初は焦点距離 7.3 m の焦点に、直径 12.5 cm の PMT (RCA4522) 1 本のみであり、鏡の有効面積 75 m² で集められた光子の 90%が、直径 5cm の焦点面に集められた。1969 年以降は、2 本の PMT で交互に源と 2.4°離れた箇所の背景雑音を観測する方法に改められ、かに星雲や他の超新星残骸、M87, M82, 3C273, Sgr A などの観測がおこなわれたが、有意な信号を得られなかった。後に直径 2.9 cm の 91 本の PMT をおき、その周りを 18 本の直径 5 cm の PMT が取り囲み、約 3.75 度の視野をカバーしてチェレンコフ像を撮像し、一次ガンマ線と陽子のシャワーの違いからガンマ線を選別する先駆けとなった²⁷⁷。

²⁷⁴ A.E. Chudakov, V.L. Dadykin, N.M. Nesterova and V.I. Zatsepin: "Search for high-energy photons from discrete sources of cosmic radiation", Transl. Consultants Bureau, P.N. Lebedev Phys. Inst., 26 (1965) 99.

²⁷⁵ W.L. Kraushaar and G.W. Clark: "Search for Primary Cosmic Gamma Rays with the Satellite Explorer XI", Phys. Rev. Lett., 8 (1962) 106.

²⁷⁶ T.C. Weekes, G.G. Fazio, H.F. Helmken, E. O'Mongain and G.H. Rieke: "A Search for discrete sources of cosmic gamma rays of energy $10^{11} - 10^{12}$ eV", Astrophys. J., 174 (1972) 165.

²⁷⁷ M.F. Cawley, D.J. Fegan, K.Harris, A.M. Hillas, P.W. Kwok, R.C. Lamb, M.J. Lang, D.A. Lewis, D. Macomb, P.T. Reynold, D.J. Schmid, G. Vacanti and T.C. Weekes: "A High Resolution Imaging Detector for TeV Gamma-ray Astronomy", Exp. Astronomy, 1 (1990) 173.

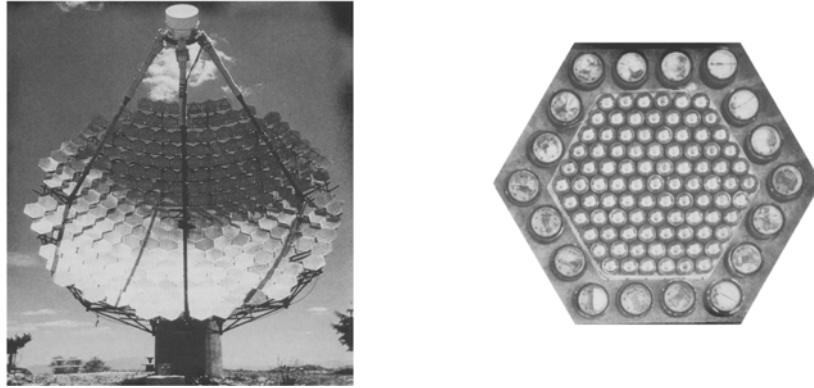


図 7-6 Mt. Hopkins に設置された 10 m 反射鏡²⁷⁶. 右は 1988 年に改造された焦点面検出器で合計 109 本の PMT で、チェレンコフ像を撮像し、一次ガンマ線を一次陽子によるシャワーから選別する²⁷⁷.

なお衛星によるガンマ線観測は、MIT のクラウシャウやクラークにより、1967 年に OSO-3²⁷⁸, ²⁷⁹が打ち上げられた。当時の角度分解能は±15°程度であり、点源は観測できなかったが、銀河面がガンマ線で輝いている様子が観測され、早川の推測¹¹⁷を実証している。1972 年打ち上げられた SAS II では、放電箱により角度分解能が 2~3°と向上し²⁸⁰, OSO-3 で観測された銀河面からのガンマ線の詳細図が描かれたばかりでなく、100 MeV 以上での幾つかの点源(Crab, CygX-3, Vela, Geminga など)が確定された。

1975 年に打ち上げられた COS B の装置は、SAS II と似ているが、SAS II の 7 ヶ月の稼働に比べ 6 年半も稼働し、1970 年代末までに銀河面に沿った diffuse ガンマ線の存在と 25 の点源を確定している²⁸¹。

しかし、Mt.Hopkins では 10 m 反射鏡で集光し、閾エネルギーを下げてても有意な統計で点源からのガンマ線は観測できなかった。1975 年にこれらを含む幾つかの天体につき 0.2 TeV 以上での上限値を報告している。

²⁷⁸ W.L. Kraushaar, G.W. Clark, G.P. Garmire, R. Borke, P. Higbie, C. Leong and J. Thoros: "High-Energy Cosmic Gamma-Ray Observations from the OSO-3 Satellite", *Astrophys. J.*, 177 (1972) 341.

²⁷⁹ G.W. Clark, G.P. Garmire and W.L. Kraushaar: "Observation of High-Energy Gamma Rays", *Astrophys. J. Lett.*, 153 (1968) L203.

²⁸⁰ S.M. Derdeyn, C.H. Ehrmann, C.E. Fichtel, D.A. Kniffen, R.W. Loss: "SAS-B digitized spark chamber gamma ray telescope", *Nucl. Instrum. Methods*, 98 (1972) 557.

²⁸¹ H.A. Mayer-Hasselwander, K. Bennett, G.F. Bignami, R. Buccheri, P.A. Caraveo, W. Hermsen, G. Kanbach, F. Lebrun, G.G. Lichti, J.L. Masnou, J.A. Paul, K. Pinkau, B. Sacco, L. Scarsi, B.N. Swanenburg and R.D. Wills: "Large-scale distribution of galactic gamma radiation observed by COS-B", *Astron. Astrophys.*, 103 (1982) 164.

7.4.3 1980年初頭のTurning point

1970年代には、Mt.Hopkins, Crimea, インドの Ootakamund, 英国ダーラム大学よる豪の Narrabri, 米国の Dugway などでの観測がおこなわれ、それぞれ点源から、TeV ガンマ線観測が報告されたが、それぞれ単発で、必ずしも信頼できる結果ではなかった。ウィークスによれば、Turning Point となったのは、1980年代初めの CygX-3 からのガンマ線観測の発表である²⁸²。

SubTeV 領域では、1980年代に入ってほぼ同時に3箇所で、X線連星 Cyg X-3 の4.8時間周期の0.6-0.7に excess が観測された。結果をまとめたもの²⁸²を図7-7に示す。AはMt.Hopkinsの10m反射鏡による観測²⁸³, BはNASA Jet Propulsion Laboratoryの2台の直径11mの太陽光集光反射鏡を利用した観測²⁸⁴, Cは英国ダーラム大学がDugwayのFly's Eyeサイトで、1.5mの反射鏡3台をまとめたものを、一辺100mの3角形の頂点と中央の4ヶ所において観測²⁸⁵したものである。どの観測でもフェーズ0.6-0.7で最大となっている。

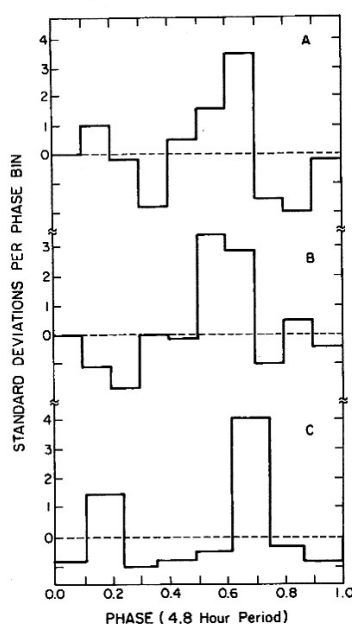


図 7-7 Cyg X-3 から観測された VHE ガンマ線光度の 4.8 時間周期の変化²⁸²。A は Mt. Hopkins, B は米国アイオア州の Jet Propulsion Lab, C は米国ダグウェイでの観測結果。

²⁸² T.C. Weekes: “Very high energy gamma-ray astronomy”, Phys. Report, 160 (1988) 1.

²⁸³ S. Danaher, D.J. Fegan, N.A. Porter and T.C. Weekes: “ γ -Ray observation of Cygnus X-3 at energies of 10^{12} eV”, Nature, 289 (1981) 568.

²⁸⁴ R.C. Lamb, C.P. Godfrey, W.A. Wheaton and T. Tümer: “Cygnus X-3 observed at photon energies above 500 GeV”, Nature, 296 (1982) 543.

²⁸⁵ J.C. Dowthwaite, A.I. Gibson, A.B. Harrison, I.W. Kirkman, A.P. Lotts, J.H. Macrae, K.J. Oxford, K.E. Turver and M. Walmsley: “Ultra high energy gamma rays from Cygnus X3”, Astron. Astrophys., 126 (1983) 1.

PeV 領域では 1983 年にドイツのキール大学グループにより Cyg X-3 の方向から約 10^{15} eV 領域のガンマ線の観測が発表された²⁸⁶。1976 年から 80 年に観測されたデータが使用されている。Cyg X-3 方向のシャワーとしては、age $S > 1.1$ のシャワーが選択されたときの excess だが、 μ/e 比は必ずしも小さくなく、ガンマ線シャワーとしての特性を示していない。また 4.8 時間周期のフェーズ分布を示しているが、最大となるのは 0.3–0.4 であり、TeV 領域のフェーズ分布とはずれている。

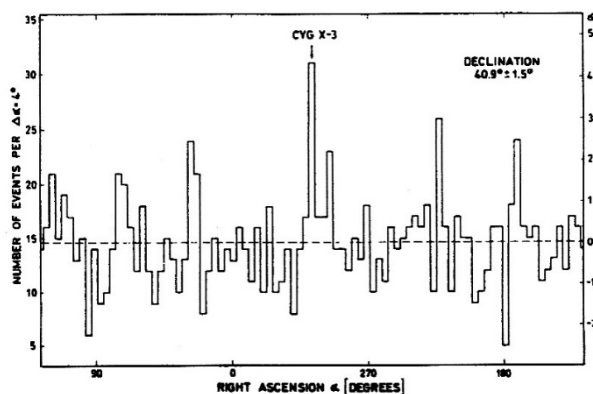


図 7-8 キール大学の観測結果²⁸⁶。赤緯 $40.9^\circ \pm 1.5^\circ$ のバンドの PeV エネルギーの EAS の赤経分布。Cyg X-3 の方向に 4.4σ の増加がみられる。

7.4.4 1985 年頃の ACT (Atmospheric Cherenkov Telescope) とガンマ線観測を目的とした地表アレイ

Cyg X-3 は時々電波フレアを起こす強い X 線星であり、多くの研究者に夢を抱かせ、1985 年には 0.1 TeV から 1 TeV の閾値で表 7-1 に示すように 12 の ACT が稼動していた²⁸²。また地表アレイでは、世界中の既設の EAS 観測装置ばかりでなく、シカゴ大学により Fly's Eye のサイトに建設された CASA、ロスアラモスに設置されたアレイ、大阪市大とタタ研究所共同でインド・ウーティに建設された GRAPES など新しく大型装置も参入し、表 7-2 に示すように 19 のグループによりガンマ線源探索が実施された²⁸²。

観測当初は幾つかの有意な報告も発表されたが、精度の向上とともに有意性は消え、 10^{14} eV から 10^{15} eV 領域ではガンマ線点源は確定されていない。これらの観測のいくつかはガンマ線観測以外の成果をあげているので、第 9 章で紹介する。

7.4.5 Imaging ACT の登場

ACT での大きな進歩は、陽子などのシャワーを排除するために、チェレンコフ光の像の違いを使用する Imaging の開発である。

²⁸⁶ M. Samorski and W. Stamm: "Detection of 2×10^{15} to 2×10^{16} eV Gamma-rays from Cygnus X-3", *Astrophys. J.*, 268 (1983) L17.

Table 21a
Very high energy gamma-ray experiments (atmospheric Cherenkov)

#	Location	Country	Organization	Location			Energy (TeV)	Operational
				Lat. (deg)	Long. (deg)	Elev. (km)		
a	Potchefstroom	South Africa	Potchefstroom	-27	27E	1.4	1	1985
b	White Cliffs	Australia	Adelaide	-32	143E	0.16	1	1986
c	Narrabri	Australia	Durham	-31	145E	0.21	0.3	1986
d	Haleakala	USA	Wisconsin	21	156W	3.0	0.5	1985
e	Albuquerque	USA	Riverside	35	107W	1.5	0.2	1986
f	Mt. Hopkins	USA	Smithsonian	32	111W	2.3	0.3	1983
g	Themis	France	Saclay	43	1W	1.5	0.1	1986
h	Crimea	USSR	Crimean Astrophys. Obs.	45	34E	2.1	1	1986
i	Pachmarchi	India	Tata	23	78E	1.1	0.5	1987
j	Gulmarg	India	Tata	35	77E	2.7	1	1985
k	Beijing	China	Acad. Sinica	40	117E	1.0	1	1987
l	Delingha	China	Acad. Sinica	37	97E	3.2	1	1990

表 7-1 1985 年頃実施されていた ACT の観測場所と実施グループ名 282.

Table 21b
Ultra high energy gamma-ray experiments (atmospheric Cherenkov and particle arrays)

#	Location	Country	Organization	Location			Energy (PeV)	Angular resolution (deg)	Operational
				Lat. (deg)	Long. (deg)	Elev. (km)			
1	Buckland Park	Australia	Adelaide	-35	138E	S.L.	1	2.5	1984
2	Mt. Chacaltaya	Bolivia	"BASJE"	-16	68W	5.2	0.2	1	1986
3	Mt. Chacaltaya	Bolivia	SYS Collab.	-16	68W	5.2	0.2	3	1986
4	Haverah Park	UK	Leeds	54	1W	S.L.	1	1	1986
5	Dugway	USA	Utah	40	112W	1.5	0.1	0.5	1989
6	Los Alamos	USA	Los Alamos	36	106W	2.1	0.2	1	1986
7	Mt. Hopkins	USA	Dublin	32	111W	2.3	0.1	1	1985
8	La Palma	Germany	Kiel	29	18W	2.2	0.1	1	1986
9	Gran Sasso	Italy	Turin	42	14E	2.0	0.01	1	1988
10	Plateau Rosa	Italy	Turin	46	8E	3.5	0.01	5.5	1981
11	Mt. Aragats	USSR	Erevan	40	44E	3.2	0.1	1	1987
12	Tien Shan	USSR	Lebedev	42	75E	3.3	0.1	3	1974
13	Moscow	USSR	Moscow	56	37E	S.L.	1	3	1982
14	Baksan	USSR	Nucl. Sci.	43	43E	1.7	0.3	1	1984
15	Akeno Ranch	Japan	Tokyo	35	138E	0.9	1.0	3	1981
16	Mt. Norikura	Japan	Tokyo	36	137E	2.8	0.1	1	1988
17	Ooty	India	Tata	11	77E	2.2	0.1	2	1984
18	Kolar	India	Tata	13	78E	0.9	1	1.5	1984
19	South Pole	Antarctica	Bartol	-90	0	2.5	0.1	1	1988

表 7-2 1985 年頃実施されていた地表アレイによるガンマ線観測の場所とグループ名 282

7.4.1 節で述べたように、1963 年にジェリーとポーターが撮像に Image Intensifier を使用することを提唱し²⁶⁴、1977 年に Weekes と Turver が PMT のアレイを使用することを提唱した²⁸⁷。1984 年に Mt. Hopkins に 37 pixels の Imaging camera が設置され、1988 年には図 7-6 に示した 109 本の PMT からなる焦点面検出器で EAS のチェレンコフ像が撮像されるようになった²⁷⁷。1985 年にヒラス(A.M. Hillas)がシミュレーションにより、陽子とガンマ線によるシャワー像の違いを示し(図 7-9)、約 97%の陽子によるシャワーがバックグラウンドとして排除できることを示した²⁸⁸。

²⁸⁷ T.C. Weekes and K.E. Turver: "Gamma-ray astronomy from 10-100 GeV: A new approach", Proc. 12th Eslab Symp., Frascati, (ESA SP-124) (1977) 279.

²⁸⁸ A.M. Hillas: "Cherenkov light images of EAS produced by primary gamma", Proc.

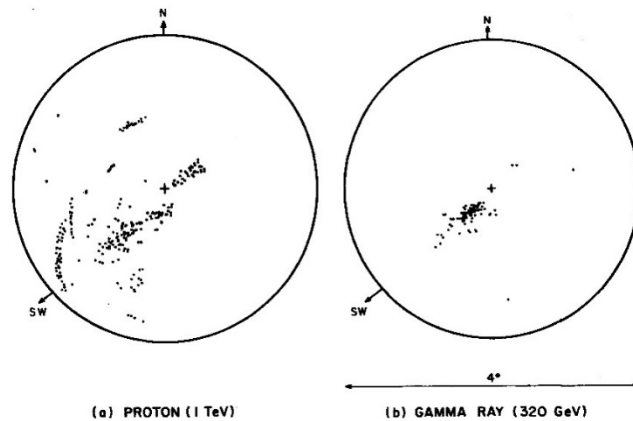


図 7-9 陽子によるシャワーのチェレンコフ像(左)と、ガンマ線による像(右)²⁸⁸. 陽子によるシャワーは、ミューオンのチェレンコフ光などで、像が広がる.

Mt. Hopkins では、設置された Imaging camera で、Crab Nebula の観測がおこなわれた. 源方向とはずれた方向を交互に観測し、ON-OFF の事象数を描いたのが図 7-10 である²⁸⁹. 横軸は、チェレンコフ像の幅を表したものと考えてよい. この幅が 0.2 度より狭い領域にガンマ線は集中しており、この選別により 97%のバックグラウンドが排除された. この頃表 7-1 に示したように ACT の多くの実験がなされ、多くの結果が報告されているが、Mt. Hopkins の結果の信号は 20σ で、単独の観測で初めて確信のもてる結果と言える.

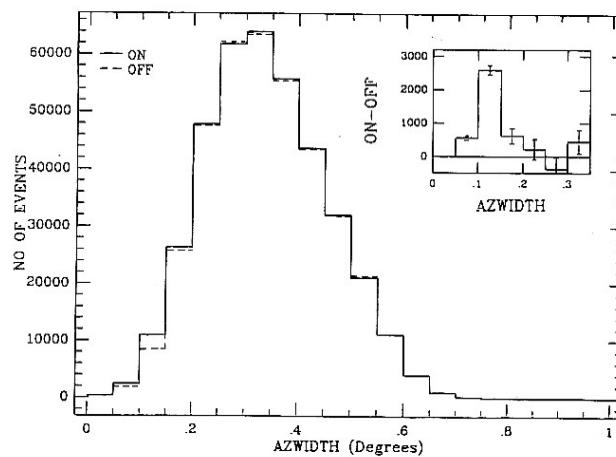


図 7-10 Crab Nebula 方向からのシャワー(ON-実線)数と Crab からはずれた方向(OFF-点線)からのシャワー数を、シャワー像の広がり幅(AZWIDTH)を関数として描いたもの²⁸⁹. ON-OFF のシャワー数の差の分布が図の右上に挿入されている. AZWIDTH=0.2 以内に 20

19th ICRC, La Jolla, 3 (1985) 445.

²⁸⁹ G. Vacanti, M.F. Cawley, E. Colombo, D.J. Fegan, A.M. Hillas, P.W. Kwok, M.J. Lang, R.C. Lamb, .D.A. Lewis, D.J. Macomb, K.S. O'Flaherty, P.T. Reynold and T.C. Weekes: "Gamma-ray Observations of the Crab Nebula at TeV Energies", *Astrophys. J.*, 377 (1991) 467.

σ の増大が見られる.

7.4.6 ガンマ線観測その後

1987年にマゼラン星雲中の超新星爆発(SN1987A)にともない、再びガンマ線観測が注目された。日本では各所の大学が共同で、ニュージーランドのブラックバーチ山上に急遽 EAS アレイとチェレンコフ望遠鏡を設置(JANZOS)して7年間観測が行われたが、 10^{12} eV から 10^{15} eV 領域ではガンマ線は観測できなかった²⁹⁰。しかしこの実験が日本グループの TeV 領域のガンマ線源探索実験のきっかけになり、木舟正を中心とするオーストラリア・ウーメラにおける CANGALOO 実験²⁹¹が始まった。

また 1989 年から中国チベット自治区ヤンパーチン(高度 4300 m)に、宇宙線研究所と中国科学院高能物理研究所が共同して EAS 観測装置を設置し、1990年から観測がはじまった(詳細と文献は 9.2 節参照)。 10^{12} eV という EAS としては低いエネルギーから高頻度で観測し、その高精度の到来方向決定と併せて、EAS による月や太陽の影を明確に捕らえた装置であり、極めて信頼度が高い。地表 EAS アレイでは初めて 10^{12} eV 領域のガンマ線源の観測に成功したことは特筆すべきことである。

ACT によるガンマ線源探索実験はその後急速に発展し、現在、VERITAS, CANGAROO, MAGIC, HESS と大型望遠鏡の時代に入っている。

²⁹⁰ W.H. Allen, et al. (JANZOS Collaboration): “Search for point sources of ultrahigh energy γ rays in the southern sky”, Phys. Rev. D, 48 (1993) 466.

²⁹¹ T. Hara, T. Kifune, Y. Matsubara, Y. Mizumoto, Y. Muraki, S. Ogio, T. Suda, T. Tanimori, M. Teshima, Y. Yoshikoshi and P.G. Edwards: “A 3.8 m imaging Cherenkov telescope for the TeV gamma-ray astronomy collaboration between Japan and Australia”, Nucl. Instrum. Methods, A 332 (1993) 300,

第8章 モンテカルロ・シミュレーション技術の発展

8.1 グループ毎のモンテカルロ・シミュレーション結果の不一致

EAS は多くの素過程の積み重ねであり、それぞれの揺らぎが積み重なったカスケード・シャワーなので、EAS の種々の観測値からそのまま一次宇宙線のエネルギー、組成、超高エネルギー核反応の情報は得られない。実験結果と比較するには、モンテカルロ法により核カスケードをシミュレートし、平均値やその揺らぎばかりでなく、急激に減少する一次宇宙線のエネルギー・スペクトルや組成による観測量への影響を知らなければならない。

1960 年代に入って、実験値を解釈するために、各研究グループ毎に EAS のモンテカルロ・シミュレーションがさかんに行われるようになった。核相互作用としては、コッコロニ(G. Cocconi)、コエスター(L.J. Koester)、パーキンス(D.H. Perkins)による現象論的モデル²⁹²が CKP モデルとして頻繁に使用された。1970 年代初め頃からは、陽子-空気核の非弾性衝突断面積は一定とし、エネルギー E_0 の入射粒子(N, π)からエネルギー E の二次粒子(N, π)の生成断面積 F_{NN} , $F_{N\pi}$, $F_{\pi\pi}$ について、 $F_{ab}(E, E_0)$ は $F_{ab}(E/E_0)$ と近似できると仮定するモデル²⁹³ (Feynman scaling with constant cross-section)が多くのシミュレーションで使われた。当時シミュレーション方法とその結果について、グリーダー(P.K.F. Grieder)²⁹⁴、柴田徹²⁹⁵、ガイサー(T.K. Gaisser)等²⁹⁶、イヴァネンコ(I.P. Ivanenko)等²⁹⁷、多くの論文が発表されている。日本では、他に原子核研究所のデータ解析に棚橋五郎、BASJE のデータ解析に水本好彦が EAS シミュレーション・プログラムを開発していた。

それぞれの研究グループは独自の計算或いはシミュレーションで観測結果を解釈していたため、例えグループ間で観測データがほぼ一致していても、その解釈の結果は必ずしも一致していなかった。このような状態の解決のために、1981 年のパリで開催された国際宇宙線学会の際、リンズレイ(J. Linsley)は「カスケード・シミュレーション・ワークショップ」を開催した。リンズレイはシャワーの最大発達の高さ X_{\max} の変化の一次宇宙線エネルギー E_0 の変化に対する割合 $d(X_{\max})/d(\ln E_0)$ を “elongation rate” と名付け、この量は輻射長

²⁹² G. Cocconi, L.J. Koester, D.H. Perkins: “Calculation of particle fluxes from proton synchrotrons of energy 10 and 1000 GeV”, High Energy Physics Study Seminars n.28 (Part II), UCID-1444; also UCRL-10022, (1961) 167.

²⁹³ R.P. Feynman: “Very High-Energy Collisions of Hadrons”, Phys. Rev. Lett., 23 (1969) 1415.

²⁹⁴ P.K.F. Grieder: “Computer Simulation of Air Showers Part II; Particle Spectra and Distribution for Proton and Heavy Primary Initiated Showers”, Proc. 14th ICRC, München, 8 (1975) 2889.

²⁹⁵ 柴田徹: CRL Report 53-77-12 (Cosmic Ray Laboratory, Univ. of Tokyo) (1977).

²⁹⁶ T.K. Gaisser, R.J. Protheroe, K.E. Turver and T.J.L. McComb: “Cosmic rays and particle interactions above 10^{15} eV”, Rev. Mod. Phys., 50 (1978) 859.

²⁹⁷ I.P. Ivanenko, B.L. Kanevsky and T.M. Roganove: “Calculation of the Longitudinal EAS Evolution According to a Model Involving Violation of Scaling in the Pionization Region”, Proc. 16th ICRC, Kyoto, 9 (1979) 7.

(radiation length X_0)より大きくなりえず、ほぼ $(1-B)X_0$ であることを示していた²⁹⁸。Bはパイオンの多重度のエネルギー依存性を E^B としたときのBである。リンズレーはこのワークショップの参加者に、それぞれのシミュレーション・コードを使い、「scaling with constant cross section」を標準モデルとして、陽子が天頂方向から大気中に入射したときのelongation rate」を提示することを求めた。

ワークショップに持ち寄られたシミュレーション結果をまとめると、① 使用されている X_0 の値、② p-N, π -N 反応の平均自由行程 λ_{pN} , $\lambda_{\pi N}$ 等の値、③ シミュレーションで追跡する粒子の最少エネルギーの値、④ パイオンの衝突において、大きい x (= E/E_0 , Feynman x と呼ばれる)の中性 π の割合、等がシミュレーション・コード毎で異なっていることや、(a) あらゆるカスケード段階でのエネルギー保存のチェックがなされていない、(b) パイオン崩壊が無視されている、等のシミュレーション・コードがあつたりして、各シミュレーションで同じ相互作用モデルを使っても、transition curve や elongation rate などの結果がかなり異なっていることが明らかになった。このワークショップで明らかになった問題点は、リンズレーとヒラス(A.M. Hillas)によってまとめられ²⁹⁹、以後シミュレーション担当者の注意を喚起することになった。

このワークショップの報告集の中で、ヒラスは二次粒子の全てを追跡する必要がなく、一次宇宙線エネルギーを E_0 とすると、ある限界エネルギーをD(例えば $10^{-4}E_0$)とすれば、D以下の二次粒子については一部の粒子のみ追跡し、その結果に、重みをかければ(例えば5%の粒子のみ追跡するならば、1粒子の結果を20倍にする)、実験と比較できる精度を保てる事を示す“Thin sampling”法を提唱した³⁰⁰。この方法は計算時間の大幅な短縮となり、以後多くの研究者に使用され、シミュレーション結果の発表の際には、Dの値及びThin samplingの割合が明記されるようになった。

8.2 シミュレーション技術の進化

1980年代に入り、大容量の大型コンピューターが使用可能となり、現在でも使用されているEASシミュレーションプログラムが開発された。ヒラスによるMOCCA(MONte-Carlo CAscades)³⁰¹は一般に公開された最初のプログラムであった。これはパスカルで書かれたた

²⁹⁸ J. Linsley: “Structure of large air showers at depth 834 g/cm² III – Applications”, Proc. 15th ICRC, Plovdiv, 12 (1978) 89.

²⁹⁹ J. Linsley and A.M. Hillas: “Proceedings of the Paris Workshop on Cascade Simulations”, (Texas Center for the Advancement of Science and Technology, College Station, Texas and Albuquerque, New Mexico) (1982)

³⁰⁰ A.M. Hillas: “Two interesting techniques for Monte-Carlo simulation of very high energy hadron cascade”, in J. Linsley and A.M. Hillas above, p.39. ; Proc. 16th ICRC, Kyoto, 6 (1979) 13.

³⁰¹ A.M. Hillas: Proc. 17th ICRC, Paris, 8 (1981) 193; “Angular and energy distribution of charged particles in electron-photon cascades in air”, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 8 (1982) 1461; “Shower simulation: Lessons from MOCCA”, Nucl. Phys. B – Proc. Suppl., 52 (1997) 29.

め広く普及しなかったが, Pierre Auger Project の準備にあたって Fortran に書き換えられると同時に, 改良が加えられ, 1997 年に AIRES³⁰²として復活した. MOCCA の当初の核相互作用モデルは比較的単純であり, 後に minijet model である SIBYLL コード³⁰³が加えられた.

COSMOS³⁰⁴は笠原昌克により当初は山上に露出されたエマルジョン・チェンバーの現象を解析するために開発されたが, すぐに EAS 解析にも適用できるようになり, AGASA の当初のエネルギー推定に使われた²³⁹. チベット空気シャワー実験の解析のため, その後も改良が加えられ³⁰⁵, GENAS³⁰⁶/COSMOS として 10^{20} eV まで速いスピードでシミュレーション可能となった.

CORSIKA³⁰⁷はドイツの KASCADE の建設とともに, 主としてクナップ(J. Knapp)とヘック(D. Heck)によって開発された EAS のシミュレーション・コードで, 当初から誰もが使用できるように使用マニュアルが解放された結果, 多くの研究者に使用されている. 問題点が指摘される毎にプログラムはすみやかに修正され, 信頼できかつ使いやすいシミュレーションコードとして, 殆どの EAS 実験の解析に使用されるようになった. 核相互作用モデルは, 高エネルギー領域では VENUS³⁰⁸, QGSJET³⁰⁹, DPMJET³¹⁰, SIBYLL³⁰³, HDPM³¹¹と選択でき, 低いエネルギー領域では GHEISHA³¹²と EGS4³¹³が使われている. 入射粒子はガンマ線, 陽子の他あらゆる原子核が可能で, エネルギー領域は 10^{12} eV から 10^{21} eV まで適用できる. また一次ガンマ線観測用のチェレンコフ光発生コード, 水平空気シャワー

³⁰² S. Sciutto: “AUGER Collaboration AIRES: A minimum document, Technical Note”, GAP-97-029 (1997); available electronically at www2.fisica.unlp.edu.ar/auger/aires

³⁰³ J. Engel, T.K. Gaisser, P. Lipari and T. Stanev: “Nucleus-nucleus collisions and interpretation of cosmic-ray cascades”, Phys. Rev. D46 (1994) 5013.

³⁰⁴ K. Kasahara, S. Torii and T. Yuda: “Extensive Simulation of Gamma and Hadron Families I – Assumption and Procedure”, Proc. 16th ICRC, Kyoto, 13 (1979) 70.

³⁰⁵ K. Kasahara: “A technique for reducing the computational time of electron-photon cascade shower simulation”, ICRR(Institute for Cosmic Ray Research, Univ. of Tokyo) 217-90-10 (1990) 1.

³⁰⁶ K. Kasahara and S. Torii: “A subroutine package for the fast simulation of air showers and response of surface detectors”, ICRR 217-90-10 (1990) 11.

³⁰⁷ J. Knapp and D. Heck: “Extensive Air Shower Simulation with CORSIKA: A Users Manual”, KfK(Kern-forschungszentrum Karlsruhe) 5196B (1993); D. Heck, J. Knapp, J.N. Capdeville, G. Schatz and T. Thouw: “CORSIKA; a Monte Carlo code to simulate extensive air shower”, Report FZKA 6019 (Forschungszentrum Karlsruhe) (1998)

³⁰⁸ K. Werner: “Strings, pomerons and the VENUS model of hadronic interactions at ultrarelativistic energies”, Phys. Rep. 232 (1993) 87.

³⁰⁹ N.N. Kalmykov et al.: Physics of Atomic Nuclei, 58 (1995) 1728.

³¹⁰ J. Ranft: “Dual parton model at cosmic ray energies”, Phys. Rev. D51 (1995) 64.

³¹¹ J.N. Capdevielle: “A Monte Carlo generator for cosmic-ray collisions”, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 15 (1989) 909.

³¹² H. Fesefeldt: “The Simulation of Hadronic Showers -Physics and Application-“, PITHA (Rheinisch Westfälische Technische Hochschule, Aachen) 85/02 (1985)

³¹³ W.R. Nelson et al.: “The EGS4 code system”, SLAC(Stanford Linear Accelerator Center) 265 (1985).

用コード、ニュートリノ生成コードなども加えられている。

CORSIKA を使ったシミュレーション結果の系統誤差は、加速器エネルギー領域を超えたエネルギー領域での衝突断面積、非弾性度など核相互作用の様相がモデルにより大きく異なっていることによる³¹⁴。CORSIKA コードを使って、核相互作用モデルの違いがクナップにより比較された³¹⁵。一例として、図 8-1 に陽子—空気核非弾性衝突断面積のエネルギー依存性が核相互作用モデル及び宇宙線実験で求められた値と比較したものを示す。

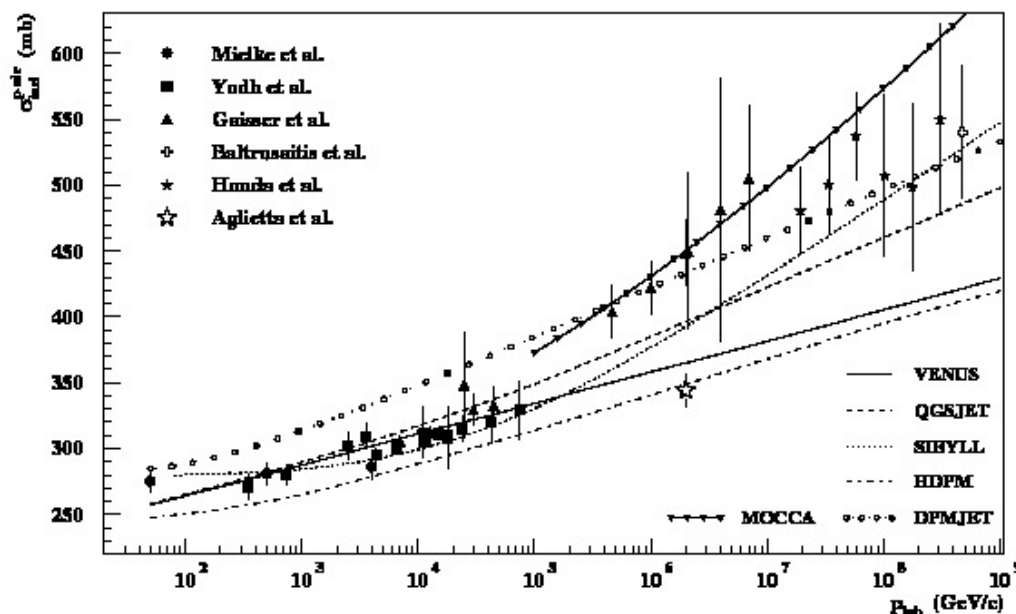


図 8-1 陽子—空気核非弾性衝突断面積のエネルギー依存性³¹⁵。宇宙線実験データ(Mielke et al.³¹⁶, Yodh et al.³¹⁷, Gaisser et al.³¹⁸, Baltrusaitis et al.¹⁹⁸, Honda et al.³¹⁹, Aglietta et al.³²⁰)と CORSIKA で利用できる核相互作用モデルの値との比較

なお 2013 年 4 月に CORSIKA は v7.37 が公開され、7 TeV までの LHC(Large Hadron

³¹⁴ 相互作用モデルの違いについて、例えば R. Engel: “Very High Energy Cosmic Rays and Their Interactions”, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 151 (2006) 437.

³¹⁵ J. Knapp: “High-Energy Interactions and Extensive Air Showers”, Rapporteur talk, Proc. 25th ICRC, Durban, 8 (1997) 83.

³¹⁶ H.H. Mielke, M. Foller, J. Engler and J. Knapp: “Cosmic ray hadron flux at sea level up to 15 TeV”, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys., 20 (1994) 637.

³¹⁷ G.B. Yodh, S.C. Tonwar, T.K. Gaisser and R.W. Ellsworth: “Proton-proton cross sections from 1 to 100 TeV”, Phys. Rev. D 27 (1983) 1183.

³¹⁸ T.K. Gaisser, U.P. Sukhatme and G.B. Yodh: “Hadron cross sections at ultrahigh energies and unitarity bounds on diffraction”, Phys. Rev. D 36 (1987) 1350.

³¹⁹ M. Honda, M. Nagano, S. Tonwar, K. Kasahara, T. Hara, N. Hayashida, Y. Matsubara, M. Teshima and S. Yoshida: “Inelastic Cross Section for p-Air Collisions from Air Shower Experiments and Total Cross Section for p-p Collisions up to $s^{1/2}=24$ TeV”, Phys. Rev. Lett., 70 (1993) 525.

³²⁰ M. Aglietta et al.(EAS-TOP collaboration): Proc. 25th ICRC, Durban, 6 (1997) 37.

Collider)データを取り入れた EPOS-LHC³²¹, QGSJETII-04³²²などの核相互作用モデルによるシミュレーションが可能となっている³²³.

³²¹ S. Ostapchenko: “Monte Carlo treatment of hadronic interactions in enhanced Pomeron scheme: I. QGSJET-II model”, Phys. Rev. D83 (2011) 014018.

³²² T. Pierog, Iu Karpenko, J.M. Katzy, E. Yatsenko and K. Werner: “EPOS LHC: test of collective hadronization with LHC data”, arXiv:1306.0121 [hep-ph] (2013)

³²³ 詳しい説明や文献は, T. Pierog and D. Heck: “Air Shower Simulation with new Hadronic Interaction Models in CORSIKA”, Proc. 33rd ICRC, Rio de Janeiro, (2013) ID163.

第9章 knee 領域から 2nd knee 領域へ

1983 年のザモルスキー(M.Samorski)とシュタム(W. Stamm)の Cyg X-3 からのガンマ線観測の発表以来, 既存の空気シャワーアレイばかりでなく, CASA, CASA-MIA, GRAPES, HEGRA, EAS-TOP, KASCADE, Tibet-AS γ , SPASE など新設の大型装置が加わり, 全世界にわたって 19 の装置が稼働を開始したことを 7.4.3 節で述べた. 多くの努力にかかわらず 10^{15} eV 領域では Cyg X-3 からのガンマ線は観測されなかったが, 他の研究目的でチャカルタヤ山で研究を長く続けてきた BASJE と, 1980 年代までの空気シャワー観測の測定精度を格段に向上させ, 「knee」領域で成果をあげている Tibet-AS γ , KASCADE, GRAPE3 をとりあげる.

9.1 当初の一次ガンマ線観測実験以後の BASJE

チャカルタヤ山での宇宙線観測の始まり(1958 年)と, 一次ガンマ線探索を目的とした BASJE の始まり(1960 年)の経緯については, それぞれ 2.3.2 節と 3.2.4 節に書いた. この項ではその後の BASJE の主な観測について述べる.

1964 年に半径 150 m の円上まで拡大されたアレイによる最初のサイズ・スペクトルを El Alto(4200 m)での測定と比較したもの³²⁴を図 9-1 の左図に示す. この実験がなされた頃に BASJE アレイを利用して, チェレンコフ光の横ひろがり分布の測定から一次宇宙線の化学組成の推定(7.3 節)や, EAS からの電波の発生機構の研究(11.2 節)なども行われた.

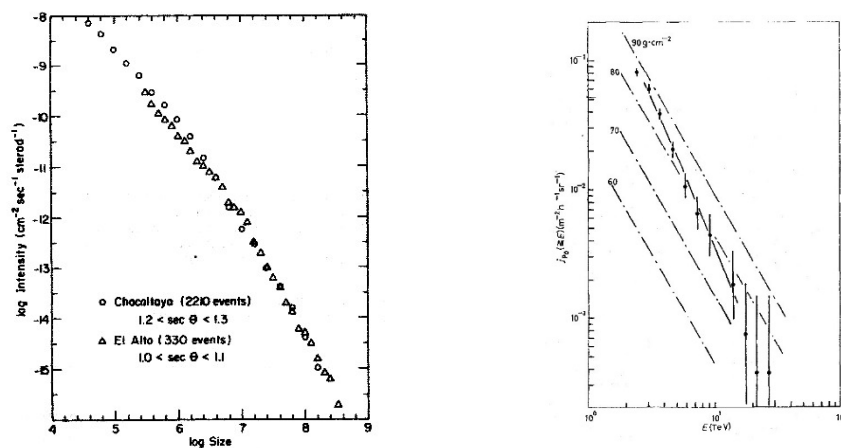


図 9-1 チャカルタヤのサイズ・スペクトルを El Alto の観測結果と比較したもの(左図)³²⁴. EAS をともなわない, 核子によるバーストの観測から求めた一次陽子の生き残りのスペクトル(右図)³²⁵. 一点鎖線は平均自由行程がエネルギーに依存しないと仮定して求めたチャカルタヤ高度で観測される生き残りの一次陽子エネルギー・スペクトル

³²⁴ H. Bradt, G. Clark, M. La Pointe, V. Domingo, I. Escobar, K. Kamata, K. Murakami, K. Suga and Y. Toyoda: "The primary energy spectrum from 8×10^{14} eV – 4×10^{17} eV", Proc. 9th ICRC, London, 2 (1965) 715.

1968年にはガンマ線探索を終え、全ての検出器をミュオン検出器の上に集中し、これらをアンチカウンターとして、EASを伴わない核子による吸収層内で行われるバーストの観測が行われた。すなわち、 550 g/cm^2 の深さまで衝突せずに生き残った陽子のエネルギー・スペクトルの測定である。図 9-1 右に観測されたスペクトル³²⁵を示す。一点鎖線はライアン(M.J. Ryan)等³²⁶による一次陽子スペクトルを使い、 p -A 衝突平均自由行程がエネルギーに依存しないとして求めた 550 g/cm^2 での陽子スペクトルである。観測されたバーストのエネルギー・スペクトルの冪の方が steep であり、エネルギーが増大するにつれ、mean free path が大きくなっていることがわかる。この最初の結果発表³²⁷を使って、Yodh 等は 1973年に素早く陽子-陽子衝突断面積がエネルギーと共に増大することを発表している³²⁸が、BASJE グループ自身による発表は 1975年と遅れをとった³²⁵。

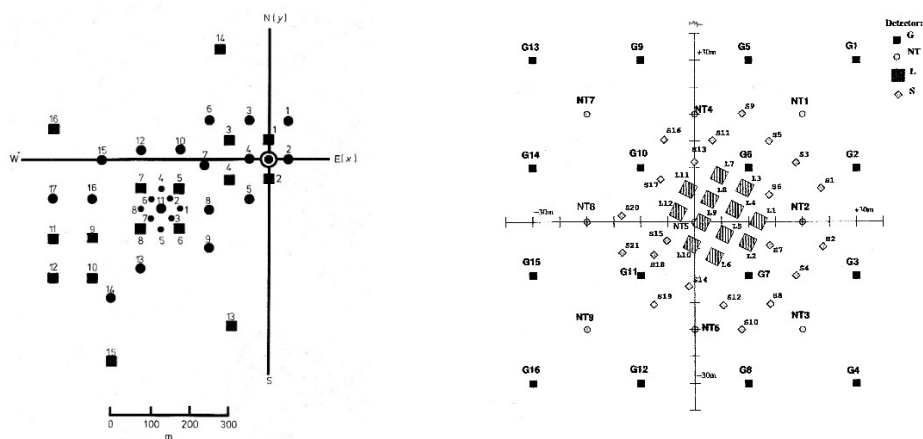


図 9-2 左図は 1971 年から $300 \text{ m} \times 700 \text{ m}$ の領域に拡大されたアレイ³²⁹。右図は knee 領域のシャワー観測のために設置された MAS(Minimum Air Shower)アレイの中央部³³³

1970 年頃から、観測エネルギー領域を 10^{18} eV まで延ばすべく、アレイは $700 \text{ m} \times 300 \text{ m}$ に拡張され(図 9-2 左、 \odot が 60 m^2 ミュオン検出器)、1971 年から 1975 年までは、電磁成分、ミュオン成分の横広がり分布の測定をおこない、天頂角毎のサイズ分布から等強度法(equi-intensity cut method)により、チャカルタヤ高度より深い大気中でのシャワーの縦

³²⁵ C. Aguirre, A. Trepp, G.R. Mejia, K. Murakami, K. Kamata, Y. Toyoda, T. Maeda, C. Yokoyama, P.K. MacKeown, K. Suga, K. Uchino and T. Kaneko: “Energy Spectrum of Surviving Protons with Energies (3 ÷ 30) TeV at 5200 m a.s.l. and the Cross-Section for Proton – Air-Nucleus Collisions”, Nuovo Cimento B, 27 (1975) 263.

³²⁶ M.J. Ryan, J.F. Ormes and V.K. Balasubrahmanyam: “Cosmic-Ray Proton and Helium Spectra above 50 GeV”, Phys. Rev. Lett., 28 (1972) 985, 1497(E).

³²⁷ K. Kaneko, C. Yokoyama, C. Aguirre, A. Trepp, G.R. Mejia, K. Murakami, K. Kamata, Y. Toyoda, T. Maeda, K. Suga, K. Uchino, M. Lapointe and P.K. MacKeown.: “Nuclear Interactions of Protons of Energies 10^{12} - 10^{14} eV (Chacaltaya Burst Experiment)”, Proc. 12th ICRC, Hobart, 7 (1971) 2759.

³²⁸ G.B. Yodh, Yash Pal and J.S. Trefil: “Comment on the Evidence for Rapidly Rising p - p Total Cross Section from Cosmic-Ray Data”, Phys. Rev. D 8 (1973) 3233.

方向の発達を決め、 $5 \times 10^{16} \sim 3 \times 10^{18}$ eV にわたるエネルギースペクトルの決定をおこなった³²⁹。なお 1974 年に菅浩一が原子核研究所から東工大に移動し、以後 BASJE は東工大を中心とするグループとして推進されている。

1976 年から 1980 年にはミューオンの到着時間分布により³³⁰、1981 年から 1984 年まではチェレンコフ光の到着時間分布により³³¹、チャカルタヤ山より上空での EAS のミューオン成分、電磁成分の縦方向の発達を調べた。これに *equi-intensity cut method* で得たチャカルタヤ山高度以下の結果と合わせて、 10^{17} eV 領域でのシャワー全体の縦方向発達像を調べた。その結果は、シャワーの発達はパイオン生成の多重度が $E^{1/4}$ に比例する相互作用モデルから予想される分布より早く、一次宇宙線が非常に重い原子核か、多重度が大きい相互作用に変化していると結論づけている^{330,331}。

1983 年のキール大学の Cyg X-3 からのガンマ線観測の報告を受けてすぐに、図 9-2 の左図の●のまわりに、 1 m^2 検出器を密に配置し、 3×10^{13} eV 以上のガンマ線観測が再開された。幾つかの点源観測が報告されているが、他グループにより確認されていない。

1995 年から各種の手法を用いて 10^{14} から 10^{16} eV と knee を挟む領域での化学組成の変化の観測がおこなわれた。すなわち、チェレンコフ光の時間分布³³²、小シャワー観測用に新しく配置された MAS(Minimum Air Shower)アレイ(図 9-2 の右のアレイがその中央部)による等頻度法による縦方向発達³³³、チェレンコフ光の横広がり分布の測定³³⁴をシミュレーションの結果と比較して親粒子の平均組成が求められた。図 9-3 に一次粒子の原子番号 A の自然対数 $\ln A$ の平均値をエネルギーの関数で示す。BASJE のそれぞれの手法で求めた結果が、□, ○, ■, ●でプロットしてあるが、いずれの手法でも、 10^{15} eV で $\langle \ln A \rangle = 2.5$ 、 $10^{16.5}$ eV で 3 以上であり、knee 以上で重い核の割合が増大することを示している。

³²⁹ C. Aguirre, G.R. Meija, H. Yoshii, T. Kaneko, P.K. MacKeown, F. Kakimoto, Y. Mizumoto, K. Suga, M. Nagano, K. Kamata, K. Murakami, K. Nishi and Y. Toyoda: "Energy Spectrum of Primary Cosmic Rays from 10^{16} to 10^{19} eV Determined from Air Showers Observed at 5200 m a.s.l.", Proc. 15th ICRC, Plovdiv, 8 (1977) 218.

³³⁰ F. Kamikoto, T. Kaneko, Y. Mizumoto, K. Suga, N. Inoue, K. Nishi, Y. Yamada, N. Tajima, E. Goto, H. Nakatani, H. Yoshii, R. Anda, C. Aguirre, P.K. MacKeown, K. Murakami, T. Hara, Y. Toyoda and T. Maeda: "Longitudinal development of muons in large air showers observed at 5200 m a.s.l.", J. Phys. G: Nucl. Phys., 9 (1983) 339.

³³¹ I. Inoue, T. Kaneko, H. Yoshii, K. Hagiwara, F. Kakimoto, Y. Miyazaki, T. Enoki, K. Suga, K. Nishi, N. Martinic, P. Miranda and L. Siles: "Longitudinal development of air-shower electrons studied from the arrival time distributions of atmospheric Čerenkov light measured at 5200 m a.s.l.", J. Phys. G: Nucl. Phys., 11 (1985) 669.

³³² Y. Shirasaki et al.: "Chemical composition of primary cosmic rays with energies from 10^{15} eV to $10^{16.5}$ eV", Astropart. Phys., 15 (2001) 357.

³³³ S. Ogio et al.: "The energy spectrum and the chemical composition of primary cosmic rays with energies from 10^{15} eV to $10^{16.5}$ eV", Astrophys. J., 612 (2004) 268.

³³⁴ H. Tokuno et al.: "The cosmic ray primary composition at the knee region from lateral distributions of atmospheric Cherenkov photons in extensive air showers", Astropart. Phys., 29 (2008) 453.

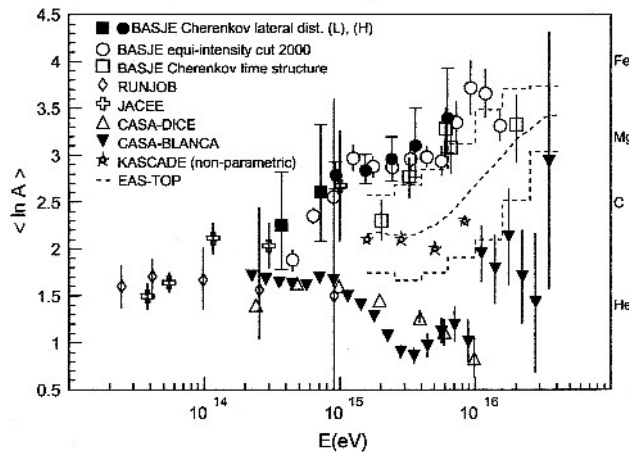


図 9-3 BASJE によるチェレンコフ光の時間分布(□)³³², 新しく配置した MAS アレイによる等頻度法による縦方向発達(○)³³³, チェレンコフ光の横広がり分布(■, ●)³³⁴ の測定により決定された化学組成の一次宇宙線エネルギーの依存性を他の実験結果と比較したもの。

9.2 チベット空気シャワー観測装置(Tibet AS- γ)

東京大学宇宙線研究所と中国科学院高能物理研究所との本格的「国際共同研究」は、1981年から始まった中国チベット自治区のカンパラ山(高度 5500 m)でのエマルジョン実験である³³⁵。この実験を通じて、当時複雑な事情をかかえた中国との信頼関係が高まり、キール大学の Cyg X-3 からの PeV 領域宇宙線観測の報を契機として、EAS アレイによるガンマ線観測が湯田利典を中心に企画された。アレイはチベット・ラサから約 100 km 離れたヤンパーチン(高度 4300 m)に設置されることが決まり、1988年から準備が始められた。1989年に天安門事件がおこり、渡航禁止や、装置のココム審査など幾多の困難があったが、翌1990年から最初のアレイ Tibet I による観測が開始した³³⁶。45台の fast-timing(FT) シンチレーション検出器(0.5 m²)と、20台の周辺の検出器が 15 m の間隔で格子状におかれ、10 TeV 以上のガンマ線観測を目的とした。20 Hz のトリガー頻度は当時の EAS 装置では群を抜いて高く注目をあびた。

1994年には、185台の FT 検出器(0.5 m²)が 36,900 m² の面積に追加され(Tibet II)。約 200 Hz という高頻度トリガーを実現している。Tibet II の一画 5,200 m² の面積に間隔 7.5 m の格子状に 77台の FT 検出器を加え、a few TeV という低いエネルギーから高頻度で観測が開始された。1996年には 235台の FT 検出器を 7.5 m 間隔領域に追加し、5,300 m² から 22,050 m² まで拡大している。高密度に配置された領域は 2002年には 37,000 m² に拡大さ

³³⁵ 日中共同研究の経緯は、湯田利典:「中国と 20 年」, ICRN ニュース, No.40 (2000) 4.

³³⁶ A.X. Huo et al. (Tibet AS γ Collaboration): "Tibet-AS γ Experiment", Proc. 21st ICRC, Adelaide, 2 (1990) 427.

れ、更にその周りに 56 台の FT 検出器を配置し、Tibet III へと発展している(図 9-4)³³⁷.

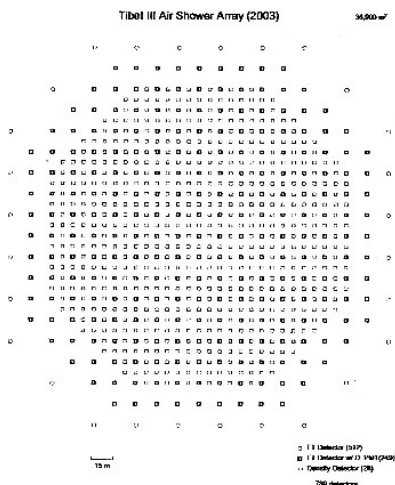


図 9-4 Tibet III 地表検出器アレイの配置図³³⁷

高精度の到来方向決定と高頻度トリガーにより、10 TeV 領域の EAS による月(図 9-5, 右)や太陽(図 9-5, 左)の影を初めて明確に捕らえた³³⁸. この月の影の大きさから、到来方向決定精度は 7 TeV では $0.87^\circ(+0.13^\circ/-0.10^\circ)$, 10 TeV では $0.54^\circ(+0.11^\circ/-0.08^\circ)$ であることが実証され、極めて高い評価を受けた. 1997 年にフレアを起こした活動銀河核 Mrk 501 から 3 TeV 以上のガンマ線³³⁹, 1999 年にはカニ星雲からのガンマ線³⁴⁰, 2000, 2001 年には Mrk 421 からフレア時にガンマ線³⁴¹, 等の観測に、地表 EAS アレイで初めて成功した.

チベット高度では、PeV 領域の空気シャワーの発達が極大に近く、観測量が一次宇宙線の種類や核相互作用モデルの依存度が小さいのが利点である。この装置で決定した「ひざ」エネルギー前後(10^{14} eV から 10^{17} eV)の全粒子エネルギースペクトル³⁴²を図 9-6 に示す.

³³⁷ M. Amenomori et al. (Tibet AS γ Collaboration): “Search for Steady Emission of 10-TeV Gamma Rays from the Crab Nebula, Cygnus X-3 and Hercules X-1 Using the Tibet Air Shower Array”, Phys. Rev. Lett., 69 (1992) 2468.

³³⁸ M. Amenomori et al. (Tibet AS γ Collaboration): “Cosmic-ray deficit from the directions of the Moon and the Sun detected with the Tibet air-shower array”, Phys. Rev. D, 47 (1993) 2675.

³³⁹ M. Amenomori et al. (Tibet AS γ Collaboration): “Observation of Multi-TeV Gamma Rays from Mrk 501 during Remarkable Flaring Activity in 1997 with the Tibet Air Shower Array”, Proc. 26th ICRC, Salt Lake City, 3 (1999) 382.

³⁴⁰ M. Amenomori et al. (Tibet AS γ Collaboration): “Observation of Multi-TeV Gamma Rays from Crab Nebula Using the Tibet Air Shower Array”, Astrophys. J., 525 (1999) L93.

³⁴¹ M. Amenomori et al. (Tibet AS γ Collaboration): “Multi-TeV Gamma-Ray Flares from Markarian 421 in 2000 and 2001 Observed with the Tibet Air Shower Array”, Astrophys. J. 598 (2003) 242.

³⁴² M. Amenomori et al. (Tibet AS γ Collaboration): “The Cosmic Ray Energy Spectrum

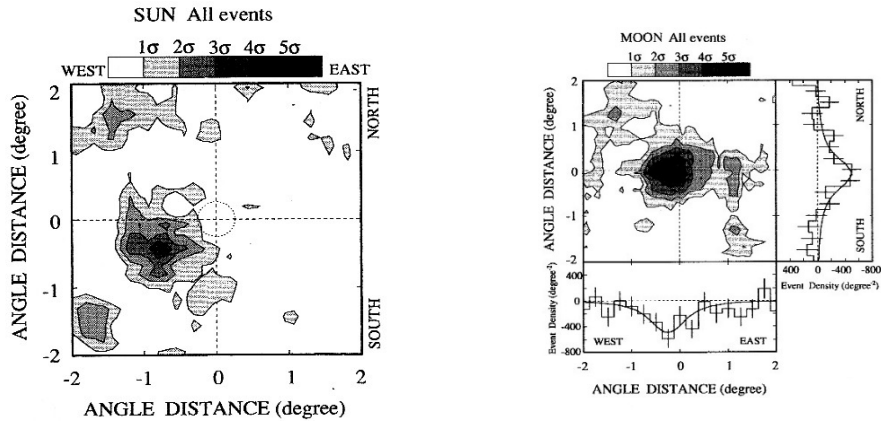


図 9-5 (左図) 太陽(中央の点線の円)を中心とした方向から、10 TeV 以上の宇宙線を平均バックグラウンドより少ない領域を 1σ 間隔の等頻度曲線で示したもの。太陽の影は地球-太陽間の磁場のために、約 0.9° ずれて、 3.7σ を示している。(右図) 月の影が 5.8σ の欠損として観測されている³³⁸。

Tibet II の段階で、X 線フィルムと鉛板を重ねた 80 m^2 のエマルジョンチェンバーがおかれた。その下にプラスチックシンチレーション検出器をおき、エマルジョンチェンバー内でおきる大きなバーストを識別できる特徴がある。一次陽子やヘリウムの平均自由行程は重い原子核に比べて長いので、若いシャワーとなる。従って高エネルギーのガンマ線バーストをとともなう確率が高い。

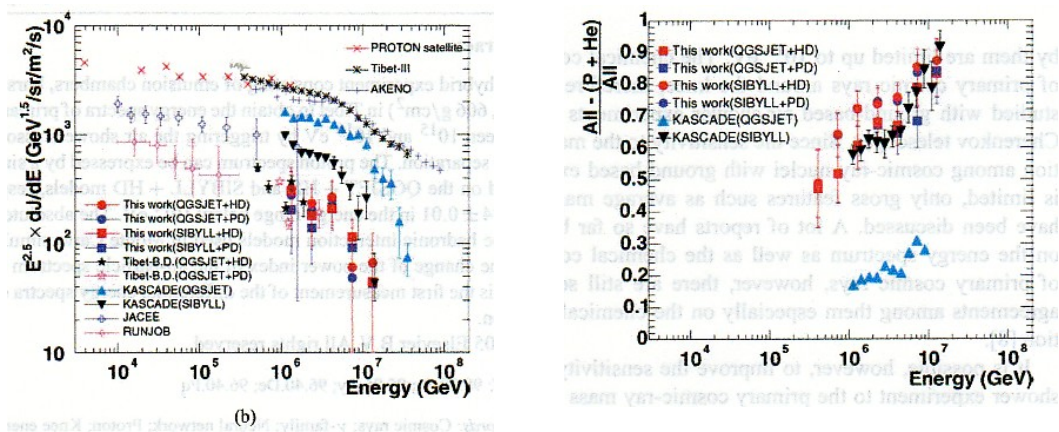


図 9-6 左図は Tibet II アレイで決めた一次宇宙線のエネルギースペクトルと、連動したエマルジョン・チェンバー、バースト検出器で決めた一次ヘリウムのエネルギースペクトルを他の実験結果と比較したもの³⁴²。右図は一次宇宙線に占める陽子とヘリウムの割合のエネルギー依存性³⁴³。印や色の違いはシミュレーションで使った相互作用モデルの違い。

between $10^{14.5} \text{ eV}$ and $10^{16.3} \text{ eV}$ Covering the 'knee' Region", *Astrophys. J.*, 461 (1996) 408.

この連動実験の結果をシミュレーションの期待値と比較することにより、「knee」近辺では、一次宇宙線の親粒子は陽子やヘリウム核である割合が 40~50%であり、エネルギーの増大とともにその割合は減少、すなわち重い原子核の割合が増大する³⁴³結果を得た(図 9-6 右).

次節で述べる地上実験の KASCADE の結果と比較してあるが、地上では相互作用モデルの違いで大きく異なる(図中の青い三角-QGSJET と黒の逆三角-SIBYLL)が、Tibet 高度ではその差は小さいことがわかる.

Tibet III で全粒子エネルギー・スペクトルを求めた結果を図 9-7 に示す.

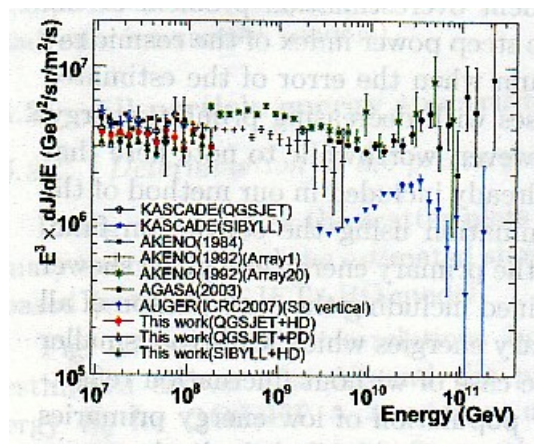


図 9-7 Tibet III アレイで 10^{17} eV まで延ばした(図中の This work)エネルギースペクトル

344

9.3 KASCADE と KASCADE-Grande

KASCADE は Karlsruhe Shower Core and Array DEtector の略であるが、その名のとおり、シャワーの芯を観測するために、ハドロン、 π 、K などの核活性成分とミューオンを測定する面積 320 m^2 の巨大で精密な中心検出器を持つことが特徴である。1980 年代末から建設が始まり、1996 年から観測が開始された³⁴⁵。地表アレイは $200 \text{ m} \times 200 \text{ m}$ の面積内に 13 m 間隔で、252 台の検出器が配置された。各検出器は直径 1 m の容器に入れた液体シンチレータ 4 台と、鉛(10 cm)と鉄板(4 cm)の下に置かれた 0.81 m^2 のプラスチックシンチレータ 4 台のミューオン検出器からなる。電磁成分検出器とミューオン検出器の占める

³⁴³ M. Amenomori et al. (Tibet AS γ Collaboration): “Are protons still dominant at the knee of the cosmic-ray energy spectrum?”, Phys. Lett. B, 632 (2006) 58.

³⁴⁴ M. Amenomori et al. (Tibet AS γ Collaboration): “The all-particle spectrum of primary cosmic rays in the wide energy range from 10^{14} eV to 10^{17} eV observed with the Tibet III air-shower array”, Astrophys. J., 678 (2008) 1165.

³⁴⁵ T. Antoni et al.(KASCADE collaboration 47 名): “The cosmic-ray experiment KASCADE”, Nucl. Instrum. Methods, A 513 (2003) 490.

面積の割合は、アレイ全体の面積のそれぞれ 1.3 %と 1.5 %であり、これまでの EAS 装置と比べて大きいのが特徴である。

KASCADE はほぼ海面レベルであり、観測目的とする 100 TeV 領域では、シャワー発達が最大となる高度からの減衰が大きく、EAS 内の測定される各成分のシャワー毎の変動が大きい。これを補うために、中央に置かれた核活性成分測定用の多層カロリメータを使用し、シャワー毎に電磁成分、ミューオン、核活性成分を精度よく決定し、前章で述べたシミュレーション・プログラム CORSIKA による結果と比較することにより、エネルギー・スペクトル、化学組成などを決定しようとする戦略である。

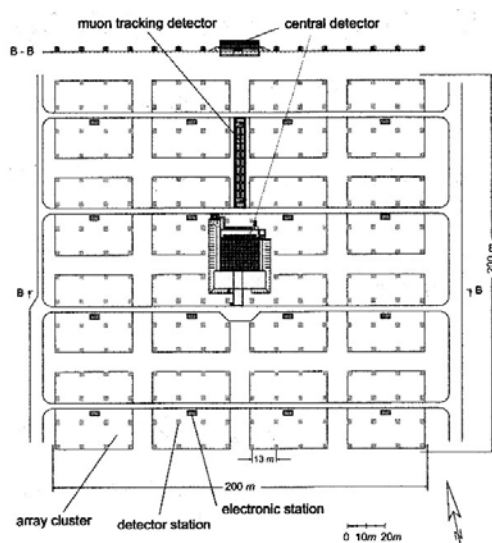


図 9-8 KASCADE アレイの検出器配置図³⁴⁵。中央が 320 m²の核活性成分とミューオン検出器

N_e , N_μ 関係を使い、一次宇宙線の組成を 5 つのグループにわけ、それぞれのエネルギー・スペクトルと全粒子エネルギー・スペクトルを求めた(図 9-9 左)³⁴⁶。解析には QGSJET, VENUS, SIBYLL の核相互作用モデルが使用された。全粒子エネルギー・スペクトルはどのモデルでも一致して 5 PeV に knee が観測されたが、エネルギーによる組成の割合は三つのモデルで一致しない。その後もシミュレーションを駆使して、さまざまな解析がなされたが、あらゆる観測値を一致して説明するモデルは存在せず、海面レベルでは核相互作用の不確かさが決定的結論を得ることの困難さを示している。図 9-9(右)は一次陽子のエネルギー・スペクトル³⁴⁷であるが、同じように核相互作用モデルに依存する。

³⁴⁶ T. Antoni et al.(KASCADE collaboration 44 名): “A non-parametric approach to infer the energy spectrum and the mass composition of cosmic rays”, *Astropart. Phys*, 16 (2002) 245.

³⁴⁷ T. Antoni et al.(KASCADE collaboration 44 名): “KASCADE measurements of energy spectra for elemental groups of cosmic rays: Results and open problems”, *Astropart.*

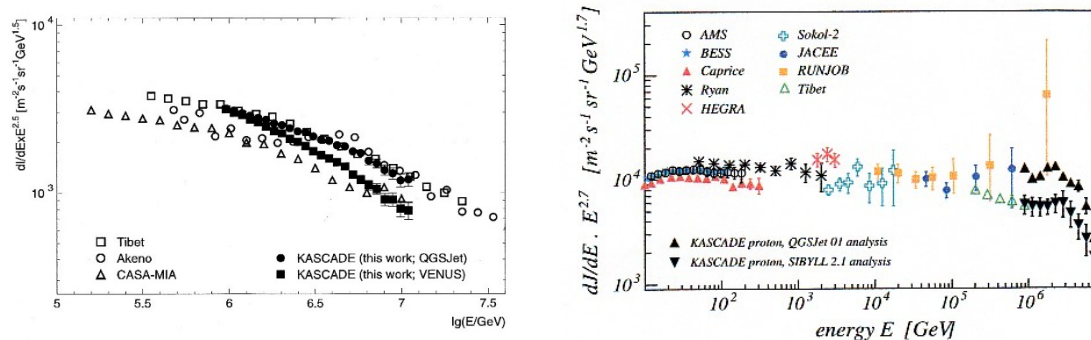


図 9-9 KASCADE の一次宇宙線エネルギースペクトル(左)³⁴⁶。陽子のエネルギースペクトル(右)³⁴⁷を他の実験と比較したもの。いずれも核相互作用モデルに依存する。

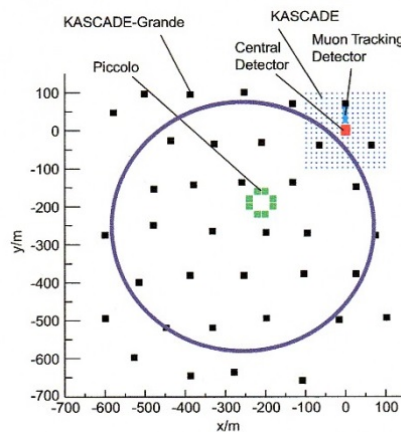


図 9-10 KASCADE-Grande の配置図³⁴⁸。右上の細かいアレイが KASCADE。

イタリアの地下グランサッソー観測所の上に 1989 年から稼働されていた EAS-TOP の終了(2000 年)にともない、使用されていた面積 10 m² のシンチレーション検出器 37 台が KASCADE を含む 0.5 km² の面積に約 137 m 間隔で設置され(図 9-10)、2003 年に観測が開始された³⁴⁸。

図 9-11 に一次宇宙線エネルギースペクトルを示す³⁴⁹。核相互作用モデルや、親粒子の種類、解析に使われた観測成分や解析手法に依存する。エネルギー指標パラメータとして、中心から距離 500 m での粒子密度 S(500)を使うと、Akeno, AGASA のスペクトルと接続し、鉄が親として N_μ や N_{ch}·N_μ 関係を使うと HiRes のスペクトルと接続する。

Phys, 24 (2005) 1.

³⁴⁸ G. Navarra et al. (他 52 名): “KASCADE-Grande: a large acceptance, high-resolution cosmic-ray detector up to 10¹⁸ eV”, Nucl. Instrum. Methods, A, 518 (2004) 207.

³⁴⁹ A. Haungs et al. (他 59 名): “Results on the cosmic ray energy spectrum measured with KASCADE-Grande”, Proc. 31st ICRC, Lodz, (2009).

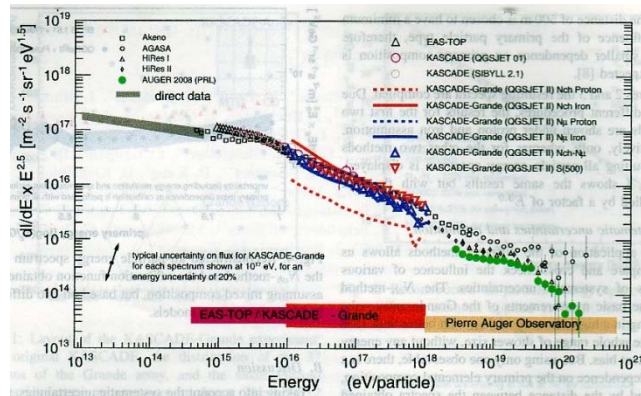


図 9-11 KASCAD-Grande によるエネルギースペクトルを他の実験と比較したもの³⁴⁹. 使用される核相互作用モデル, 観測成分, 解析手法に依存する.

9.4 GRAPES-3

大阪市立大学三宅研究室とインド・タタ研究所の国際共同研究は, 次章の 10.1.2 節で述べるように, 1960 年代初めから地下実験として始まり, 研究目的を変えながら 50 年以上継続されている. キール大学の Cyg X-3 からのガンマ線観測の発表の後, インドの南部ウーティ高原(高度 2200 m)で, ガンマ線観測を主目的とする Gamma Ray Astronomy at PeV EnergieS (GRAPES)計画を企画し, 2000 年頃から観測を開始した³⁵⁰(図 9-12).

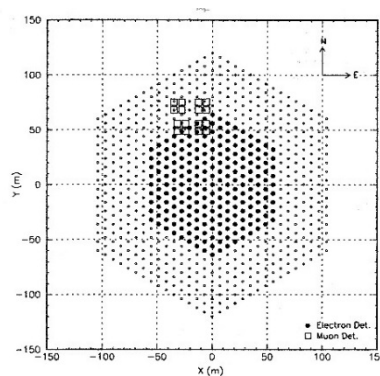


図 9-12 GRAPE-3 の地表検出器アレイ³⁵⁰. 16 個の口は, それぞれが 35 m²の面積のミューオン検出器

アレイは徐々に拡大され, 現在は GRAPES 3 として 0.25 m²のシンチレーション検出器

³⁵⁰ S.K. Gupta, Y. Aikawa, N.V. Gopalakrishnan, Y. Hayashi, N. Ikeda, N. Ito, A. Jain, A.V. John, S. Karthikeyan, S. Kawakami, T. Matsuyama, D.K. Mohanty, P.K. Mohanty, S.D. Morris, T. Nonaka, A. Oshima, B.S. Rao, K.C. Ravindran, M. Sasano, K. Sivaprasad, B.V. Sreekantan, H. Tanaka, S.C. Tonwar, K. Viswanathan and T. Yoshikoshi: "GRAPES-3 – A high-density air shower array for studies on the structure in the cosmic-ray energy spectrum near the knee", Nucl. Instrum. Methods, A 540 (2005) 311.

721 台が 8 m 間隔で、一辺 120 m の六角形の領域に配置されている。その一面に有効面積 35 m² のミュオン検出器 16 台(合計 560 m²)がまとめて設置³⁵¹されている(図 9-12 の□)。各ミュオン検出器は、4 層の比例計数管が井桁に並べられ、Fast Timing データがなくとも、ミュオンの方向が決定される。ミュオンの閾エネルギーは天頂方向で 1 GeV である。

特徴は大面積のミュオン検出器により、電磁カスケードを核カスケードから分離することであったが、PeV 領域での一次ガンマ線は観測されていない。knee 領域の化学組成の決定や、陽子が大気原子核と衝突して発生するミュオンが急激に増大する現象をとらえることによる太陽フレア時に放出される陽子の観測³⁵²などに取り組んでいる。

化学組成の解析は EAS 中のミュオンの多重度をパラメーターとし、陽子、ヘリウム、窒素、アルミニウム、鉄を親とするシミュレーションの結果を用い、各組成の割合を推定する。決定された一次宇宙線のエネルギー・スペクトルを図 9-13 の左に、陽子、ヘリウムのスペクトルを右図に示す³⁵³。

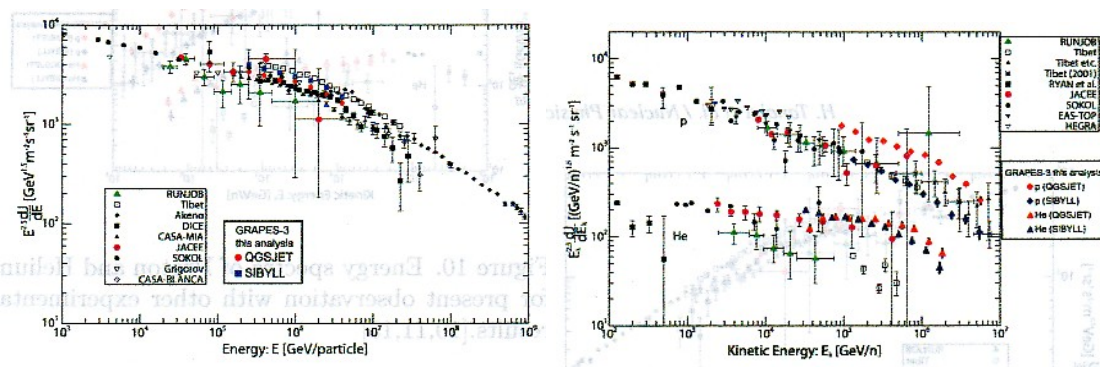


図 9-13 GRAPE-3 による一次宇宙線エネルギー・スペクトラム(左)と陽子、ヘリウムのエネルギー・スペクトルを他の実験と比較したもの³⁵³。核相互作用モデルは QGSJET と SIBYLL。

³⁵¹ H. Hayashi et al.: “A large area muon tracking detector for ultra-high energy cosmic ray astrophysics – the GRAPES-3 experiment”, Nucl. Instrum. Methods., A 545 (2005) 643.

³⁵² T. Nonaka et al.: “Did the 28 October 2003 solar flare accelerate protons to 20 GeV? – A study of the subsequent Forbush decrease with the GRAPES-3 tracking muon telescope”, Phys. Rev. D, 74 (2006) 052003.

³⁵³ H. Tanaka, S.K. Gupta, Y. Hayashi, N. Ito, A.Jain, S. Karthikeyan, S. Kawakami, T. Matsuyama, P.K. Mohanty, S.D. Morris, T. Nonaka, A. Oshima, B.S. Rao, K.C. Ravindran, M. Sasano, K. Sivaprasad, B.V. Sreekantan, S.C. Tonwar, K. Viswanathan and T. Yoshikoshi: “Study on nuclear composition of cosmic rays around the knee utilizing muon multiplicity with GRAPE-3 experiment at Ooty”, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 175 (2008) 280.

第10章 水平空気シャワー(Horizontal Air Shower, HAS)

東京大学原子核研究所でスパーク・チェンバーを 20 m² に拡大しながら観測を開始した 1965 年に、天頂角 86 度から約 3×10^{14} eV で、その中心付近に核活性成分を伴った HAS が観測され¹²⁶ 大気深く突入したミューオンによる核カスケード、大気又は宇宙起源のニュートリノによる核カスケードの可能性が論じられた。そしてこのような大天頂角から来る EAS は「水平空気シャワー(Horizontal Air Shower, HAS)」, 略して「水平シャワー」と名付けられたことを 3.2.5 節で述べた。

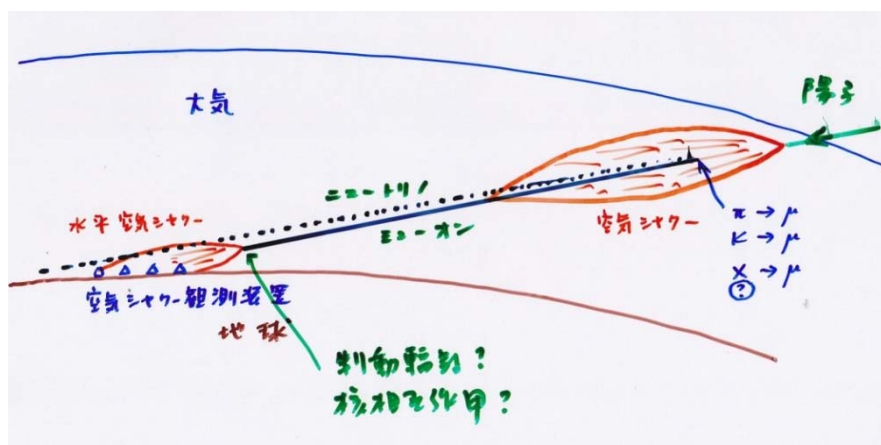


図 10-1 水平シャワーの成因の模式図

海面レベルに近い地上で、天頂角 70 度を超える大気層は $3,000 \text{ g/cm}^2$ を超え、陽子など原子核による EAS の電磁成分は完全に吸収され観測地点まで到達できない。観測される HAS は殆どが EAS シャワー中で出来た高エネルギー・ミューオンの制動放射による電磁カスケードシャワーである。大天頂角になると、EAS の発達初期の空気層密度が薄いので、超高エネルギー π や K 中間子のミューオンへの崩壊確率が大きくなり、垂直方向に比べ超高エネルギー・ミューオンの相対頻度は大きくなり、観測に有利になる。

一方エネルギーに比例して π , K の寿命が延びるので、超高エネルギー・大気ミューオンの絶対頻度は急激に減少し、宇宙からのニュートリノによるシャワーが観測できるかもしれない。そのような目的で、原子核研究所では 1966 年より、HAS に特化した装置で観測が始まった。

なお陽子や原子核による EAS は大天頂角になると、ほぼミューオンだけのシャワーとなる。本稿では、このようなシャワーをミューオン・シャワー又は MRS(muon remnant shower)と呼び、大気深く突入してつくる HAS と区別する。ハベラパークで、天頂角 85° で観測された 10^{20} eV 近くの MRS³⁵⁴を図 10-2 に黒点で示す。この観測値を説明するため

³⁵⁴ D. Andrews, A.C. Evans, R.P. Hughes, D.J. Marsden, R.J.O. Reid, I. Smolko, R.M. Tennet, A.A. Watson, J.G. Wilson and A.M. Wray: "General Results from the Haverah

に、ヒラス(A.M. Hillas)等の計算結果³⁵⁵が共に示されている。約 4 km にわたって殆ど平坦な粒子数(平均 $1.4/m^2$)分布は、約 10^{20} eV の EAS が大気を約 200 km 通過して、正負のミューオンに分離されたと説明された。それぞれのミューオンの平均エネルギーは約 100 GeV である。Pierre Auger Observatory ではこのような MRS も HAS と呼び、正負の分離を積極的に利用する解析も行われている³⁵⁶。

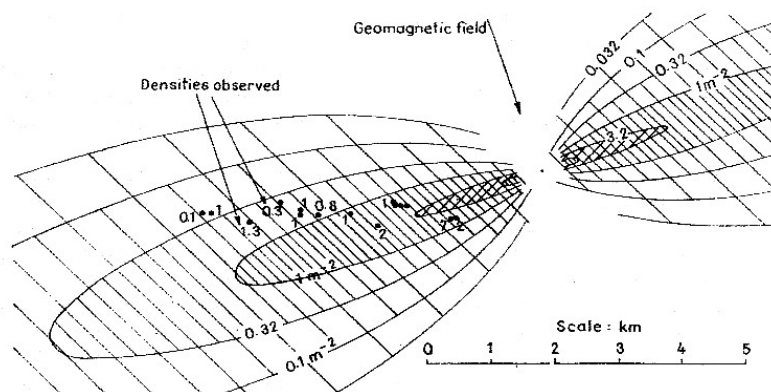


図 10-2 天頂角 85° で入射した約 10^{20} eV の EAS の観測されるミューオンの分布をシャワー一軸に垂直な平面での等粒子密度線で表したもの³⁵⁴。この面での地球磁場 0.466 gauss を仮定。軸に対して、正負の電荷のミューオンが分離されている。ハベラパークでの観測値が黒点で重ねてある。

10.1 当時の宇宙線ミューオン観測の状況

宇宙線ミューオンの研究目的は、

- (1) 高エネルギー・ミューオンのエネルギー・スペクトラムや荷電比は、一次宇宙線のエネルギー・スペクトラムとその化学組成、一次宇宙線と大気原子核との衝突によるミューオン発生機構(K/π)を反映する重要な基礎資料。
 - (2) ミューオンの質量は電子の 207 倍であるが、量子電磁力学の予測を超えた相互作用の存在の探求。
 - (3) チャームメソンからの崩壊ミューオンの測定から、陽子-核子相互作用におけるチャームメソンの生成断面積の測定。
- 等である。

Park Large EAS Array”, Acta Phys. Acad. Sci. Hugaricae, 29, Suppl. 3 (1970) 337.

³⁵⁵ A.M. Hillas, J.D. Hollows, H.W. Hunter and D.J. Marsden: “Calculations on the Particle and Energy-Loss Densities in Extensive Air Showers at Large Axial Distances”, Acta Phys. Acad. Sci. Hugaricae, 29, Suppl. 3 (1970) 533.

³⁵⁶ M. Ave, R.A. Vázquez and E. Zas: “Modeling horizontal air showers induced by cosmic rays”, Astropart. Phys., 14 (2000) 91.

10.1.1 電磁石スペクトロメータによる測定

ミューオンのエネルギー・スペクトルと荷電比の測定は、電磁石スペクトロメータによっておこなわれ、日本では1960年頃から名大の神谷等により数100 GeV程度まで行われた。外国ではアメリカのBNL研究所、イギリスのダーラム大学、ドイツのキール大学などで1 TeV程度まで実施された³⁵⁷。キール大学はイスラエルのテル・アヴィブ大学との共同実験(DEIS計画)で、1982年に7 TeVまでの測定結果³⁵⁸を発表している。

1972年から宇宙線研究所に大型電磁石スペクトロメータMUTRONが建設され、1975年からの観測で、水平方向で約20 TeVまで測定された³⁵⁹。この結果は一次宇宙線の化学組成が100 TeV領域まで1 TeV領域の組成と変わらないという結果を支持している。実験当初は、クォークレプトンの第3世代が確立されておらず、 μ -eの大きな質量差はミューオンの異常相互作用に押し付ける傾向があった。MUTRONではミューオンと鉄の非弾性散乱を詳しく解析した結果、より低いエネルギーで陽子をターゲットとした結果を外挿した結果と異なり、鉄核のシャドーイングの効果が見られた³⁶⁰。

10.1.2 地下実験

地下の深さを変えてミューオンの到達頻度からエネルギー・スペクトルを測定する方法と、浅い地下でミューオンが引き起こす電磁シャワーのスペクトルから求める方法がある。前者の代表は、大阪市大三宅三郎等がインド・タタ研究所と共同で実施したコラ金鉱での観測(KGF)である³⁵⁷。後者では、地下でエマルジョン・チェンバーを露出した日本の実験(μ ECC)や³⁶¹、ロシアのBaksanでのシンチレーション検出器による実験³⁶²がある。

インド・デカン高原にある世界最深の鉱山であるコラ金鉱で、1960年代始め頃からミューオンのdepth-intensityの観測が開始された。厚さ5 cmの鉛の上下に面積1.62 m²のプ

³⁵⁷ 三宅三郎：「 μ 中間子とニュートリノ」,(宇宙線研究, 武谷三男編、岩波書店)(1970) 137.

³⁵⁸ O.C. Allkofer, K. Carstensen, G. Bella, W.D. Dau, H. Jokisch, G. Kemeke, Y. Oren and R.C. Uhr: "Muon spectra from DEIS up to 7 TeV", Proc. 17th ICRC, Paris, 10 (1981) 321.

³⁵⁹ S. Matsuno, F. Kajino, Y. Kawashima, T. Kitamura, K. Mitsui, Y. Muraki, Y. Ohhashi, A. Okada, S. Suda, Y. Minorikawa, K. Kobayakawa, Y. Kamiya, I. Nakamura and T. Takahashi: "Cosmic-ray muon spectrum up to 20 TeV at 89° zenith angle", Phys. Rev. D 29 (1984) 1.

³⁶⁰ A. Okada, K. Mitsui, T. Kitamura, Y. Ohashi, Y. Muraki, T. Suda, I. Nakamura, Y. Kawasima, S. Matsuno, F. Kajino, T. Aoki, S. Higashi, S. Ozaki, T. Takahashi, K. Honda, K. Kobayakawa, H. Inazawa, Y. Minorikawa, M. Shibata, H. Shibata, Y. Kamiya and Y. Teramoto: "Inelastic Scattering of Cosmic Ray Muons on Iron Nuclei and the Virtual Photon Shadowing", Fortschr. Phys, 32 (1984) 135.

³⁶¹ K. Mizutani, A. Misaki, T. Shirai, Z. Watanabe, M. Akashi and Y. Takahashi: "Measurement of the energy spectrum of cosmic-ray muons at sea-level with emulsion chambers", Nuovo Cimento A, 48 (1978) 429.

³⁶² M.Yu. Andreyev, E.A. Chudakov, I.V. Gurentsov and M.I. Kogai: "Muon Intensity at Great Depth in Zenith Angle Intervals 50°-70° and 70°-85° Obtained by Baksan Underground Scintillation Telescope", Proc. 21st ICRC, Adelaide, 9 (1990) 301.

ラスチックシンチレーターを置き、地下 270, 600, 1130, 1415, 2110, 2760 m で、ミューオン強度が測定された。それぞれの深さを大気トップからの水深になおすと、816, 1812, 3410, 4280, 6380, 8400 mwe(100g/cm²)に相当する。

各深さにおけるミューオン強度を地表におけるミューオンの鉛直方向のエネルギー分布に変換するには、地中でのミューオンの

- a. 天頂角分布
- b. 電離損失と反跳電子による損失
- c. 電子対創生と制動輻射損失
- d. 核相互作用損失

の平均量ばかりでなく、これらの損失の変動によるミューオンの地中における飛程のばらつきを考慮しなければならない。これらを考慮した飛程—エネルギーの関係は多くの計算やモンテカルロ・シミュレーションによりなされている³⁶³。この関係を使って約 50 TeV までエネルギースペクトルが決められた(図 10-3)³⁶⁴。

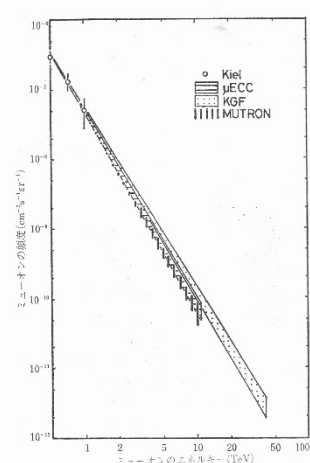


図 10-3 鉛直方向のミューオンのスペクトル³⁶⁵。Kiel と MUTRON は電磁石による水平方向の測定結果を用いて推定したもの。μECC は浅い地下でのエマルジョン・チェンバーの結果。KGF での深い地下の結果はやや大きい。

1967 年にユタ大学の地下実験で、1 TeV を超えるミューオンの大部分は K/π から崩壊するとして期待される天頂角(θ)分布($\sec \theta$ で増大)ではなく、天頂角に依存しない生成プロセス(直接発生か崩壊時間の短い粒子からの崩壊で、X-process と呼ばれた)によるミューオン

³⁶³ 例えば、K. Kobayakawa: “The muon energy spectrum at sea level from the intensities deep underground”, Can. J. Phys., 46 (1968) S395.

³⁶⁴ M.R. Krishnaswamy, M.G.K. Menon, V.S. Narasimham, N. Ito, S. Kawakami and S. Miyake: “Depth vs Intensity Relation and Integral Energy Spectrum of Muons”, Proc. 15th ICRC, Plovdiv, 6 (1977) 85.

³⁶⁵ 水谷興平: 「高エネルギー宇宙線ミューオンとニュートリノの研究」, フィジクス (続・宇宙線, 海洋出版) 7 (1980) 73.

成分が存在することが発表された(図 10-4)³⁶⁶。まだチャーム粒子が発見される前で、新粒子かと注目されたが、KGF³⁶⁷やその他の実験でその結果は否定された。

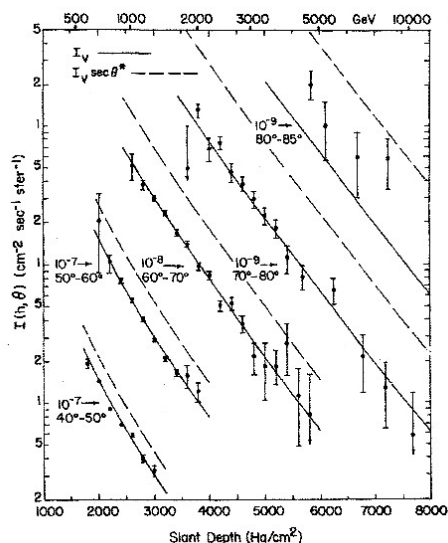


図 10-4 ユタ大学で観測されたミュオンの Depth Intensity の結果³⁶⁶。ダッシュ線はミュオン頻度の天頂角依存性が $\sec \theta$ の時の期待値。実線は世界中のデータを集積して得られた垂直の頻度。ユタ大学のデータは天頂角を変えても垂直頻度の値と一致している。

10.2 HAS の観測

10.2.1 東京大学原子核研究所 (INS)

HAS が電磁カスケードか核カスケードかの判別をするために、INS 空気シャワー観測装置の中央部にミュオン検出器(図 10-5)が設置され、1965 年から観測がおこなわれた。4 年間の観測³⁶⁸で、天頂角 70° 以上、シャワーサイズ $10^3 \sim 10^5$ でのサイズ・スペクトルから、100 TeV までのミュオンのエネルギー・スペクトルを推定し、天頂角分布から、当時話題となっていたユタ大学の X-process³⁶⁶を否定した。なお HAS 中のミュオンの割合は、HAS の全てが高エネルギーミュオンの制動輻射による電磁カスケードとして期待される割合より多く、更なる精度よい観測の必要性が強調された。

³⁶⁶ H.E. Bergeson, J.W. Keuffel, M.O. Larson, E.R. Martin and G.W. Mason: "Evidence for a New Production Process for 10^{12} -eV Muons", Phys. Rev. Lett. 19 (1967) 1487.

³⁶⁷ M.G.K. Menon, S. Naranan, V.S. Narashimham, K. Hinotani, N. Ito, S. Miyake, D.R. Creed, J.L. Osborne, J.B.M. Pattison and A.W. Wolfendale: "Muon intensities and angular distributions deep underground", Proc. Phys. Soc., 90 (1967) 649.

³⁶⁸ M. Nagano, T. Hara, S. Kawaguchi, S. Mikamo, K. Suga, G. Tanahashi and T. Matano: "Horizontal Air Showers of Energies above 10^{13} eV", J. Phys. Soc. Japan, 30 (1971) 33.

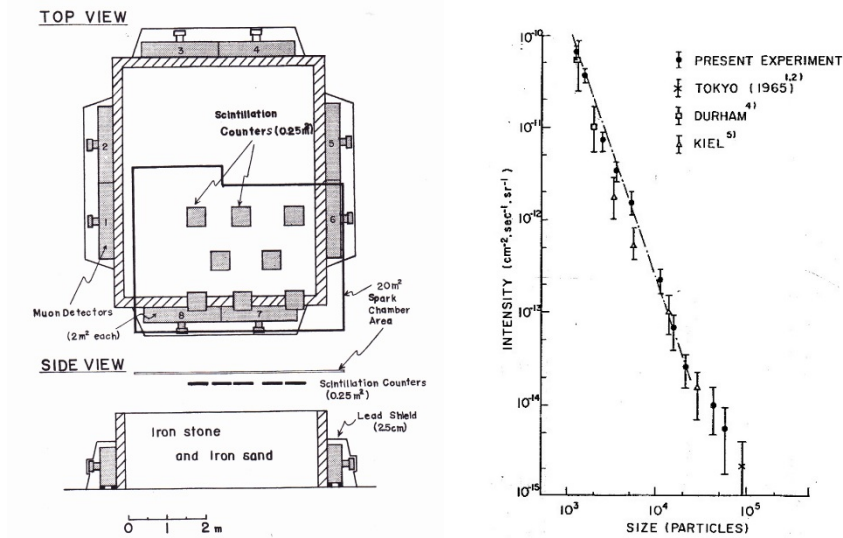


図 10-5 HAS 中のミュオン観測用に INS 空気シャワー観測装置の中央に設置されたミュオン検出器(左)³⁶⁸. 右図は HAS サイズ・スペクトルの INS 実験の最終結果³⁶⁹. 一点鎖線は、 K/π から崩壊したミュオンの制動輻射として期待されるスペクトル.

約 2 倍の観測期間による最終結果³⁶⁹によれば、ミュオンエネルギー 20~40 TeV まで、 K/π からの崩壊ミュオンで説明できるが、それ以上のエネルギーでは、ミュオン頻度は低いエネルギーの外挿の統計誤差内ではあるが、やや大きい傾向がある(図 10-5 右).

10.2.2 ドイツ・キール大学

ドイツ・キール大学では第二次世界大戦中に防空壕としてつくられた壁厚 2 m のブンカーと呼ばれる巨大な施設を利用し、空気シャワー実験や電磁石を使ったミュオン実験がおこなわれていた(2.4.2 節参照). 永野元彦は 1970 年に、ドイツのキール大学核物理学研究所に行き、その壁にほぼ垂直にシンチレーション検出器を並べ、INS より天頂角決定精度を良くし、HAS の観測をおこなった(図 10-6)³⁷⁰. 「ブンカー」の中に HAS 用のミュオン検出器も設置された.

天頂角 70° 以上、シャワーサイズ $2.5 \times 10^3 \sim 5 \times 10^4$ でのサイズ・スペクトルから、100 TeV までのミュオンのエネルギー・スペクトルと天頂角分布を測定し、ミュオンエネルギー 50 TeV まで、 K/π から崩壊ミュオンの制動輻射で説明できることを示した. なお HAS 中に含まれる低エネルギーのミュオンは、INS 結果と同じく制動輻射中に含まれるミュオンより多いことを示し、更なる観測の必要性を論じている.

³⁶⁹ S. Mikamo, H. Yoshii, K. Suga, M. Nagano, T. Hara, S. Kawaguchi and G. Tanahashi: "Observation of Horizontal Air Showers with Energies of 1 to 100 TeV", *Nuovo Cimento, Lett.*, 34 (1982) 237.

³⁷⁰ E. Böhm and M. Nagano: "A study on cosmic ray muons above 10^{13} eV by observation of horizontal air showers", *J. Phys. A: "Math. Nucl. Gen.* 6 (1973) 1262.

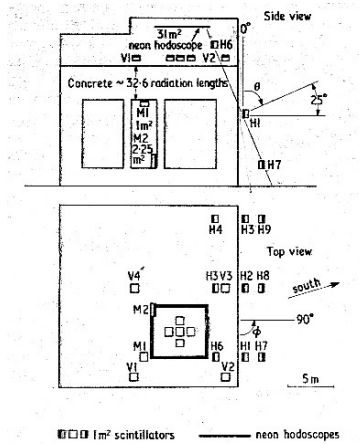


図 10-6 キール大学の空気シャワーアレイのプンカーの壁にシンチレーション検出器(H1～H9)を並べて設置された HAS 観測用シャワーアレイ 370. 上は側面図, 下は上面図. プンカーの中に設置された M1, M2 が HAS 中の低エネルギーミューオンを測定する検出器.

10.2.3 明野観測所

1979 年から観測が始まった明野観測所では, 1 km²明野空気シャワーアレイの中央部に 29 台の 1 m²シンチレーション検出器, 25 台の 0.25 m²シンチレーション検出器をコンパクトに配置し 100 TeV 以上の HAS 観測が実施された(図 10-7)³⁷¹. 中央部には, 10 メートルの塔を二つ建て, 天頂方向からのシャワーを排除し, かつ小シャワーの到来方向の決定精度をあげる. 図の ME2, M5 には 3 層の比例計数管を井桁に組み, 到来方向も測定された.

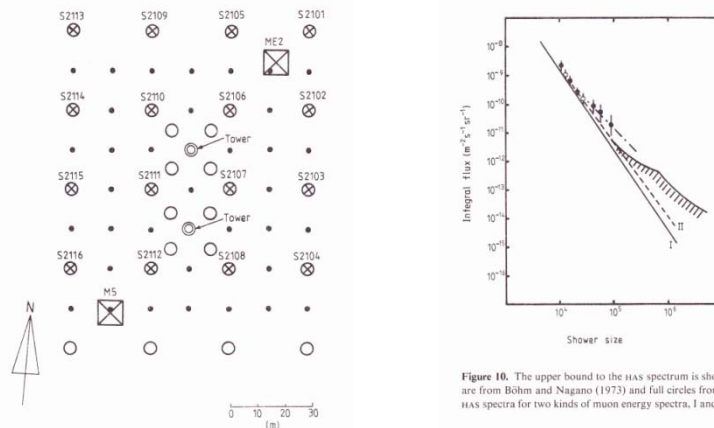


Figure 10. The upper bound to the HAS spectrum is shown by the hatched area. Open circles are from Böhm and Nagano (1973) and full circles from Mikamo *et al* (1982). The expected HAS spectra for two kinds of muon energy spectra, I and II, are also shown.

図 10-7 明野空気シャワー観測装置の中央に配置された, HAS 観測用アレイ. 右図の斜線部が明野の HAS の上限³⁷¹

³⁷¹ M. Nagano, H. Yoshii, T. Hara, N. Hayashida, M. Honda, K. Kamata, S. Kawaguchi, T. Kifune, Y. Matsubara, G. Tanahashi and M. Teshima: “An upper limit on the muon flux at energies above 100 TeV determined from horizontal air showers observed at Akeno”, J. Phys. G; Nucl. Phys. 12 (1986) 69.

約6年の観測で、天頂角 70° 以上、シャワーサイズ 10^5 以上の HAS は観測されなかった。その上限値を図 10-7 の右図にハッチ線で示す。キール大学の結果は○で、INS の結果は●で示してある。実線と鎖線は一次宇宙線の化学成分が 1 TeV 領域と変わらないと仮定し、1 TeV 領域まで直接測定で測定されたエネルギー・スペクトルを外挿して求めたものである。大気ミューオンのエネルギー・スペクトルは、地下深く検出器を設置した KGF の depth-intensity から求められたものが最大エネルギーだったが、それ以上のエネルギーまでエネルギー分布が決定され、天頂角が 70 度以上での天頂角分布が求まるので、パイからの崩壊ミューオンでなく、チャームからの崩壊ミューオンの上限値を求めることができる。チャーム粒子の崩壊ミューオンの影響は 1 PeV 領域までない、すなわちチャーム粒子の生成断面積が 100 TeV で $0.36 \times \ln(s/80 \text{ GeV}^2)$ mb より小さい結果が得られた。

核研、キール大で、ミューオンの制動輻射によってつくられる電磁カスケード中に含まれるミューオン数以上にミューオンが観測され、核カスケードの存在の可能性が指摘されたが、明野の結果では確認されなかった。

10.3 宇宙ニュートリノとの関係

宇宙線が大気中でつくる π , K 中間子の崩壊してできる μ ニュートリノ (ν_μ) の観測は、大阪市大、インド・タタ研究所、英国ダーラム大学の共同研究としてコラ金鉱の 7000 mwe の地点で 1964 年から実施された。大気中でできたミューオンは鉛直方向に鋭い方向分布を持っているので、ほぼ水平方向からくる ν_μ の核反応でできるミューオンとは容易に区別できる。水平方向からの立体角が大きくなるように、 6 m^2 の 2 層のシンチレーション検出器を垂直に立て、その間に 2.5 cm 厚の鉛をはさんだ 3 層のネオンホドスコープでミューオンの飛跡が測定された。この装置 2 基で観測が開始され、1965 年に初めて大気ニュートリノが観測された³⁷²。ほぼ同時に、南アフリカ・ヨハネスブルク近郊の金鉱でなされていた米国ケース研究所グループによっても大気ニュートリノが観測された³⁷³。その後大気ニュートリノについては KAMIOKANDE, SuperKAMIOKANDE で、ニュートリノ振動の発見という大きな成果をあげたが、観測された μ -like 事象数がシミュレーションと合わず、ニュートリノ振動の可能性が初めて示されたは 1988 年である³⁷⁴。なおこのような大気ニュートリノはエネルギーが低く HAS では検出できない。

³⁷² C.V. Achar, M.G.K. Menon, V.S. Narasimham, P.V. Ramana Murthy, B.V. Sreekantan, K. Hinotani, S. Miyake, D.R. Creed, J.L. Osborne, J.B.M. Pattison and A.W. Wolfendale: "Detection of Muons Produced by Cosmic Ray Neutrinos", Phys. Lett., 18 (1965) 196.

³⁷³ R. Reines, M.F. Crouch, T.L. Jenkins, W.R. Kropp, H.S. Gurr, G.R. Smith, G.P.F. Sellschop and B. Mayer: "Evidence for High-Energy Cosmic Neutrino Interactions", Phys. Rev. Lett., 15 (1965) 429.

³⁷⁴ K.S. Hirata et al.: "Experimental Study of the Atmospheric Neutrino Flux", Phys. Lett. B, 205 (1988) 416.

10.3.1 sub-PeV 宇宙ニュートリノ

1990年代になって、電波的には静かな活動銀河核(radio-quiet AGN)の周りの降着円盤に降り注ぐプラズマの衝撃波面で加速された陽子が、周りの紫外線、X線と光核反応起こし、生成された π 、 μ からの崩壊 ν_μ 、 ν_e が極めて多いことが予測された。Radio-quiet AGNの数が多いので、全天を積分すれば、 10^{14} eV 領域のニュートリノは大気ニュートリノより圧倒的に大きくなる³⁷⁵ことがステッカー(F.W. Stecker)等により提唱された。AGNニュートリノは大気中の核と荷電、中性カレント相互作用をおこす。またニュートリノと原子の周りの電子との相互作用の断面積は一般には小さいが、 $\bar{\nu} + e^- \rightarrow W^-$ などの共鳴反応では大きくなる。ハルツェン(F. Halzen)とザス(E. Zas)は、大気中のこれらのニュートリノ反応を計算し、二次粒子からのHASのサイズ・スペクトルを推定し、明野で観測されたHASのエネルギースペクトルと比較した³⁷⁶。推定されるAGNからのニュートリノによるHASは、測定されたHASスペクトルの上限値(図10-7)を超えてしまう。AGNからのニュートリノ強度が再検討され、ステッカー等の理論的予測値は大幅に下方修正された。

太陽以外の天体からの高エネルギーニュートリノを捕らえるには巨大なターゲットが必要であり、海洋に検出器を数珠つなぎにして沈めるDeep Underwater Muon And Neutrino Detection (DUMAND)計画が、1973年デンバーで開催された宇宙線国際会議で、ライネス(F. Reines)等により提案された。DUMANDはハワイ・マウイ島沖約5000mの深海に、ほぼ1km立方の海水中に約40m間隔で光センサーを1261個配置し、ニュートリノ反応で発生したシャワーから発するチェレンコフ光を観測する。1976年から予備実験が開始されたが、実質的な予算が日、米で認められたのは1983年で、1987年に船上から7個のセンサーがついたstringが下され、数日間観測し、深海4500mまでのミューオンのdepth-intensityが測定された³⁷⁷。1989年に米国DOE(U.S. Department of Energy)から9本のstringのDUMAND IIが認められ³⁷⁸、1993年に1本に25個のセンサーをとりつけたstringが下され、沿岸までのケーブルも敷設された³⁷⁹が、沿岸までのケーブルとのJunction Boxで水漏れをおこし、データをとることができなかった。この失敗が原因となり、1995年にDOE予算はキャンセルされ、中止された。

しかしこの実験のR&Dは、その後地中海での海洋実験NESTOR, ANTARES, NEMOに引き継がれ、湖上での実験Lake Baikal Projectや南極の氷中での実験AMANDA/

³⁷⁵ F.W. Stecker, C. Done, M.N. Salamon and P. Sommers: "High Energy Neutrinos from Active Galactic Neuclei", Phys. Rev. Lett., 66 (1991) 2697.

³⁷⁶ F. Halzen and E. Zas: "Giant Horizontal Air Showers, Implication for AGN Neutrino Fluxes", Phys. Lett., B 289 (1992) 184.

³⁷⁷ J. Babson et al.(DUMAND Collaboration): "Cosmic-ray muons in the deep ocean", Phys. Rev., D 42 (1990) 3613.

³⁷⁸ DUMAND 1988 Proposal

³⁷⁹ P.K.F. Grieder for the DUMAND Collaboration: "DUMAND II: String 1 deployment, initial operation, results and system retrieval", Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 43 (1995) 145.

IceCube などに生かされている。そして PeV 領域で IceCube が 2013 年にニュートリノ検出に成功したことを発表した³⁸⁰。チャーム・メソンからの崩壊ニュートリノの可能性はあるが、最初の宇宙ニュートリノの検出である可能性が高い。

10.3.2 EeV 宇宙ニュートリノ

宇宙線エネルギー・スペクトルに GZK 上限が存在するならば、陽子—背景放射光子衝突で作られるニュートリノが約 0.6 EeV 以上で観測が期待される³⁸¹。その強度は宇宙進化のモデルや源の分布に依存し、2 桁以上に異なった多くの推定がなされている。ニュートリノは発生段階では $\nu_\mu:\nu_e$ が 2:1 でも、天文学的距離を伝播中に、ニュートリノ振動により ν_μ, ν_e, ν_τ の強度はほぼ同じになると予測される³⁸²。 ν_τ は荷電カレント相互作用で τ を発生し、EeV 領域の τ は数 10 km 走り、約 70 % はハドロンに崩壊する。大気中では相互作用をする確率が小さいニュートリノも、地球をかすめて岩中で相互作用し、 τ が空中に飛び出しハドロンシャワーとして観測される可能性が指摘された³⁸³。このようなシャワーは **up-going shower** と呼ばれ、通常の **down-going shower (HAS と同じ)** と区別される。

遠方をほぼ水平に横切る **up-going shower** の観測には蛍光検出が適しており、HiRes 1 では 1997 年から 2005 年の、HiRes 2 では 1999 年から 2005 年のデータで、天頂角 88.8 度から 95.1 度で、シャワー軸までの距離 20 km 以内のシャワーが探索されたが 1 例も見つからなかった。これにより ν_τ の上限(1~10 EeV)を決定している³⁸⁴。 ν_e が岩石中の相互作用により、電子を発生して起こす電磁シャワーは、そのエネルギーが高いと制動輻射や電子対創成の断面積が抑えられる Landau-Pomeranchuk-Migdal(LMP)効果で、発達が遅くなり、土中から空中にかけて発達するシャワーとして観測が予測される。HiRes ではこのようなシャワーに対する露出を推定し、 ν_e の上限値(1~1000 EeV)も発表している³⁸⁵。

ピーエル・オージェ観測所では、HAS の観測に有利なように、水タンク検出器を採用し、当初から超高エネルギー・ニュートリノ観測も主目的の一つとしている。建設途上であった 2004 年から 2007 年までのデータ(完成アレイの 1 年分相当)で、アレイを通過する HAS を探索したが 1 例も候補は見つからなかった。これにより ν_τ の上限(0.2~20 EeV)を発表

³⁸⁰ M.G. Aartsen et al. (IceCube Collaboration): “First observation of PeV-energy neutrinos with IceCube”, arXiv:1304.5356v1 (2013).

³⁸¹ V.S. Berezinsky and G.T. Zatsepin: “Cosmic rays at ultra high energies (neutrino?)”, Phys. Lett. B, 28 (1969) 423.

³⁸² H. Athar, M. Jezabek and O. Yasuda: “Effects of neutrino mixing on high-energy cosmic neutrino flux”, Phys. Rev. D, 62 (2000) 103007.

³⁸³ 例えば、E. Zas: “Neutrino detection with inclined air showers”, New J. Phys., 7 (2005) 130. に、より詳しい reference.

³⁸⁴ K. Martens for the High Resolution Fly’s Eye Collaboration: “HiRes Limits on the Tau Neutrino Flux at the Highest Energies”, Proc. 30th ICRC, Mérida, (2007); arXiv:0707.4417v1.

³⁸⁵ R.U. Abbasi et al. (High Resolution Fly’s Eye Collaboration): “An Upper Limit on the Electron-Neutrino Flux from the HiRes Detector”, Astrophys. J., 684 (2008) 790.

している³⁸⁶.

氷に覆われた南極大陸の表面をかすめたニュートリノが、氷中で引き起こすシャワーを、気球に搭載した電波干渉計で観測する ANITA 計画³⁸⁷を 11.5.2 節で述べるが、その結果を図 10-8 に示す。この図に HiRes, Auger の結果も記されている。

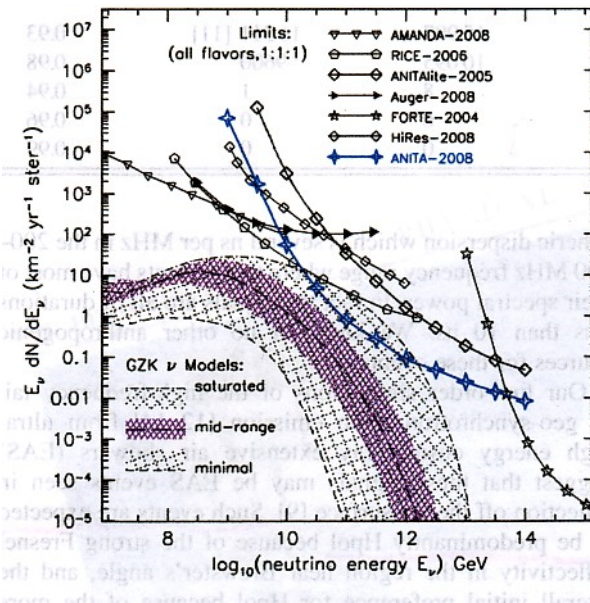


図 10-8 予測される GZK ニュートリノの頻度と各実験の上限値³⁸⁷。HiRes, Auger の他に ANITA の結果(11.5.2 参照)などが示されている。予測値は Gorham 等の論文³⁸⁷にある参考文献を参照のこと。

³⁸⁶ J. Abraham et al. (Pierre Auger Collaboration): “Upper Limit on the Diffuse Flux of Ultrahigh Energy Tau Neutrinos from the Pierre Auger Observatory”, Phys. Rev. Lett., 100 (2008) 21101.

³⁸⁷ P.W. Gorham et al. (ANITA collaboration): “New Limits on the Ultrahigh Energy Cosmic Neutrino Flux from the ANITA Experiment”, Phys. Rev. Lett., 103 (2009) 051103.

第11章 電波による空気シャワー観測

11.1 空気シャワーからの電波の放出

空気やその他の物質中での電磁カスケードでは、①コンプトン効果で電子が放出されること、②電子対創成で出来る陽電子は走っている間にすぐ消滅してしまうこと、③ノックオン電子の存在、等のため、陰電子が多くなる。シャワーを巨大な粒子と見れば、負の電荷の粒子が光速で走っているのでチェレンコフ光をだす。波長(λ)がシャワーの厚さより長い領域($\lambda > \text{数 m}$)では波はコヒーレントとなり放出される。すなわち電波をだすことを USSR のアスカリアン(G.A. Askaryan)が 1961 年に発表した(Negative charge excess 説)³⁸⁸。陰電子の excess の割合を ϵ 、EAS のサイズを N とすると、周波数 ν でバンド幅 $\delta \nu$ では、コヒーレントなチェレンコフ放射のレートは、

$$\frac{dE}{dt} = \frac{4\pi^2 e^2}{c} (\epsilon N)^2 \times 2(n-1) \nu d\nu,$$

で表される³⁸⁹。 n は空気の屈折率。これによると電波の強度は $(\epsilon N)^2$ に比例する。Incoherent な光の波長領域では 1 個毎に光を放出するので、光の強度は N に比例するの比べて、コヒーレントとなる電波領域では $\epsilon^2 N$ 倍となる。 $N \sim 10^6$ 、 $\epsilon = 0.1$ の場合、 $\epsilon^2 N \sim 10^4$ となり、EAS から電波が観測されるであろう。

カーン(F.S. Kahn)とレルヒェ(I. Lerche)³⁹⁰は、地球の磁場内で対創成された陰陽電子は、磁場で反対方向に曲げられ、全体として分極したダイポールが光の速度で降ってくるので、ダイポール放射をひきおこす(Dipole Moment 説)と提唱した。また分極するということは電流が流れることであり、シャワーの静止系では横向き電流は、ダイポール・アンテナのように各所で電流のだす放射のフェーズが合えば電波を放出し、その電波は実験室系では前方に集中する電磁パルスとなる(Transverse Current 説)。カーンとレルヒェは Maxwell 方程式を正確に解き、EAS の軸から 100 m 以遠では、Transverse Current による寄与が Dipole Moment や Negative charge excess に比べ圧倒的に大きいことを示した。ただしシャワー電子のふるまいについては半定量的な取扱いであった。

³⁸⁸ G.A. Askaryan: "Excess Negative Charge of an Electron-Photon Shower and its Coherent Radio Emission", Zh. Exsp. Teor. Fis., 41 (1961) 616 [Soviet Phys. (JETP) 14 (1962) 441]. ; "Excess Negative Charge of the Electron-Photon Shower and Coherent Radiation Originating from It. Radio Recording of Showers under the Ground and on the Moon", J. Phys. Soc. Japan, 17, Suppl. A-III (1962) 257.; Zh. Exsp. Teor. Fis., 48 (1965) 988 ["Coherent Radio Emission from Cosmic Showers in Air and in Dense Media", Soviet Phys. (JETP) 21 (1965) 658.]

³⁸⁹ J.V. Jelley, W.N. Charman, J.H. Fruin, F.G. Smith, R.A. Porter, N.A. Porter, T.C. Weekes and B. McBreen: "Radio Pulses from Extensive Air Showers", Nuovo Cimento, 46 (1966) 649.

³⁹⁰ F.D. Kahn and I. Lerche: "Radiation from Cosmic Ray Air Showers", Proc. Roy. Soc. A, 289 (1966) 206.

西村純と藤井正美は、シャワー理論としては近似 B で、より詳細な考察をおこなった³⁹¹。一次元の計算のみならず、観測される実験結果と比較するために、三次元的分布を調べた。発生する電波の各プロセスによるシャワー軸からの距離 100 m 以遠での電界強度比を、Kahn-Lerche の計算結果と比較したものを表 11-1 に示す³⁹¹。

	Transverse Current	Dipole Moment	Negative Charge Excess
Kahn-Lerche	16	3	1
西村-藤井	3.4	0.21	1.3

表 11-1 発生する電波の各プロセスの電界強度比

西村-藤井の Negative Charge Excess の割合が大きいのは、Kahn-Lerche では、コンプトン効果の寄与が無視されているからである。地磁気にもとづく、Transverse Current と Dipole Moment は東西に偏極しているが、Negative Charge Excess はラジアルに偏極しているため、観測で予測される東西の偏極度は西村-藤井理論の方が小さい³⁹¹。

実際に観測と比較するには、各プロセスの電荷の空間分布、発生電波の干渉効果の波長依存性、シャワーフロントの厚さの影響など三次元的解析が必要である。西村-藤井によれば³⁹¹、

- ① 東西偏極電波の電界強度は、ラジアルなものに比較して約 2 倍であるが、干渉効果のために、30 MHz 付近をこえると急速にその寄与は小さくなる。
- ② 数 10 MHz をこえると東西偏極電波の寄与はなく、ラジアルな偏極電波のみである。

11.2 1960 年代の空気シャワーからの電波観測その限界

最初に EAS からの電波観測を試みたのは、英国のジョドレル・バンクの施設を利用して 1964 年 11 月から 1965 年 3 月にかけてなされた、ジェリー(J.V. Jelley)等の実験³⁹²である。図 11-1 に示すように、3 台の GM 検出器の横に 72 台の 1 波長ダイポール・アンテナがその軸を東西に向けて配置された。1800 m²の面積をカバーしている。EAS のシャワー面の厚さより波長が長く、ラジオやテレビジョンからの電波の影響がないように、44 Mc/s(波長 $\lambda=6.8$ m)で、バンド幅 4 Mc/s が選択された。アンテナは地面から 0.1λ の高さである。電波ノイズを小さくするために GM 検出器への高圧を含め、全ての回路の電源は蓄電池から供給された。GM 検出器でトリガーされた EAS が入射すると、アンテナからの信号は前置増幅器で増幅され、トリガーから 5 μ s 遅れて、オシロスコープに記録された。GM アレイによる EAS 観測と同期して、図 11-1 の右図に示すように、明らかな電波信号が

³⁹¹ 西村純, 藤井正美:「空気シャワーの電波発生機構について」, 東京大学宇宙航空研究所報告, 第 5 巻, 第 3 号 (1969) 476.; M. Fujii and J. Nishimura: “Radio Wave Emission from Extensive Air Showers”, Acta Physica Academiae Scientiarum Hungaricae, 29, Suppl. 3 (1970) 709.

³⁹² J.V. Jelley, J.H. Fruin, N.A. Porter, T.C. Weekes, F.G. Smith and R.A. Porter: “Radio Pulses from Extensive Cosmic-ray Air Showers”, Nature, 205 (1965) 327.

観測された。詳しい解析は J.V. Jelley 等によりなされている³⁹³。

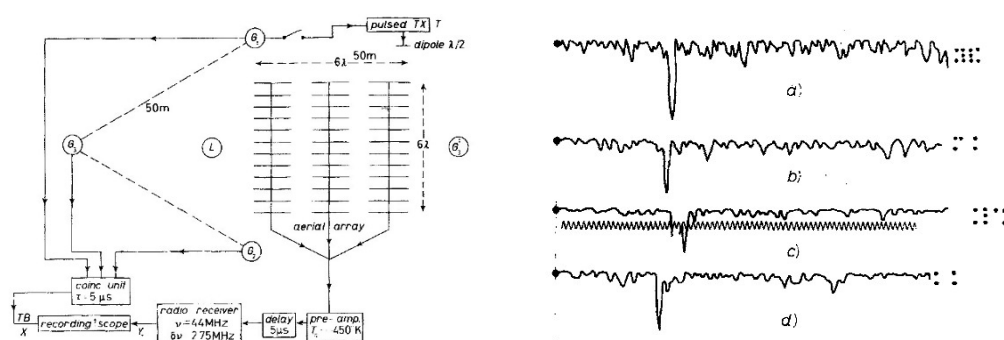


図 11-1 ジェリー等の実験装置(左)³⁹²。3 台の GM 検出器のトリガーで EAS が選別され、72 台の 1 波長ダイポール・アンテナの信号(44 Mc/s)が前置増幅器を通してオシロスコープに記録される。右図は大きな信号を観測した例³⁹³。(c)は信号がオーバーフローし、そのテールのみ記録されている。ギザギザの信号は 4 MHz の較正用信号。信号の右のドットはヒットした GM 検出器の情報。

この実験に続いて、1960年代の後半に、英国のハベラーパークでアラン(H.R. Allan)等³⁹⁴、ボリビアのチャカルタヤ山でヘーゼン(W.E. Hazen)等³⁹⁵、モスクウ大学でヴェルノフ(S.N. Vernov)等³⁹⁶、カナダのカルガリー近郊でプレスコット(J.R. Prescott)等³⁹⁷により実験がなされている。この時代になされた実験の結果と電波観測の限界について、アランにより詳細にまとめられている³⁹⁸。

観測は 2 MHz-520 MHz で、電界強度の一次宇宙線エネルギー依存性、周波数依存性、シャワー軸からの広がり、東西偏極の割合など基本的な性質が調べられた。偏極度は数 10 MHz 以下では地磁気によるダイポール型が主たる発生機構とする理論的予測を支持する結

³⁹³ J.V. Jelley, W.N. Charman, J.H. Fruin, F.G. Smith, R.A. Porter, N.A. Porter, T.C. Weeles and B. McBreen: "Radio Pulses from Extensive Air Shower", Nuovo Cimento, 46 (1966) 649.

³⁹⁴ H.R. Allan, K.P. Neat and J.K. Jones: "Mechanism of Radio Emission from Extensive Air Showers", Nature, 215 (1967) 267; H.R. Allan, R.W. Cray and J.K. Jones: "Radio Pulses from Extensive Air Showers", Nature, 227 (1970) 1116.

³⁹⁵ W.E. Hazen, A.Z. Hendel, H. Smith and N.J. Shah: "Radio Pulses and the Detection of Large Air Showers", Phys. Rev. Lett., 24 (1970) 476.

³⁹⁶ S.N. Vernov, G.B. Khristiansen, A.T. Abrosimov, V.B. Atrashkevitch, O.V. Vedeneev and K.P. Neat: "Study of radio emission from extensive air showers by means of a system of half-wave dipoles in the complex array of the Moskow State University", Proc. 11th ICRC, Budapest, 3 (1969) 731.

³⁹⁷ J.H. Hough and J.R. Prescott: "Energy and Radial Dependence of Air Shower Radio Pulses", Nature, 227 (1970) 590.

³⁹⁸ H.R. Allan: "Radio Emission from Extensive Air Showers", Prog. in Elem. Part. And Cosmic Ray Phys., (ed. by J.G. Wilson and S.A. Wouthuysen, N. Holland Pub. Co.), Vol.X (1971) 171.

果が得られている。

電波による EAS 観測の主目的は、安価なダイポール・アンテナ・アレイで有効面積を拡大して、超高エネルギー宇宙線を観測することであったが、電波では信頼できる結果を得ることは困難であるとの結論に達し、1970 年代後半には研究対象ではなくなった。主たる理由をまとめてみると、

- ① 大気電波ノイズが小さくなる 10 MHz 以上、一般的な受信機ノイズが大きくなる 100 MHz 以下、すなわち銀河電波のみと考えられる 10~100 MHz 領域でも、遠雷、レーダー、自動車の点火プラグ、等々余分なノイズに満ちており、アレイ自身のトリガーが困難である。
- ② 各高度での発生電波の位相が少しずつずれるため、空間干渉効果により、強い電波はシャワー軸から 100-200 m 以内に集中し、それより離れると急速に弱くなり(図 11-2)、コンパクトなアレイが必要となる。遠方ではパルス幅は広がり、電波は low-frequency 成分のみになるため、 10^{19} eV のシャワーでも、軸から 1km 離れると、信号はノイズ以下、時間精度は μ sec 以上となる。

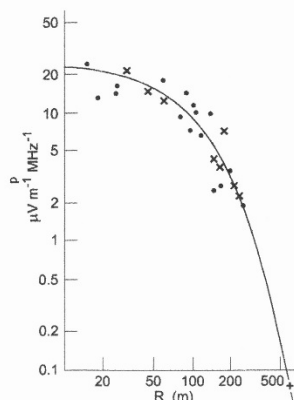


図 11-2 55 MHz での電波パルスの受信電圧の横広がり分布³⁹⁴。それぞれのデータは、エネルギー 10^{17} eV に規格化してある。・と×は 10^{17} eV と 10^{18} eV の間を 2 つのエネルギー領域にわけたもの。500 m 近傍の+は 10^{19} eV の事象。

11.3 低周波電波による大シャワーの観測

1980 年代に入って、菅浩一は、EAS 中の過剰な陰電子のために、シャワーの発達にともない電流が増加し、最大発達以降は減少し、大地を打ったときに消滅することにより誘起される遠方での電場に着目した。EAS の発達減衰は大気中数 km の間でおこるので、波長数 km、周波数で数 10 kHz の電磁波が放出されること、その電場の大きさは 10^{20} eV ではシャワー軸から 10 km のところで約 1μ V/m であると推定した³⁹⁹。すなわちある距離 R の

³⁹⁹ T. Kaneko, N. Inoue, F. Kakimoto, K. Suga, N. Martinic, J.A. Zelaya, P. Miranda, L. Siles, D. Veramendi, H. Yoshii and K. Hagiwara: "Acoustic and VLF-ELF Radio

地点での電場の時間変化は図 11-3 のように bipolar pulse($\sigma \sim 5 \mu s$)となり、大地を打ったときにでる幅の狭いスパイクが付け加わる。垂直シャワーの場合、このパルスの振幅のピークは約 30 kHz で、振幅の 1/10 になるのは、約 80 kHz と 2 kHz であり、スパイクの周波数成分は数 MHz である。この周波数成分はシャワー軸と観測点の相対位置によって変化する。一般的には、100 Hz から数 100 kHz の周波数成分をもつ bipolar pulse と数 MHz の周波数成分をもつスパイクが観測されることになる⁴⁰⁰。

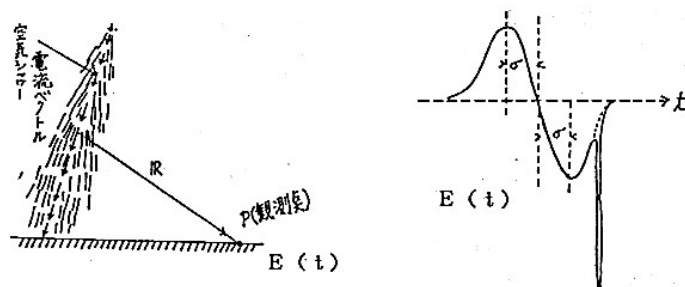


図 11-3 電流ベクトルと観測点の関係⁴⁰⁰。右は期待される電場の時間変化。

実験を始める前に、菅は坂田通徳と、京大地球物理学教室でそれまでに観測されていた空電波形を調べ、観測の障害となる空電や、放送その他の人工電磁波対策を学ぶと共に、明らかに空電ではなく、EAS から予想される波形の電磁パルスを 4 ヶ月間で 3 例見つけた⁴⁰⁰。これに力を得て、1984 年から明野 20 km²アレイのトリガーのもと、超長波電波の観測を開始した。いろいろの波長帯、広域、狭域バンド幅で観測が行われたが、放送帯の穴場である(170±5) kHz の狭帯域で観測すると、軸からある距離内では殆どのシャワーが電磁パルスをとまなっていることが判明した(図 11-4 左)。しかし観測されたパルスは unipolar で負極性、パルス幅は約 2 μs で、電波強度も当初の予想より強かった。

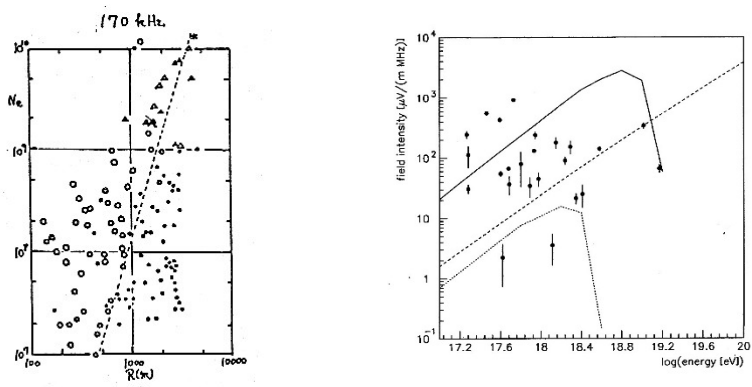


図 11-4 (左) (170±5) kHz の狭帯域でみた EAS からの電磁パルスと EAS アレイとの連

Detections of Super Giant Air Shower”, Proc. 18th ICRC, Bangalore, 11 (1983) 428.

⁴⁰⁰ 菅浩一：「超大空気シャワー-VLF 電磁パルス検出」, ICR-報告-44-84-2, (1984) 98.

動実験結果⁴⁰¹。△、○は EAS と対応して電磁パルスが観測されたシャワー。▲、●は対応しなかったシャワー。鎖線より左側では殆どのシャワーが電磁パルスをともなっている。(右) 1 kHz~500 kHz を広帯域で観測した結果⁴⁰²。

この結果を説明する電波発生メカニズムとして、菅は負荷電過剰の EAS 電子が大地を打って消滅するための放射、または EAS 粒子が大地を打ったときの遷移放射の可能性を提案し⁴⁰³、検証実験を開始した直後の 1988 年に急逝した。

その後この研究は東京工大垣本史雄に引き継がれ、同研究室の門多顕司が主になり、AGASA との連動実験を 1989 年から 1997 年にかけて実施した⁴⁰²。10 m の垂直モノポールアンテナで受信、1 kHz~500 kHz の広帯域で電磁パルスを観測し、200 μ s 間を 50 ns でサンプリング、波形記録装置に記録する。これを高速フーリエ変換し、放送等の人工ノイズを除去、逆変換で電磁パルスを再現する。軸から 500 m~1 km の地点で観測された電磁パルスのエネルギー依存性を図 11-4 右に示す。検出されたパルスの 75 % は負極性で、25 % が正極性である。しかし、全シャワーのうち 0.1 % 程度のシャワーしか電磁パルスが検出されなかった。特に $10^{19.2}$ eV 以上では電磁パルスを伴うシャワーは観測されなかった。また電波強度は事象毎で大きく変動する。

この解釈として門多は、EAS 中の粒子によって電離された電子が大気電場で加速されるときに放出されるときに放射する電波説を提案している。図 11-4 右の実線と点線は、大気電場が 300 V/m, 10 V/m としたときの予測される電波強度である。EAS のエネルギーが大きくなると、電離された電子数が多いと、電子が大気電場からなされる仕事が大気電場のエネルギーより大きくなり、電場が放電されて電波が放射されなくなり、電場強度は急激に下がる。

門多等の実験では、菅等の観測した 170 kHz 帯はノイズとして除去されており、この波長帯を再測定する価値があるであろう。

11.4 2000 年代の電波観測の復活

1990 年代末頃から、多数のアンテナ・アレイの各素子アンテナの位相を変えて解析することにより、ソフトによって指向性を格段に向上できるフェイズド・アレイ、いわゆる電子走査アンテナで EAS を観測する計画が始まった⁴⁰⁴。ハイテクを駆使し、電波による EAS 観測の再興である。各素子アンテナでは EAS からの 10 - 200MHz の波長をワイドバンド

⁴⁰¹ 菅浩一、西克夫、垣本史雄：「超大空気シャワー-LF・VLF・ELF 電磁パルス検出」、ICR-報告-56-86-2, (1986) 55.

⁴⁰² 門多顕司：「超大空気シャワーに伴う低周波電波」、博士論文、(東京工業大学, 1998)

⁴⁰³ 菅浩一、西克夫、田島典夫、垣本史雄：「超大空気シャワー LF・VLF 電磁パルス」、ICR-報告-62-87-1, (1987) 37.

⁴⁰⁴ H. Falcke and P. Gorham: "Detecting Radio Emission from Cosmic Ray Air Showers and Neutrinos with a Digital Radio Telescope", *Astropart. Phys.*, 19 (2003) 477.

で受信し、デジタルで記録された信号は光ファイバーで高速計算機クラスターに送られる。計算機では、多数の素子アンテナからのデータを相関させ、EAS 電波ビームの到来方向を確定する。

EAS からの電波発生機構は、地球磁場でのコヒーレントなシンクロトロン放射(coherent geosynchrotron emission)という形でよりわかりやすく発展されている⁴⁰⁵。これは本質的には transverse current 説と同じであり、発生電波の電界強度比は表 11-1 の transverse current に相当する。

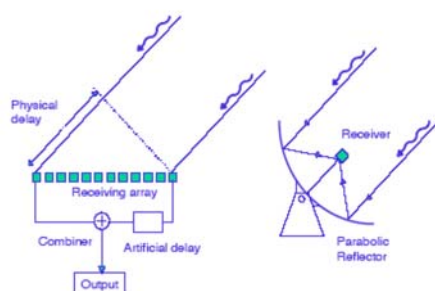


図 11-5 フェイズド・アレイでは、得られた各素子アンテナからの信号の位相を変えて、方向を走査する。高い指向性が得られる⁴⁰⁶。

LOPES⁴⁰⁷(LOFAR-Low Frequency ARrayの Prototype Station)や CODALEMA⁴⁰⁸ (COsmic ray Detection Array with Logarithmic Electro Magnet Antennas) と呼ばれる計画が進行している。

LOPES はドイツの KASCADE-Grande サイトに設置された 30 台のダイポール・アンテナ・アレイ(当初は 10 台で開始)で、シンチレーション検出器アレイでトリガーされる。それで決めた到来方向を初期値として入力し、その周りを走査、相関をとることにより、電波ビームの到来方向を決定し、シンチレーション検出器アレイ並みの到来方向やエネルギーの決定精度⁴⁰⁹が得られるまでに進歩している⁴¹⁰。CODALEMA はフランスの Nancay にある宇宙電波観測所に設置された、17 台のシンチレーション検出器アレイと 24 台の素子アンテナ・アレイから成り立つ。やはりシンチレーション検出器でトリガーする。

⁴⁰⁵ D.A. Suprun, P.W. Gorham and J.L. Rosner: “Synchrotron radiation at radio frequencies from cosmic ray air showers”, *Astropart. Phys.*, 20 (2003) 157.

⁴⁰⁶ <http://www.astro.ru.nl/lopes/>

⁴⁰⁷ H. Falcke et al. (LOPES Collaboration): “Detection and imaging of atmospheric radio flashes from cosmic ray air showers”, *Nature*, 435 (2005) 313.

⁴⁰⁸ D. Ardonin et al. (CODALEMA Collaboration): “Radio-detection signature of high-energy cosmic rays by the CODALEMA”, *Nucl Instrum. Methods, A* 555 (2005) 148.

⁴⁰⁹ シンチレーション検出器アレイではサイズの決定精度は良いが、KASCADE はほぼ海面レベルなので、個々のシャワーに対するエネルギー決定精度の系統誤差が大きい。

⁴¹⁰ F.G. Schröder et al. (LOPES Collaboration): “Cosmic Ray Measurement with LOPES: Status and Recent Results”, arXiv:1301.2557v1 [astro-ph.HE] (2013).

課題は他の検出器によるトリガーに頼らずに、電波アレイだけでトリガーすることが今のところ困難なこと、自然雑音(雷雲等)の影響、人工雑音の信号との区別等がある。アンテナ素子の費用は安い、この周波数帯の電波は図 11-2 に示したように軸方向に集中しているため、天頂方向の EAS に対しては莫大な数のアンテナが必要となる。大天頂角の EAS のみ選ぶことによりアンテナ間隔を広げることが可能だが、超高エネルギー宇宙線の観測に適するか検討がなされている。

Pierre Auger Observatory では地表アレイとの連動で、幾つかの電波観測が実施されている。小規模なダイポール・アレイでセルフ・トリガーにより 2006 年から 2010 年まで実施された実験では、実質的には 50~70 MHz のバンドで電磁パルス記録の限界 0.4/s 以内におさまるよう設定した閾値で記録する。アンテナ・アレイでトリガーはされたが、実際の EAS は地表アレイとコインシデンスをとった事象(4年間で 0.1~10 EeV の 65 EAS)しか選びだせなかった⁴¹¹。

AERA (Auger Engineering Radio Array)では、FPGA(Field Programmable Gate Array)上にプログラムされたアンテナ・アレイ自身によるトリガーの開発が試みられており解決される期待はある⁴¹²。しかし EAS からの電波信号と区別の難しい人工雑音信号は残り、電波雑音の低い観測地の選択などが必要となるかもしれない。

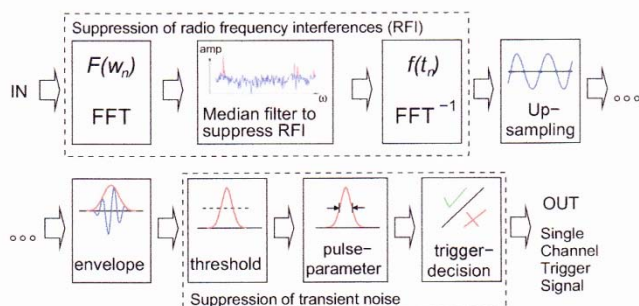


図 11-6 FPGA 上にプログラムされるセルフ・トリガー回路の図式⁴¹²

11.5 新しい観測方法

11.5.1 GHz 帯 (Molecular Bremsstrahlung Radiation)

ゴルハム(P.W. Gorham)等は、EAS のトラックに残される希薄なプラズマと自由電子(<10 MeV)との衝突によって放出されるマイクロウェーブ (molecular bremsstrahlung radiation)の可能性を提案し、12 MeV の電子ビームと 28 GeV の電子ビームを使い、空気

⁴¹¹ S. Acounis et al. (The Pierre Auger Collaboration): “Results of a self-triggered prototype system for radio-detection of extensive air showers at the Pierre Auger Observatory”, J. Instrum., 7 (2012) P11023.

⁴¹² T. Huege, for the Pierre Auger Collaboration: “Radio detection of cosmic rays in the Pierre Auger Observatory”, Nucl. Instrum. Methods , A 617 (2010) 484.

中での擬似シャワーからマイクロウェーブが放出していることを示した⁴¹³。この放射は高エネルギー電子による前方に集中する制動放射とは違い、等方的に放射する。もし蛍光に匹敵する強度があれば、日中でも観測でき、かつ、この波長領域はエアロゾルなどによる減衰も小さく、超大空気シャワー観測の有効な手段となる。この加速器実験では、transition radiation やチェレンコフ放射が強く、C(3.4–4.2 GHz)帯や Ku(10.7–11.8 GHz)帯でどの程度の強度かは測定できなかった。その後チェレンコフ放射をしない 3 MeV 電子ビームを使った実験がおこなわれたが⁴¹⁴、transition radiation の影響を精度よく推定することが困難で、GHz 帯の放射強度について結果は発表されていない。

加速器による GHz 帯での放射強度は当初の予測よりかなり小さいようだが、Pierre Auger Observatory では、地表アレイとの同時観測による実証実験が始まっている⁴¹⁵。2.4 m のパラボラ・アンテナを使った AMBER(Air-shower Microwave Bremsstrahlung Experimental Radiometer)や 4.5 m のパラボラ・アンテナの焦点に 53 pixels のセンサーを取り付けて立体角を広げて観測する MIDAS(Microwave Detection of Air Showers)等である。蛍光に代わり得るほど有意な信号は受かっていないようである。

11.5.2 気球搭載電波干渉計での観測

宇宙線エネルギー・スペクトルに GZK 上限が存在するならば、陽子-背景放射光子衝突で作られるニュートリノが約 0.6 EeV 以上で観測される筈である³⁸¹。その強度は宇宙進化のモデルや源の分布に依存する。南極の氷に突入したニュートリノが、氷の表面(約 1 km 以内)近くで核反応をおこし、核カスケードを発達させると、陰電子過剰によるチェレンコフ放射(Askaryan process)を起こす。この放射の立体角は約 0.36 sr であり、氷面からはほぼ全反射に近い角度で大気中に放射されるので、透過のフレネル係数を 0.12 としても、 2×10^{18} eV で S/N=7 程度で観測可能と推定される⁴¹⁶。

この放射を 200-1200 MHz の広域幅で気球に搭載した電波干渉計で観測しようとする ANITA(Antarctic Impulsive Transient Antenna)計画⁴¹⁶が 2006 年 12 月に実施された。気球高度氷上 33-35 km からは 650 km 遠方まで観測でき、氷面下 1.2 km の深さまで観測できるとすると、約 1.6 Mkm³のターゲットとなる皮算用である。水平、垂直方向偏波を観

⁴¹³ P.W. Gorham, N.G. Lehtinen, G.S. Varner, J.J. Beatty, A. Connolly, P. Chen, M.E. Conde, W. Gai, C. Hast, C.L. Hebert, C. Miki, R. Konecny, J. Kowalski, J. Ng, J.G. Power, K. Reil, L. Ruckman, D. Saltzberg, B.T. Stokes and D. Walz: “Observations of microwave continuum emission from air shower plasmas”, Phys. Rev., D 78 (2008) 032007.

⁴¹⁴ M. Monasor et al.: “The Microwave Air Yield Beam Experiment (MAYBE): measurement of GHz radiation for Ultra-High Energy Cosmic Rays detection”, Proc. 32nd ICRC, Beijing (2011). arXiv:1108.6321v1.

⁴¹⁵ P.S. Allison, for the Pierre Auger Collaboration: “Microwave detection of cosmic ray showers at the Pierre Auger Observatory”, Proc 32nd ICRC, Beijing, (2011).

⁴¹⁶ P.W. Gorham et al. (ANITA collaboration): “The Antarctic Impulsive Transient Antenna ultra-high energy neutrino detector: Design, performance, and sensitivity for the 2006-2007 balloon flight”, Astropart. Phys., 32 (2009) 10.

測するホーン・アンテナ(一辺 80 cm の四角錐型)が 16 台ずつ上下に配置された(図 11-7 左). それぞれが方位方向 22.5° をカバーし, 全てが水平より 10° 下方に向けられている. 上下の組となった少なくとも 4 台のアンテナで雑音より 5σ 以上の入力でトリガーし記録される. 南極大陸上空約 35 日間の観測(基地など人工雑音などの影響を除くと, 実質 17.3 日)で, 氷面下から発せられたニュートリノ起源と推定できる事象は観測できなく, 10^{19} - 10^{23} eV ではこれまでで最小のニュートリノ頻度の上限值が決められた(図 10-8)³⁸⁷. 同時に大気中で発生した EAS からの電波の反射と判定される事象を 6 例観測し, 10^{19} eV 以上の EAS 観測の可能性を提示した.

ANITA collaboration は更に解析を進め, 14 事象の反射波と 2 事象の直接波による (10^{18} - 6×10^{19}) eV 宇宙線の観測を発表した⁴¹⁷. 図 11-7 右に観測されたエネルギー分布がそれぞれ赤と黒で示されている. 直接波による頻度とエネルギーが, 反射波によるそれらより小さいのは観測される立体角が小さいからである. 到来方向精度は $(1.5 \pm 0.5)^\circ$ であり, 地表アレイの精度に匹敵する. この結果は氷面下の薄い氷層 (1.2 km 厚) 内で発生したニュートリノシャワーの観測に最適になるようデザインされた装置での実験によるが, 氷面より上で発生する EAS 観測に最適になるように設計した装置とアルゴリズムで, 新たに 30 日間の観測を行った場合, 期待されるエネルギー・スペクトルが青のヒストグラムで示されている. 電波観測単独で有意な結果が得られたことに注目し, 今後の進展に期待したい.

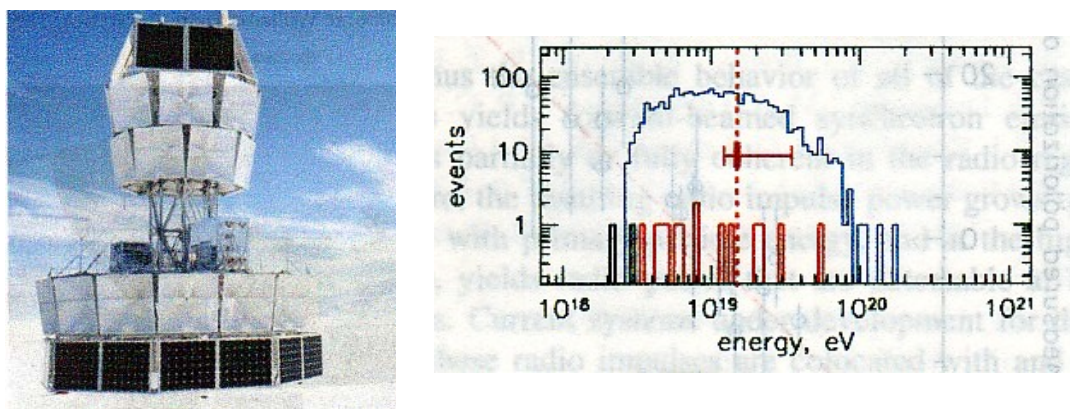


図 11-7(左) ANITA のホーン・アンテナの配置⁴¹⁶. 上段に 16 台, 下段に 16 台. 上 3 台と下 3 台の組み合わせで基本的には 15 の基線で干渉し, 到来方向を決める. (右) 赤が氷面での反射波, 黒が氷上の直接波の観測で決めた EAS のエネルギー分布⁴¹⁷. 氷面より上で発生する EAS 観測に最適になるように設計し, 新たに 30 日間の観測により期待されるエネルギー・スペクトルが青のヒストグラムで示されている.

⁴¹⁷ S. Hoover et al., (ANITA collaboration): “Observation of Ultrahigh-Energy Cosmic Rays with the ANITA Balloon-Borne Radio Interferometer”, Phys. Rev. Lett., 105 (2010) 151101.

第12章 衛星からの最高エネルギー領域宇宙線の観測

12.1 衛星からの蛍光観測の提案

地上での EAS の蛍光観測では、飛跡から観測点までの距離が数 10 km に及ぶので、エアロゾル、ダストによる散乱、吸収の補正が大きい。それに比べ衛星での観測では大気の厚さは高々 1000 g/m²，エアロゾルの影響は地表から 2~3 km なので、その補正は比較的小さい。かつ 1 台の観測点から 10,000 km² 以上の地表面積を覆うことができる。しかし雲の影響について精査が必要である。

リンズレー(J. Linsley)によれば⁴¹⁸，1979 年 9 月に Caltech で開催された “High Energy Astrophysics Advisory Panel” で、ハドソン(H. Hudson)から EAS が起こす大気中の発光を衛星から観測する考えを示唆された。リンズレーはこの可能性を検討し、アドヴァイザリー・パネルから要求された “Projects and Ideas for the 1980's” に寄稿した⁴¹⁹のが始まりである。ここには、低い軌道上から、光学的には鏡面の質は低くても(例えばマイラー)良いが大型の鏡を地上に向け、焦点面には速い光電子増倍管(PMT)を並べた装置で、EAS の軌跡から発せられる大気蛍光を観測する計画が提案されている(図 12-1 参照)。

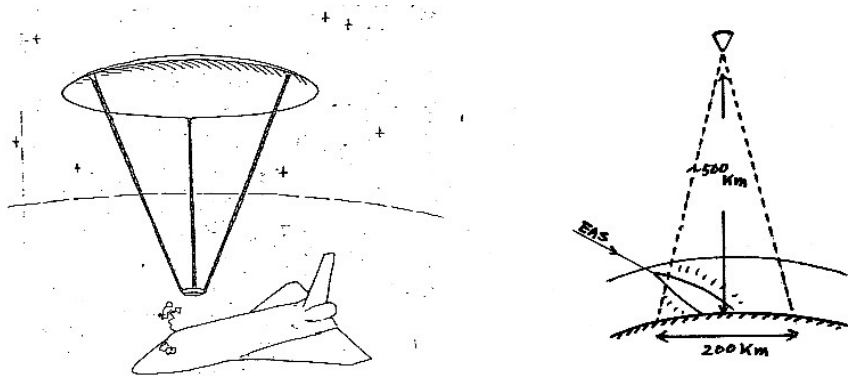


図 12-1 (左)1979年に Linsley により提案された概念図と、原忠生による観測方法の図⁴²⁰。但し Linsley の提案は直径 100 km の視野。

この後リンズレーは、ベンソン(R. Benson)の協力を得て、定量的に検討した具体案を発表した⁴²¹。高度約 500-600 km の円軌道に、口径 36 m の球面鏡($f=1$)とその焦点面においた口径 5 cm の約 5000 個の PMT を使用する(PMT1 本あたりの立体角 5.6×10^{-6} sr)，鏡は

⁴¹⁸ J. Linsley: “Detection of 10^{10} GeV Cosmic Neutrinos with a Space Station”, Proc. 19th ICRC, Denver, 3 (1985) 438.

⁴¹⁹ J. Linsley: “Study of 10^{20} eV Cosmic Rays by observing Air Showers from a Platform in Space”, Astronomy Survey Committee (Field Committee). (1979).

⁴²⁰ 原忠生: 「空気シンチレーション光による観測」, ICR-報告-34-81-5(東京大学宇宙線研究所), (1981) 11.

⁴²¹ R. Benson and J. Linsley: “Satellite Observation of Cosmic Ray Air Showers”, Proc. 17th ICRC, Paris, 8 (1981) 145.

metallized plastic film とした。この装置で、直径約 100 km の地表を大きな目で観測するので、Fly's Eye に対し、Owl's Eye と名付けた。軌道高度を 600 km とすると、シャワーマキシマムを見る PMT の $S/N \sim 2(E/10^{18} \text{ eV})$ なので、 10^{19} eV 以上の EAS の発達カーブを描ける設計になっている。

1979 年夏、京都で開催された第 16 回宇宙線国際会議の後、関東地区の空気シャワー研究者が宇宙線研究所に集まり、毎月一回空気シャワー談話会が開催された。この年の暮れの談話会で超大空気シャワー観測がテーマとなった際、鳥居祥二が衛星からの EAS 観測を提案した。丁度 Linsley の提案と同じ頃である。印刷された刊行物は残っていないが、原によれば⁴²⁰、鳥居の案は 1~2 m の小規模の鏡を複数使う、"Satellite Fly's Eye"案⁴¹⁹であった。この案では、EAS の飛跡からの蛍光と共に、軌跡に沿って発せられるチェレンコフ光の地表面での反射波を同時に観測することによる測定精度の向上が論じられたのが特徴である。

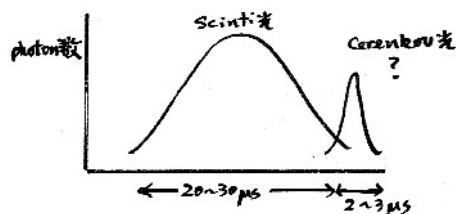


図 12-2 衛星から観測が期待される蛍光とチェレンコフ光の反射波⁴²⁰。

なお EAS からのチェレンコフ光の雪面での反射波を気球搭載装置で見る提案は 1972 年にチュダコフ(A.E. Chudakov)によってなされた⁴²²。雪面の反射波の検出を最初に試みたのは 1980 年頃のカスタノリ(C. Castagnoli)等である⁴²³。イタリア Plateau Rosa の雪面での反射波を 3500 m の山腹においた検出器(面積 0.6 m² の放物鏡 2 台の coincidence)で行った。対象は $10^{15} \sim 10^{16} \text{ eV}$ の EAS であった。

南極周回気球に搭載した装置での観測は、ロシアのアントノフ(R.A. Antonov)等により、2001 年に SPHERE 計画として提案された⁴²⁴。面積 1.5 m² の球面鏡の焦点におかれた 100 個の PMT で蛍光と反射チェレンコフ光を観測する。高度 35~40 km から地表約 1000 km² の視野で約 100 日のフライトをすれば 10^{18} eV から 10^{20} eV のスペクトルが得られる。この計画については後の宇宙線国際会議で毎回進捗状況が報告され、改良が加えられた装置

⁴²² A.E. Chudakov: "A possible method to detect EAS by Cherenkov radiation reflected from a snow ground surface", Trudy conf. po cosm. lutcham, Yakutsk (1972) 69 (in Russian)

⁴²³ C. Castagnoli, C. Murell and G. Navarra: "On the observation of EAS Cherenkov light reflected from Mountain Snow", Proc. 17th ICRC, Paris, 6 (1981) 103.

⁴²⁴ R.A. Antonov, D.V. Chernov, L.A. Kuzmichev, S.I. Nikolsky, M.I. Panasyuk and T.I. Sysojeva: "Antarctic Balloon-borne measurements of the CR spectrum above 10^{20} eV (Project)", Proc. 27th ICRC, Hamburg, (2001) 823.

は完成しているが、2013年の段階でまだ気球に搭載してEAS観測はなされていない⁴²⁵。

12.2 超広視野望遠鏡によるEUSO(Extreme Universe Space Observatory)

リズレーや鳥居の提案のような球面鏡であれば、視野が狭く観測できる地表面積は 10^4 km²程度にしかならず、衛星観測が例え実現できても、事象数としては1990年代に入って検討がなされていた大型の地上観測(後のPierre Auger Observatory)に比べメリットは少ない。米国アラバマ大学の高橋義幸は1995年に、2段フレネルレンズを使えば適切な精度で視野が60度まで広がることを示し、これを衛星に搭載してEASを観測するMASS(Maximum-energy Air Shower Satellite)計画を提案した⁴²⁶。これによれば監視できる地表面積はリズレー案に比し約100倍大きくなる。この広視野望遠鏡の開発とEUSO提案に至る発展は高橋の解説⁴²⁷に詳しく書かれている。

1996年にこの広視野望遠鏡を採用したOWL(Orbiting Wide-angle Light-collector)計画が、アメリカ合衆国航空宇宙局NASAの大型衛星企画の準備研究として採用された⁴²⁷。基本設計としては直径2.5 mのレンズの焦点面にマルチアノード光電子増倍管を配置した望遠鏡を2台500 kmから2000 km離して地球を周回させ、EASをステレオで観測する⁴²⁸(図12-3)。エネルギー、 X_{\max} 、到来方向を精度よく決めるにはステレオ観測が必要との主張は、ロー(E.C. Loh)等Fly's Eyeグループの地上での蛍光観測の経験に基づいたものであった。

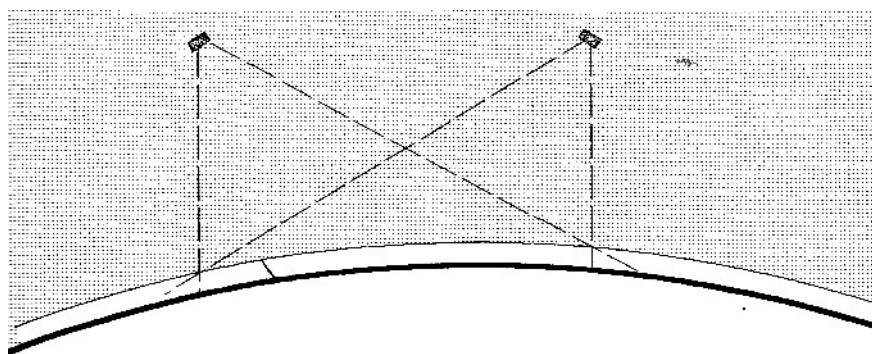


図 12-3 OWL 計画のステレオ観測図⁴²⁸

同時期にヨーロッパでは、イタリアを中心として Airwatch 計画が企画され実行可能性の

⁴²⁵ R.A. Antonov et al.: "Status of the SPHERE experiment", J. Phys. Conf. Series, 49 (2013) 012094.

⁴²⁶ Y. Takahashi: "Maximum-energy Auger(Air) Shower Satellite (MASS) for Observing Cosmic Rays in the Energy Region 10^{20-22} eV", Proc. 24th ICRC, Rome, 3 (1995) 595.

⁴²⁷ 高橋義幸: 「宇宙天文台 EUSO は何を明らかにするのか」, 科学 (岩波書店), 71 (2001) 176.

⁴²⁸ R.E. Streitmatter (the OWL Study Collaboration): "Orbiting Wide-angle Light-collectors (OWL): Observing Cosmic Rays from Space", AIP Conf. Proc. 433 (1997) 95.

検討が始まった⁴²⁹。衛星による観測は世界で一つ実現できれば良いという共通認識から、1999年に OWL と Airwatch が合体⁴³⁰し、同年スカルシ(L. Scarsi)を代表とする EUSO(Extreme Universe Space Observatory)計画が発足した⁴³¹。日本では高橋義幸、戎崎俊一を中心とし、理化学研究所で衛星観測が検討されていたが、EUSO の発足に当初から、欧州、米国、日本の三軸として参加した。

EUSO は自由衛星(Free Flyer)に搭載する計画として 2000 年 1 月に ESA(European Space Agency)へ提案された⁴³¹。ESA の宇宙科学委員会天文部会および基礎物理委員会は同年 3 月に国際宇宙ステーション(ISS)の外部観測施設に設置する案として検討することが承認され、ISS のコロンブス部(Columbus EPF)への設置を含めた Phase A デザインが始まった⁴³²。伊、仏、独などのヨーロッパ、日本、米国を中心とする 50 の研究機関、約 150 名の国際協力により、2003年に EUSO の Phase A Study のレポートが ESA に提出された⁴³³。

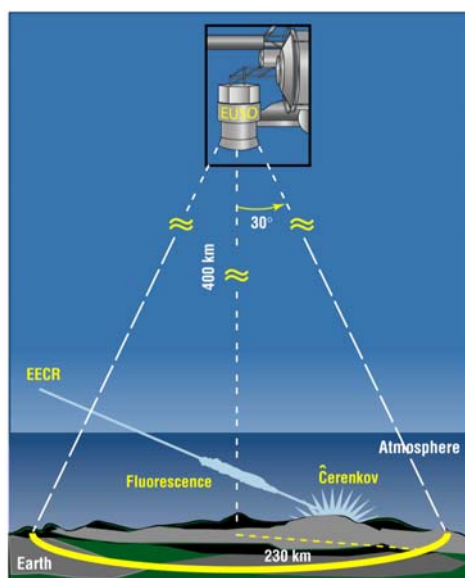


図 12-4 EUSO 観測の模式図⁴³³。

EUSO では、① 最高エネルギー宇宙線による荷電粒子天文学、② 超高エネルギーニュートリノ天文学、③ 大気内発光現象(流星、雷、夜光など)の全球観測、を主目的とする。望遠鏡に要求される超広視野、軽量、色収差を満足する光学系として、アラバマ大学で開発され、高橋義幸が MASS 計画で提案した 2 段フレネルレンズ(口径 2.5 m)を採用した。焦

⁴²⁹ C.N. De Marzo (the Airwatch Collaboration): “Feasibility study of an Airwatch mission”, AIP Conf. Proc. 433 (1997) 87.

⁴³⁰ L. Scarsi (the OA collaboration): “The OWL-AIRWATCH Experiment: Overview”, Proc. 26th ICRC, Salt Lake City, 2 (1999) 384.

⁴³¹ L. Scarsi et al.: “EUSO as Free-Flyer – Original Proposal”, F2/F3 proposal (2000)

⁴³² L. Scarsi: “EUSO: Using High Energy Cosmic Rays and Neutrinos as Messengers from the Unknown Universe”, J. Phys. Soc. Japan, Suppl. B, 70 (2001) 174.

⁴³³ EUSO; Report on the Phase A Study, EUSO-PI-REP-002, (31 August 2003).

点面検出器として Hamamatsu R8900-03-M36 のマルチアノード光電子増倍管(MAPMT)が採用された。合計約 6000 個の MAPMT で観測する。個々の PMT の視野は地表で約 $0.8 \times 0.8 \text{ km}^2$ である。

観測の閾エネルギー(約 50 %の効率でトリガーされるエネルギー)は、雲の無い晴天で $5 \times 10^{19} \text{ eV}$ である。到来方向決定精度は天頂角に依存し、EUSO で観測される平均天頂角 45 度では 10^{20} eV で約 3 度であり、当時 AGASA で観測されていたクラスターを十分の統計精度で確定できる。エネルギーの決定精度は、蛍光で X_{\max} が観測できる事象、蛍光だけでなく、地表面又は雲面での反射チェレンコフ光も同時に観測できる事象(golden events と名付けた)を使えば 25 %以内と推定した。しかし飛跡に沿ったチェレンコフ光のレイリー散乱、ミー散乱の影響について補正の必要がある。

Composition 決定に必要な X_{\max} の決定精度は、望遠鏡一台でも golden events のみ使えば達成できるとし、Phase A では当初からステレオ観測を考慮していない。大気中のエアロゾルや雲の存在で、蛍光の減衰ばかりでなく、散乱されたチェレンコフ光の影響でシャワーカーブは変形を受け、 X_{\max} の決定に大きな誤差をとまなう。真のシャワーカーブを得るには、1 波長のライダーでは不十分で、3 波長(NdYAG の 1054 nm の基本波、532 nm, 355 nm の 2 次, 3 次高調波)で大気を監視することが検討された。

EUSO 望遠鏡はスペース・シャトルで ISS に運搬される予定であったが、2003 年 2 月にスペース・シャトル、コロンビア号の爆発事故が起こり、スペース・シャトルの運用計画が大幅に後退することになった。2004 年 1 月には米国の新宇宙政策でスペース・シャトルの運航中止の方針が発表され、ESA の財政難も重なり、ESA では EUSO を含む新規ミッションの Phase B への進行が凍結された。

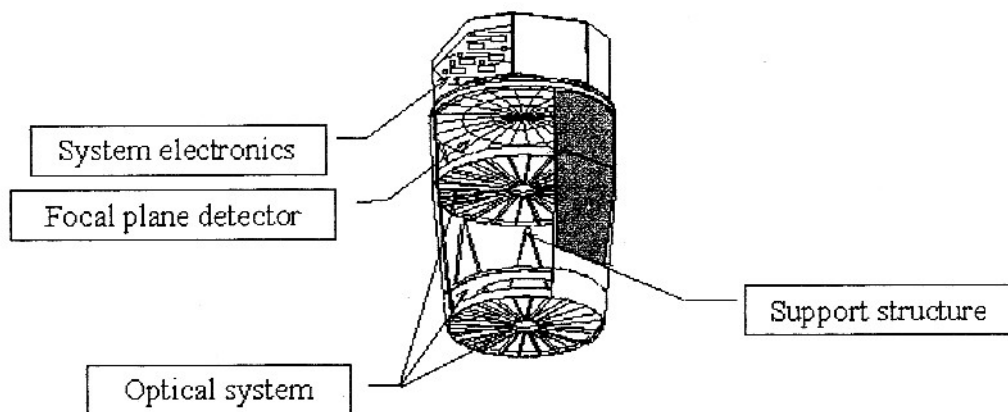


図 12-5 EUSO 望遠鏡の概観⁴³³。2 枚のフレネル・レンズから成る光学系、焦点面検出器、電子機器システムで構成される。

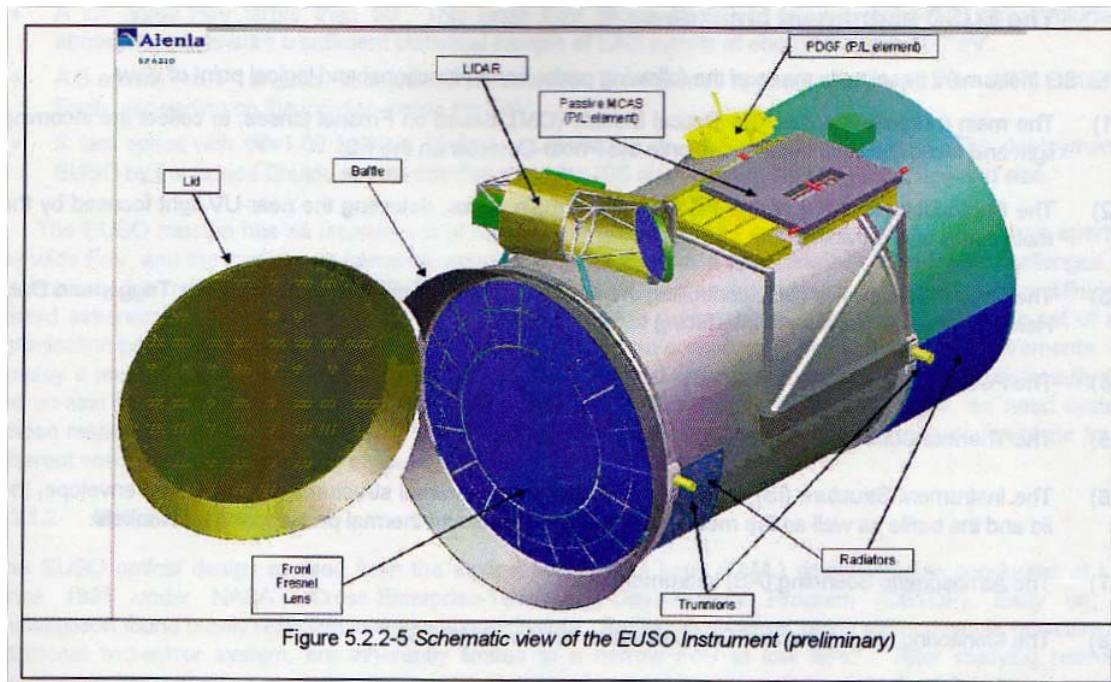


図 12-6 EUSO 装置の全体像⁴³³.

12.3 EUSO から JEM EUSO へ

日本、米国、一部の欧州の EUSO チームは、望遠鏡の設置を ESA のコロンバス・モジュールから日本のきぼう・モジュールに変更することにし、JEM(Japanese Experiment Module)-EUSO とプロジェクト名を変更して、2006 年に Phase A study を開始した。ISS のきぼう・モジュールは 2007~2008 年にスペース・シャトルで打ち上げられることが決まり、きぼうでの第 1 期利用計画もスペース・シャトルで運搬されることが決まった。その後はスペース・シャトルは利用できなくなり、ISS へ物資を運搬する補給機として、JAXA では HTV(H₂ Transfer Vehicle) を 2008 年に初飛行することを目指して開発していた。JAXA では、HTV の補給キャリア非与圧部に搭載して打ち上げ、きぼうの船外実験プラットフォーム(Japanese Experiment Module/Exposure Facility JEM/FE)に設置する第 2 期利用計画を公募し、JEM-EUSO は 2007 年にそのミッション候補の一つとして選ばれた⁴³⁴。

JEM-EUSO の基本設計は EUSO と変わらないが、全ての面で最新技術を取り入れながら改良が加えられている。特に、① レンズ有効面積の増大、② レンズの材質など光学系の設計改良による集光の増大、③ 検出器の光子検出効率(有効面積率×光電量子効率×光電子収集効率)の向上、④ トリガー・アルゴリズムの改良、等により、観測できる閾エネルギーを 3×10^{19} eV に下げる⁴³⁴。

⁴³⁴ T. Ebisuzaki (the JEM-EUSO collaboration): "The JEM-EUSO Project: Observing Extremely High Energy Cosmic Rays and Neutrinos from the International Space Station", Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.), 175-176 (2008) 237.

当初 2 年間の運用期間は望遠鏡は地球直下に向けられる(nadir mode)が、その後 3 年間は望遠鏡を傾ける(tilt mode)ことにより、閾エネルギーは上がるが観測面積の拡大を目指す。

雲の存在下でのエネルギー決定方法として、高橋等により Autonomous method が提案されている⁴³⁵。これによれば、各種の雲の存在下で、 10^{20} eV の宇宙線エネルギーは 25 % の精度が決定されるとしているが、実際の雲の存在下での実証が必要であろう。

大気モニターは、赤外線カメラ(11~13 μ m)、ライダー(355 nm, 20 mJ, 50 Hz)、主望遠鏡のスロー・データの使用⁴³⁶が計画されている。

2013 年の時点での状況は宇宙線国際会議報告⁴³⁷を参照されたい。

⁴³⁵ Y. Takahashi (the JEM-EUSO collaboration): “The JEM-EUSO Mission”, New J. Phys., 11 (2009) 065009.

⁴³⁶ T. Ebisuzaki (the JEM-EUSO collaboration): “The JEM-EUSO Mission”, XVI Int. Symp. on Very High Energy Cosmic Ray Interaction, Batavia (2010).

⁴³⁷ A. Santangelo, P. Picozza and T. Ebisuzaki: “Status of the JEM-EUSO Mission”, Proc. 33rd ICRC, Rio de Janeiro, (2013) id738.

第13章 実用には至っていない空気シャワー観測方法

EAS 観測には多くの方法が試みられてきた。エネルギーや到来方向を決定する EAS 観測法としては実用には至っていないが、EAS からの電波観測のように、今後の最新技術で復活するかもしれない。ここでは Radio Echo 法と Acoustic 法をを回顧する。他には、月の上におかれた弾性波検出器による 10^{21} eV 以上の宇宙線の観測、飛翔体搭載アンテナによる EAS 起源の電波を北極海氷面からの反射波として検出する法などが提案された。後者は南極での周回気球 ANITA による観測として実現している。

13.1 EAS に電波を放射しその反射波をとらえる (Radio Echo 法)

1940 年代に観測されていた高度 5~20 km の対流圏などからの散発的な電波 (sporadic radio reflection) は EAS からの電波の反射ではないかとの説があった。ブラケット (M.B.C. Blackett) とラヴェル (A.C.B. Lovell) が 1941 年の論文で、sporadic radio pulse の頻度から、EAS からの反射では説明できないことを指摘した⁴³⁸。しかし当時開発された電離層や対流圏探査の高出力送信機の反射波を使えば、約 10 km 離れた 2×10^{16} eV のシャワーを観測でき、超高エネルギー宇宙線のエネルギー・スペクトルを測定できるだろうと提案している。しかし受信電波強度の推定には、電子やイオンの寿命や、空気分子イオンとの衝突による効果は入っておらず、予想強度は非常に大きい。

菅浩一は、EAS により電離された酸素、窒素などの分子からの電波の反射波の強度を計算し、Radio Echo 法による EAS 検出を 1958 年の乗鞍シンポジウムで提案¹⁷⁸、1962 年のボリビアでの国際集会でより詳細な計算結果を発表した¹⁸⁰。後に指摘されるまで、ブラケットとラヴェルの提案は知らなかったそうである。

電離層や、成層圏に飛び込んだ隕石の飛跡 (流星) が電波の反射 (レーダー) で観測できるのと違うのは、EAS は空気密度の高い対流圏下層の現象であり、電離された電子は 10^{-7} 秒のオーダーで再結合してしまうため、電離した電子を反射体として利用することが困難で、正負に帯電したイオンによる反射を利用せざるを得ない。反射能率は、電子とイオンの質量を m , M とすると、 $(m/M)^2$ で小さくなる。そのため数分残っているイオンに対し、電波パルスを繰り返し送り、それらの反射波を数万回積算することにより S/N を向上させる必要がある。

菅は当時利用できる格好の電波として、海上の船の位置測定に使用されていた電波灯台であるロラン (1850 KHz, 100 kw, パルス幅 40 μ s で繰り返し 30 c/s) に目をつけた。計算によれば、 10^{20} eV の空気シャワーであれば、100 km 遠方でも、繰り返し電波の反射波を 5~6 分積分することにより、観測可能と推定された¹⁷⁹。

1967~1969 年にかけて菅等核研グループは、茨城県波崎、新潟市近郊の海岸、八丈島等

⁴³⁸ M.B.C. Blackett and A.C.B. Lovell: "Radio Echoes and Cosmic Ray Showers", Proc. Roy. Soc. London, A 177 (1941) 183.

に出掛け、この観測方法の可能性を調べた¹⁷⁶。この実験で、多くの障害となる雑音はフィルターを使って除去する見通しがたったが、信号との分離が困難な周波数成分を持つ波の「うねり」の存在が判明した。送信電波としてロランを利用して空気シャワーを観測するには、波のない北極圏などの氷上が望ましいとの結論になり、植村直己の北極横断冒険記を読みながらアラスカ行が検討されたが、実現には至らなかった。

なおこの実験の副産物として、この手法により数 100 km 遠方までの海上の波の高さを推定できることから、津波予報に役立つことがわかったことである。地震研究者向けに公表し、この手法が実現されていれば、2011 年の東日本大震災の津波対策に役立ったのではないかと惜まれる。

この反射法では、宇宙線の到来方向をどのように推定するかが問題となる。菅の指導のもと、松本やよいは計算を進展させ、1982 年にその測定方法を提案した⁴³⁹。図 12-1(b)のように、半径約 20 km の円上に、送信アンテナ(T)一台と受信アンテナ(R)を七台並べ、それぞれで反射波を測定する。それぞれの受診する反射波の強度はシャワーの到来方向と、図 12-1(a)で定義する角度 θ_s に依っている(図 12-1(c))ことから到来方向を推定する。反射強度を測定するために、ダイナミックレンジ 6 桁の受信装置が必要である。図の配置の場合、到来方向決定精度は約 10 度であるが、素子数を増やせば精度は向上する。

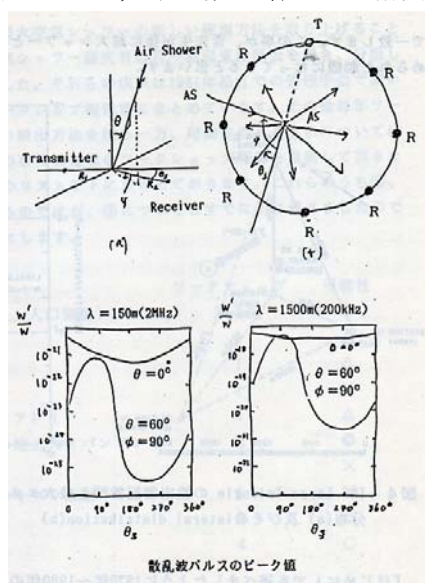


図 13-1 Radio Echo 法による空気シャワー観測方法⁴³⁹

2000 年代に入って、P.W. Gorham は近代のレーダー手法を使用し、Radio Echo 法を再検討し、新しい観測方法を提案している⁴⁴⁰。高度 10 km より上方を水平に通過するシャワーを例に期待される S/N などを数値で示し、 10^{18} eV 以上であれば電子からの反射を観測可能

⁴³⁹ 松本やよい: 「Radio Echo の特性」, ICR-報告 36-82-2 (1982) 96.

⁴⁴⁰ P.W. Gorham: "On the possibility of radar echo detection of ultra-high energy cosmic ray- and neutrino-induced extensive air showers", *Astropart. Phys.*, 15 (2001) 177.

であると論じている。但し EAS の到来方向，エネルギー等を HiRes 並みの精度で決めるには，3~5 km 以上離れた 3 箇所以上の送受信できる radar array station で観測する必要がある。

Gorham 等はペルーのリマから約 20 km 離れたところにある Jicamarca radar system を使って観測を実行することを提案した⁴⁴¹。このシステムは(300×300) m²の領域に 18,432 台の半波長ダイポールアンテナを配置した巨大な施設で，50 MHz で送信ピーク・パワーは 2 MW である。視野は東西方向に±70°カバーしている。まずは Jicamarca Radar Observatory で蓄積されている流星観測データの中から，流星データや他の現象として説明できない”anomalous”な事象で，宇宙線空気シャワーとして説明できる事象探しから始まっている⁴⁴²。

寺沢敏夫等は京都大学生存圏研究所信楽 MU 観測所の MU レーダーを使い，EAS からの反射波検出を試みている⁴⁴³。MU レーダーは中層大気 (Middle Atmosphere) と超高層大気 (Upper Atmosphere) を観測するために作られた大型大気観測用大気レーダーで，直径 103 m の円内に配置された 475 台の直交八木アンテナで構成される。46.7 MHz で送信ピーク・パワーは 1 MW である。

それぞれの観測で EAS 候補に該当する事象は見つかっているが，EAS である確証はない。

Telescope Array と連動し，EAS 検出に特化したアンテナ・アレイで EAS 反射波を受け取る計画 TARA(Telescope Array RAdar)が始まっている⁴⁴⁴。送信機，受信機の改良をしつつ計画が進んでおり，地表検出器，蛍光望遠鏡との連動により今後の進展が期待される。

13.2 高山の湖で EAS の芯からの水中音響をとらえる (Acoustic 法)

荷電粒子が物質中でカスケードシャワーを起こすと，エネルギー損失により発生した熱で局部が膨張し音波が発生する。この音波の利用が 1976 年に DUMAND (Deep Underwater Muon and Neutrino Detection) 計画(10.3.1 節参照)の中で，超高エネルギーニュートリノの検出方法としてボーエン (T. Bowen)⁴⁴⁵やドルゴシャイン (B.A. Dolgoshein)⁴⁴⁶により提唱された。スラク (L. Sulak)等はプロトンによる液体中での音響を

⁴⁴¹ T. Vinogradova, E. Chapin, P. Gorham and D. Saltzberg: “Proposed experiment to detect air showers with the Jicamarca radar system”, AIP Conf. Proc., 579 (2001) 271.

⁴⁴² D. Wahl, J. Chau, F. Galindo, A. Juaman and C.J. Solano: “The search for extended air showers at the Jicamarca Radio Observatory”, AIP Conf. Proc., 1123 (2009) 204.

⁴⁴³ T. Terasawa, T. Nakamura, H. Sagawa, H. Miyamoto, H. Yoshida and M. Fukushima: “Search for radio echoes from EAS with the MU radar, Shigaraki, Japan”, Proc. 31st ICRC, Lodz, (2009).

⁴⁴⁴ M. Abou Bakr Othman et al. (The Telescope Array Collaboration): “Bistatic Radar Detection of UHECR with TARA”, Proc. 33rd ICRC, Rio de Janeiro, (2013) id1192.

⁴⁴⁵ T. Bowen: “Sonic Particle Detection”, Proc. 1976 DUMAND Summer Workshop at Hawaii (ed. by A. Roberts and R. Donaldson, FNAL) (1977) p.523.

⁴⁴⁶ B.A. Dolgoshein: Proc. 1976 DUMAND Summer Workshop, Hawaii (1977) p.533.; G.A. Askarijan, B.A. Dolgoshein, A.N. Kalinovsky and N.W. Mokhov: “The Acoustic Detection of High Energy Neutrinos”, Proc. 15th ICRC, Budapest, 11 (1977) 427.

加速器により測定し、局部的、瞬間的に加熱されると、断熱膨張による音響信号が発生する理論が正しいことを実証した⁴⁴⁷。

東京工大の菅浩一、垣本史雄は、音波は水中での減衰が小さいために遠方でも観測でき、超大シャワーがその中心部に核カスケードの大きなエネルギーを保持する高山であれば、大きな有効面積を使え実験に有利であると考えた⁴⁴⁸。音波の強度、波形は、シャワー軸とハイドロフォンの方向との角度に強く依存するので(図 13-2 の左上図)、多数のハイドロフォンによる観測で推定する。

観測場所としては、ボリビアのチチカカ湖が最適であると考え、BASJE グループの金子達之助等と 1981~1984 年にかけて、チチカカ湖やカラコッタ湖で環境ノイズの測定(図 13-2, 右上)、ハイドロフォンのテスト、観測方法の検討等をおこなった⁴⁴⁹。その結果によれば、実験を有効におこなうには、1本にハイドロフォンを約 75cm 間隔で 100ヶ程度つけたストリングを数 10 本並べたアレイが必要である。ハイドロフォンの費用は高価であり、この価格が格段に安くならない限り実用的でないとの理由で実験は断念された。

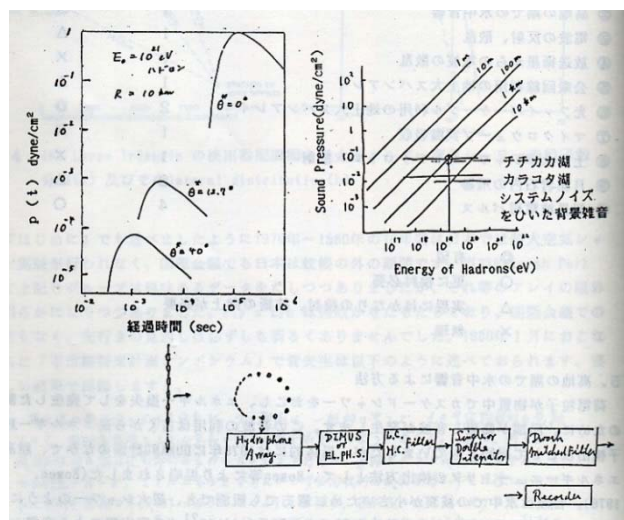


図 13-2 期待される音響信号(左上図)と、チチカカ湖、カラコッタ湖の音響背景雑音(右上)⁴⁴⁹。下図はハイドロフォンを縦に 100 個程度接続したストリングを、大きな円状に配置したストリング・アレイ。

⁴⁴⁷ L. Sulak, T. Armstrong, H Baranger, M. Bregman, T. Bowen, A.E. Pifer, P.A. Polakos, H. Bradner, A. Parvulescu, W.V. Jones and J. Learned: "Experimental Studies of the Acoustic Signature of Proton Beams Traversing Fluid Media", Nucl. Instrum. Methods, 161 (1979) 203.

⁴⁴⁸ 垣本史雄:「水中音響及びラジオ電波の反射波またわ散乱波の測定による超大空気シャワーの観測」, 第 1 回超大空気シャワー観測ワークショップ報告, ICR-報告-34-81-5 (1981) 22.

⁴⁴⁹ 金子達之助:「チチカカ湖における音響ノイズ測定とカラコッタ湖での予備実験計画」, ICR-報告-36-82-2 (1982) 101; 「高山の湖での Acoustic Detection」, ICR-報告-39-83-2 (1983) 86; 「音響検出のためのハイドロフォン系」, ICR-報告-44-84-2 (1982)104; 「音響検出のためのハイドロフォン系 II」, ICR-報告-49-85-3 (1985) 81.

あとがき

この「歴史」を書いていて、改めて菅浩一先生の果たされた貢献に思いを馳せている。先生は、世界に先駆けて EAS の蛍光観測法、Radio Echo 法を提唱し(5.1 節)、小田稔、三浦功先生等と原子核研究所で斬新な EAS 観測装置を立ち上げ(3.2 節)、チャカルタヤ山でガンマ線観測を開始し(BASJE,3.2.4 節)、INS-LAS array(4.6 節)で日本に最高エネルギー宇宙線探索実験を根付かせられた。その後も、Radio Echo 法の再考(13.1 節)、高地の湖での水中音響(Acoustic 法、13.2 節)、LF, VLF 電磁パルス観測(11.3 節)など、新しい観測方法を提案し、実際にそれぞれの観測を実施されたり、実施中であった 1988 年に 63 歳で急逝された。AGASA の建設が始まったばかりの時であり、その後の発展を見ていただけなかったことが残念である。

明野観測所の開設には当時の三宅三郎宇宙線研究所所長と鎌田甲一先生の、AGASA の実現は当時の荒船次郎所長のご尽力のお蔭である。

この「歴史」を書くきっかけになったのは、「まえがき」に書いたように福島正己氏と共著で日本物理学会誌に書いた「宇宙線エネルギー上限探索の歴史」や、佐川宏行氏に依頼されて日本物理学会でおこなった「宇宙線観測の歴史」のために集めた資料である。その際ばかりでなく、その後も記憶だけに頼らずに多くの論文を自宅の PC で読めるよう、竹田成宏氏に便宜をはかってもらった。資料を探す段階や、読んでも不明な点など、西村純、棚橋五郎、小早川恵三先生にご教示いただいた。また原忠生、垣本史雄、瀧田正人、伊藤信夫、(故)三浦靖子、Bruce Dawson, Roger Cray, 鳥居祥二、川崎賀也の各氏には資料をご送付いただいた。

この他にも多くの方々にお世話になり、この「小史」をまとめることができた。特に宇宙線研究所の数名の方々には詳細に読んでいただき、多くの修正をしていただいた。諸氏のご尽力、ご指導、ご協力に深く感謝申し上げます。

本文の脚注でリストできなかつた多くのレビュー論文の幾つかを下記に列挙する。

- A.M. Hillas: "Some Recent Developments in Cosmic Rays", Phys. Rep, 20C (1975)
- A.M. Hillas: "The Origin of Ultra-high-energy Cosmic Rays", Ann. Rev. Astron. Astrophys., 22 (1984) 425.
- S. Yoshida and H. Dai: "The extremely high energy cosmic rays", J. Phys. G: Nucl. Part. Phys., 24 (1998) 905.
- J.W. Cronin: "Cosmic Rays: the most energetic particles in the universe", Rev. Mod. Phys. 71 (1999) S165.
- V.S. Berezinsky: "Ultra high energy cosmic rays", Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 70 (1999) 419.

- A.M. Hillas: “Are we making progress in finding the sources of the most energetic cosmic rays?”, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 75 (1999) 109.
- P. Bhattacharjee and G. Sigl: “Origin and propagation of extremely high-energy cosmic rays”, Phys. Rep. 327 (2000) 109.
- J. Blümer, R. Engel and J.R. Hörandel: “Cosmic rays from the knee to the highest energies”, Prog. in Part. Nucl. Phys., 63 (2009) 293.
- J. Beatty and S. Westerhoff: “The Highest Energy Cosmic Rays”, Annu. Rev. Nucl. Part. Sci., 59 (2009) 319.