

スライド「宇宙線観測の歴史」の説明

元東京大学宇宙線研究所、元福井工業大学宇宙環境情報学科 永野元彦

[当日の講演は 30 分で、それぞれのスライドの説明が不十分であったので、説明文を書くことにした。数字はスライドの番号である。]

1. 宇宙線観測の歴史

今日は「宇宙線観測の歴史」と非常に広い範囲の話を依頼されました。

2. 宇宙線の観測方法

宇宙線観測の方法はこの図に示すように、衛星、気球、飛行機など飛翔体による観測、高山における原子核乾板やエマルジョン・チェンバーによる観測、高山から海面レベルにいたる地表空気シャワーアレイや蛍光、チェレンコフ望遠鏡による観測、地下でのミューオン、ニュートリノの観測など、とても 30 分で語ることはできません。飛翔体による観測、原子核乾板、エマルジョン・チェンバーによる観測は西村先生が担当して下さったので、主として「空気シャワー観測による宇宙線エネルギーの上限探索実験」、「ミューオン、ニュートリノ観測」、「ガンマ線観測」の初期の歴史を中心に話すことでご容赦下さい。

3. 空気シャワーの発見

1950 年までについては西村先生の詳しいお話がありましたので、省略しますが、空気シャワーの発見についてのみ追加しておきます。空気シャワーが発見されたのは Auger 等による 1938 年です。[P. Auger, Early History of Cosmic Ray Studies (Y. Sekido and H. Elliot eds., D.Reidel Pub. Co.) (1985) 213.]

1938 年以前にもガイガー・ミュラー計数管(以降 GM)でトリガーされた霧箱で、多数の粒子が同時に入射するシャワー現象や、同時計数回路で、ある程度広がったシャワーの存在が報告されていました。オージェの学生だったメイズは GM に有機ガスを混ぜることにより、GM の時間分解能を msec から μ sec に向上させ、オージェ等はこの GM を 150 m 離しても雑音の偶発同時計数を上回る同時計数が存在すること、すなわち非常に粒子の広がった拡大シャワーが存在し、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「拡大空気シャワー」であることを明らかにしました。1940 年代に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、高山でも実験をおこない、1940年代終わり頃に「大気頂上でのエネルギーが 10^{15} eV を超える宇宙線が存在すること」を発表しました。この結論は、一次宇宙線は電子とした空気中でのシャワー理論によっており、エネルギー推定は必ずしも正しくはありませんが、およそ 10^{15} eV にも達するエネルギーの宇宙線が存在することは驚きでした。

4. 1950年代初めの状況

1950年初めには、一次宇宙線は電子ではなく殆どは陽子であること。陽子以外に C,N,O から Fe に至る原子核が陽子の 1/1000 程度存在すること [P. Freier et al., Phys. Rev. 14 (1948) 213; H.L. Bradt and B. Peters, Phys. Rev. 74 (1948) 1828.]。この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し [E. Fermi, Prog. Theor. Phys. 5 (1950) 570]、発生した π ゼロから崩壊したガンマ線が電磁カスケードを発達させること。空気シャワーは核カスケードであり、多くの電磁カスケードの重なりであることが明らかになっていました。この空気シャワーの解析に、1950年に発表された西村、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)が威力を発揮しました [J. Nishimura and K. Kamata, Prog. Theor. Phys. 5 (1950) 899.]。

また 1950 年代の初頭には電波天文学がはじまり、銀河磁場の存在が明らかになりました。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」を提唱しました [E. Fermi, Phys. Rev. 75 (1949) 1169]。そうだとすれば、銀河系は有限の大きさだから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し、この宇宙線の上限を観測しようと大がかりな実験を考えたのが MIT のロッシです。

5. MIT-Agassiz experiment

1955年から1957年にかけて、ボストンの近郊アガシスの森で空気シャワー観測がおこなわれました [G.W. Clark, Early History of Cosmic Ray Studies (Y. Sekido and H. Elliot eds., D.Reidel Pub. Co.) (1985) 239..]。

この装置の開発と建設には小田稔先生が貢献されました。このような 1 m^2 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、空気シャワー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、いわゆるアナログコンピュータを開発して使用されました。なおこのトルエン液体シンチレータは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年に置き換えられま

した。

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で使用されています。このアガシスの観測で予想の上限 10^{15} eV をはるかに越えて、 10^{18} eV ものエネルギーの宇宙線が観測されました。[C.W. Clark et al., Phys. Rev., 122 (1961) 637.] 10^{18} eV 宇宙線は銀河系内に閉じ込めることができないので、銀河系外起源の宇宙線が存在すると推定されました。

6. 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、1958年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、リンズレー、スカルシ、ロッシが空気シャワー観測装置を設置しました[J. Linsley, L. Scarsi and B. Rossi, Suppl. J. Phys. Soc. Japan, 17 (1962) 91]。面積 3.3 m^2 のプラスチックシンチレーション検出器を鉛 10 cm の上下に配置した装置を 19 台、約 8 km^2 の領域内に配置したもので、信号はオシロスコープに記録されました。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す。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そうです。

この装置で、今から 50 年前の 1962 年に、すなわち宇宙線発見 50 年の記念の年に、当時の推定 10^{20} eV の宇宙線を観測しました。[J. Linsley, Phys. Rev. Lett., 10 (1963) 146.] この発見は 1965 年の 2.7 K 宇宙背景輻射の発見以前です。

7. 乗鞍宇宙線観測所

日本では、1949年に朝日新聞社の第1回学術奨励金が大阪市大渡瀬、神戸大皆川、名古屋大関戸、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、1950年から観測が始まりました。1951年には大阪市大の観測所も建てられました。主としておこなわれたのは、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が主流でした。

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ました。同時に設置された京大基礎物理学研究所と同じ全国共同利用研究所の第1号です。しかし1953年には米国のブルックヘブン研究所で3GeVのコスモトロン加速器が動き出し、新粒子探索、核子-核子反応の研究から、霧箱による空気シャワー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

移っていきました。[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。]

8. 東京大学原子核研究所(INS)宇宙線空気シャワー観測装置

MIT の装置の開発と建設に貢献した小田稔等が中心となり、1956 年原子核研究所に空気シャワー部が設立され、空気シャワー観測装置が建設されました。MIT より数年遅れましたが、技術的には極めて斬新なもので 1956 年から稼動を開始しました。プラスチック・シンチレータの地表アレイのほかに、地下 15m と 5m に μ 検出器、クロノトロン法による Fast timing、空気シャワーの中心部を見るネオンホドスコープ、鉛ガラス・エネルギー・フロー測定器、大型霧箱、パラメトロンを使った自動記録装置など、当時の技術の先端をいく、総合観測装置です。パラメトロンを使った計算機が設置され、サイズやコアの位置が算出されました。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 関数にフィットさせ、EAS の中心とサイズを決めるプログラムはたった 1K メモリーだったと記憶します。

9. INS での解析

EAS の芯を微細に観測する目的で、直径 2.5cm, 長さ 5cm のネオン管を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、1961 年に京都で開催された国際会議で注目されました[M. Oda and Y. Tanaka, J. Phys. Soc. Japan, 17 Suppl. AIII (1962)282.]。より分解能をあげる目的で発明されたのが、福井、宮本によるスパークチェンバーです[S. Fukui and S. Miyamoto, Nuovo Cimento XI (1959) 113.]。これは 1959 年で Discharge chamber として発表されましたが、その後スパークチェンバーとして、宇宙線のみならず、高エネルギー実験、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ます。

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)とミュオン数(N_μ)の関係が描かれました。シャワーマキシマムになると N_μ は減らないが N_e は減ります。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わかりません。「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。」との議論がなされました[小田稔、ICR-報告-79-89-10 (菅浩一先生追悼超大空気シャワーワークショップ報告), p.2]。

その頃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ており、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り、菅浩一を中心としてこの計画を実行することが決まりました。

10. ガンマ線観測事始(BASJE)

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)でガンマ線探索実験をおこなうことが決まりました。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【小田稔、ICR-報告-79-89-10 (菅浩一先生追悼超大空気シャワーワークショップ報告), p.2】。

1960年から、村上一昭も加わり、60 m²のミュオン検出器をそなえた EAS 観測装置(Bolivian Air Shower Joint Experiment, BASJE)の建設が始まり、1962年初頭から一次ガンマ線観測が開始されました。気圧が海面高度の半分しかない山上で、人力で600トンのガレナを積み上げる苦労は想像を絶したそうです。開始当初は、データはオッシロスコープに記録され、FT(Fast Timing)パルスの読みで到来方向を決める大変な作業でした。

数年間の観測で、 μ less シャワーを選択することにより、赤経 200°~220°方向に 4σ の増大が観測されましたが[K. Kamata et al., Can. J. Phys., 46 (1968) S72,]、一次ガンマ線であるとの結論には至りませんでした。

一次ガンマ線観測については、チェレンコフ望遠鏡による観測の事始を含めて後で述べます。

11.. 20 m²スパークチェンバー

原子核研究所では、空気シャワー観測は長期にわたるので、ネオンガスをガラス箱に密封したスパーク・チェンバーが開発され、面積 20 m²にしきつめて1964年から観測が開始されました[M. Nagano and S. Shibata, J. Phys. Soc. Japan, 20 (1965) 685]。複数の芯の EAS の観測から多重発生における「大横運動量(p_t)」の存在とその p_t 分布が求められました[T. Matano et al., Can. J. Phys., 46 (1968) S56.]。また「ぞうりむし」は 10^{12} eV 領域のミュオンによる制動輻射による水平方向からくる EAS であることが判明し、水平シャワー-Horizontal Air Shower(HAS)と名付けられました。

1965年に天頂角 86度の約 3×10^{14} eV の HAS が観測されました[T. Matano et al., Phys. Rev. Lett., 15 (1965) 594.]。天頂角 86度の大気層は 12000 g/cm² もあり、陽子による EAS は完全に吸収され到達できません。ところがこの HAS 中に霧箱でハドロンが観測され、核カスケードの可能性が高く、ミュオンの核反応、大気起源の

ニュートリノ、宇宙起源のニュートリノの可能性が論じられました。

そこで核研では、ミュオンの制動輻射による HAS と核カスケードによる HAS を区別するために、HAS シャワー用のミュオン検出器を作り観測がなされました。これが、キール大学[E. Bohm and M. Nagano, J. Phys. A: Math. Nucl. Gen. 6 (1973) 1262,]や明野[M. Nagano et al., J. Phys. G; Nucl. Phys. 12 (1986) 69.] での HAS 観測のきっかけです。後のミュオンの項で触れる時間はないと思いますが、大気ミュオンのエネルギースペクトルとしては 200TeV と最大エネルギーまで観測しています[T. Hara et al., Acta Phys. Acad. Sci. Hungaricae, 29 Suppl. 4 (1979) 125.]。

12. 蛍光観測法の提案は乗鞍シンポジウム

ここで、地表空気シャワーアレイではない、蛍光観測による方法の空気シャワー観測の歴史を回顧します。空気シャワー中の正、負の電子が大気中の窒素分子や窒素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利用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す。この図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おいて観測する方法が議論されたと記録されています[村山喬、宇宙線研究 3, No.5 (1958) 449.]。

蛍光効率核研のサイクロトロンを使って、1960 年に菅、棚橋によりおこなわれており、320nm 以上、1 気圧で 9.5photons/MeV と報告されていますが、最新の値の約半分かと思います[菅浩一、第 5 回宇宙空間科学研究会 (1974.7.11)]。

1962 年にボリビア、ラパスでおこなわれた 5th Interamerican Seminar で、菅、チュダコフにより、蛍光観測法のより具体的な議論がなされています[K. Suga, Proc. 5th Interamerican Symp, La Paz, (eds. I. Escobar et al.), 2 (1962) XLIX-1-5]。

13 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、グライセンのコーネル大学グループです。このコーネル大学の開発研究には尾崎が参加し、後に棚橋が加わりました。バーナーは重陽子ビームによる空気の発光効率の測定をし、空気シャワーからの蛍光の測定法につき詳細に博士論文で論じています[A.N. Bunner, Ph.D Thesis, Cornell U. 1967]。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ます。

コーネル大学グループは 1962 年からニューヨーク州のイサカ近郊の丘に 15 インチの PMT を、垂直、東西南北と 5 本並べた装置を、一辺がそれぞれ 11 km, 16 km, 12 km の三角形の頂点とする場所に設置し、1967 年まで観測が続けられました。しかし S/N 比不足で宇宙線観測には至りませんでした[A.N. Bunner, Ph.D Thesis, Cornell U. 1967]。

グライセンは 1965 年のロンドンで開催された国際会議で、天球を 500 セグメントに

分け、光電子増倍管で EAS の軌道から発せられる光子の到達時刻と光子数を記録する装置の必要性を発表.[K. Greisen, Proc. 9th ICRC, London, Invited paper, (1965) 609.]. コーネル大学では 1966 年から建設を開始し、1967 年から観測を開始しました。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ため観測可能領域が狭く、EAS の観測には至りませんでした[A.N. Bunner, Can. J. Phys., 46 (1967)10-S266.]. この蛍光観測法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、後の蛍光観測法の基礎となっています。

14. 堂平山で世界で初めてシャワー軌跡をとらえる

コーネル大学から帰国した棚橋を中心として、INS グループは、1968 年に堂平山に口径 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、観測を開始しました。天空の一部に限られますが、面積がコーネルの約 10 倍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ました[T. Hara et al., Acta Phys. Acad. Sci. Hungaricae, 29 (1970) 369.]. 視野角 18.4° にわたって 8 本の光電子増倍管を次々と $1.9 \mu \text{ sec}$ かけて横切り、それぞれの光電子増倍管の信号の大きさは殆ど変わらない。時間差と信号の大きさの変化を同時に満足するにはチェレンコフ光でなく、約 3.6 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、世界で初めて蛍光法で EAS の観測に成功しました。

棚橋等はその後直径 4 m のフレネルレンズを製作し、1973 年から伊豆で観測をおこないましたが、観測に成功しませんでした。レンズに使用したプラスチック材質の仕様の指定がルーズであったために、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そうです[T. Hara, Thesis, Osaka City U. 1977.].

15 フライズ・アイ(蠅の目, FE)

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とライセンの観測方法の技術開発に取り組み、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いました。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と言えます[H.E. Bergeson, et al., Phys. Rev. Lett. 39 (1977) 847.].

この予備実験の成果に基づき、ソルトレーク市近傍の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) を建設しました。FE I は直径 1.6m の反射鏡 67 枚の各焦点に合計 880 本の光電子増倍管をモザイク状に並べ、全天を観測するものです。FE II は FE I から 3.4km 離れた場所に配置し、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す。1981 年から 1992 年まで観測をおこない、1994 年に FEI によるエ

エネルギースペクトルを発表し、 2σ ですが GZK 上限の存在を提唱しています[D. Bird et al., Ap. J. 424 (1994) 491.]。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、天候のモニタリングなどの確立に時間を要したからです。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ます。

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)の観測が発表されました[D. Bird et al., Ap. J., 441 (1995) 144.]。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ません。

16. 最高エネルギー宇宙線探索実験年表

これまで述べたことと、その後の実験をまとめた年表です。

1965 年に 2.7K 宇宙背景放射が発見[A.A. Penzias and R.W. Wilson, Ap. J. 142 (1965)419.]されてすぐ、この放射との相互作用による宇宙線上限の存在が Greisen, Zatsepin and Kuzmin によって予測されました[K. Greisen, Phys. Rev. Lett. 16 (1966)748; Z.T. Zatsepin and V.A. Kuzmin, Sh. Eksp. Teor. Fiz. Pisma. Red. 4 (1966) 144.]。

この GZK 上限を超える Linsley の 10^{20} eV の事象に触発されて、1960 年代後半に、3 つの粒子検出器アレイによる観測が始まりました。水チェレンコフ検出器を約 12 km²の面積に配置した 英国リーズ大学のハベラーパーク・アレイ[M.A. Lawrence et al., J. Phys. G, 17 (1991) 733]、地下 1.7m にミュオン検出器を約 60 km²に配置した 豪州シドニー大学の SUGAR[C.J. Bell et al., J. Phys. A, 7 (1974) 990.]、極寒の地シベリアに建設を始め、1974 年に 18 km² に拡大されたヤクーツクの宇宙物理研究所のアレイ[B.N. Afanasiev et al., Proc. Tokyo Workshop on Techniques for the Study of EHECR, ed. by M. Nagano (ICRR, 1993) p.32]です。ハベラパーク、SUGAR では 10^{20} eV 事象が観測され、ヤクーツクでは観測されず、その後 30 年にわたり GZK 上限 「ある・なし」 論争が続くこととなります。

これに決着をつける目的で 1990 年に当時世界最大の約 100 km² の有効面積の AGASA の稼働が開始されました[N. Chiba et al., Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A, 311 (1992) 338.]。

AGASA では、GZK 上限は存在せず、11 例の 10^{20} eV 候補を発表しました[M. Takeda et al., Astropart. Phys. 19 (2003) 447.]。地表アレイのデータをモンテカルロシミュレーションを使ってエネルギー変換をすると、蛍光観測により決められたエネルギーより約 30%程度エネルギーを大きく見積もるという結果が、TA や PAO により得られていますが、何故大きくなるのか今後の課題です[永野元彦, 福島正巳; 日本物理学会誌, (2012) 発行予定]。

AGASA では宇宙線の到来方向については、 4×10^{19} eV を超えた宇宙線は大局的には

一様分布だが、離角が 2.5 度という測定誤差内に 2,3 個の宇宙線が集中するクラスターが数個観測されました[M. Takeda et al., Ap. J. 522 (1999) 225.]. 完全に一様ならこのようなことが起こる確率は 2.9%程度です。

蛍光観測では、Fly's Eye の後継として、HiRes が始まり、Fly's Eye の結果を確認する結果が得られています[R.U. Abbasi et al., Phys. Rev. Lett., 100 (2008) 101101.].

AGASA の結果は、FE やその後継装置の HiRes の結果と反し、宇宙初期起源の相転移欠陥の崩壊粒子の可能性や、荷電粒子による天体探索の可能性を示唆し、多くの他分野の研究者も巻き込み、この分野を活性化させ、その後のピエール・オージェ計画やテレスコープ・アレイ計画の推進を促進しました。

なお 1967 年頃から 1970 年代に空気シャワーからの LF-MF 領域で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ています。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、実用にはいたりませんでした。[H.R. Allan, Elementary Particle and Cosmic Ray Phys. 10 (1971) 171..] AGASA と連動して、東京工大が空気シャワー中心から 1 km 以上での 1 MHz 以下の周波数領域での電波の観測をおこないましたが、やはり信号が小さく、変動が大きく、実用化にはいたりませんでした。 [K. Kadota, Ph. D. Thesis, Tokyo Institute of Technology (1997).] TA や PAO で再び開発がおこなわれているようです。

17. 宇宙線ミュオン・ニュートリノの観測

宇宙線観測の初期には、主流であった宇宙線中のミュオンの観測について回顧します。宇宙線ミュオンの研究目的は

- (1) 高エネルギーミュオンのエネルギー・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オン発生機構(K/π)を反映する重要な基礎資料
- (2) ミュ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す。

18. 電磁石スペクトロメータによる測定

ミュオンのエネルギー・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 100GeV 程度まで行

われました。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 1TeV 程度まで実施されています。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である DEIS 計画で、1982 年に 7 TeV までの測定結果を発表しています。

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 年から観測が開始され、水平方向で約 20TeV まで測定されました。この結果は一次宇宙線の化学組成が 100TeV 領域まで 1TeV 領域の組成と変わらないという結果を支持します。[S. Matsuno et al., Phys. Rev. D 29 (1984) 1.]

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りました。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ました。[A. Okada et al., Rortschritte der Physik, 32 (1984) 135.]

19. KGF 実験

ミューオン・ニュートリノ観測の歴史の中で特筆すべきは、大阪市大三宅三郎先生がインド・タタ研究所と共同で実施されたコラ金鉱での観測(KGF)でしょう。[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.]

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 年代始めころからまずミューオンの depth-intensity の観測から開始されました。厚さ 5 cm の鉛をはさんで、上下に面積 1.62 m² のプ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ました。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(hg/cm²)に相当します。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りません。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ます。この関係を使って約 50TeV までエネルギースペクトルが決められました。

1968 年頃にユタ大学の地下実験で、数 10TeV 領域で K/π から期待される天頂角分布とは違って、天頂角に依存しないミューオン成分が存在することが発表されました。[H.E.Bergeson et al., Phys. Rev. Lett. 19 (1967) 1487.] 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ましたが、KGF やその他の実験でその結果は否定されました。

この事と実験を主導した J.W. Keuffel が急逝したことが、ユタ大学が地下実験を止めて、Fly's Eye に転向した理由の一つだと聞いています。

20. 大気ニュートリノの観測

[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.]

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 年から実施されました。岩石中における ν_{μ} の核反応でできるミュオンを観測する実験です。大気中でできたミュ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オンとは容易に区別できます。水平方向からの立体角が大きくなるように、6 m² 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オンの飛跡が測定されます。この装置 2 基で観測が開始され 1965 年に最初のニュートリノ観測が報告されました。[C.V. Achar et al., Phys. Lett. 18 (1965) 196.] 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ニュートリノの観測が報告されています。[R. Reines et al., Phys. Rev. Lett., 15 (1965) 429.]

コラ金鉱では、その後ニュートリノ核反応による発生ミュオンの天頂角ばかりでなく、方位角も測定できる装置、運動量も測定できる鉄芯電磁石を入れた装置などの改良を重ね、ニュートリノの全衝突断面積(のエネルギー依存性?)を加速器実験より早く発表しています。[三宅三郎、日本物理学会誌、34 (1979) 292.]

また 1980 年からこのように比例計数管を井桁に組んだ 570 トンの装置で陽子崩壊実験を開始しています。このような陽子崩壊の候補を数例観測しましたが、その後始まった Kamiokande などの実験で追認されませんでした。陽子崩壊現象に似た現象がどのようなプロセスで鉄中でおこるのか、シミュレーションによる実証が困難だったのかもかもしれません。[N. Ito (India-Japan Collaboration), Proc. Int. Symp. On Underground Phys. Exp., (1990) 101.]

21. 太陽ニュートリノ観測事始

KGF や南アの金鉱で大気ニュートリノが始めて観測された頃 Raymond Davis Jr. により、米国 Homestake 金鉱で、太陽ニュートリノ観測が始まっています。1963 年頃から地下 690m の石灰岩の鉱山で予備実験をおこない、1966 年頃から Homestake の金鉱地下 1500m で実験を開始し、太陽周期 11 年の 3 周期にわたって観測をおこない、太陽

ニュートリノ欠損の結果を確立しました。[<http://www.bnl.gov/bnlweb/raydavis/>]

このような化学処理による太陽ニュートリノの測定はその後、コーカサス山脈にある SAGE やグランサッソーにおける GALLEX などのガリウム実験($\nu_e + {}^{71}\text{Ga} \rightarrow {}^{71}\text{Ge} + e^-$) に引き継がれています。

22. 高エネルギー・宇宙ニュートリノ天文の草分け(DUMAND)

天体からのニュートリノを捕らえ、ニュートリノ天文学をおこなうには、比例計数管、シンチレータ、ネオンホドスコープなどを組み合わせた装置の拡大には限界があり、より巨大にするため、海洋で検出器を数珠つなぎにして沈める DUMAND 計画が、1973 年デンバーで開催された宇宙線国際会議で、ライネス等により提案されました。 Deep Underwater Muon And Neutrino Detection 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、ニュートリノが海水中で相互作用をおこし発生したハドロンのカスケード・シャワーから発するチェレンコフ光を観測する計画です。この計画はニュートリノの相互作用を素粒子実験として調べると同時に、宇宙ニュートリノを観測しようという大きな目的を持って始められました。1976 年頃から予備実験が開始されました。実質的な予算が日、米それぞれで認められたのは 1983 年で、1987 年に船上から 7 個のセンサーがついた string が下ろされ、数日間観測し、深海 4500m までのミューオンの depth-intensity が測定されています。[J. Babson et al., Phys. Rev. D 42 (1990) 3613.]

1989 年に米国 DOE (U.S. Department of Energy) から 9 本の String の DUMANDII が認められ、[DUMAND 1988 Proposal] 1993 年に 1 本に 25 個のセンサーをとりつけた string が下ろされ、沿岸までのケーブルも敷設されましたが、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ませんでした。この失敗が原因となり、1995 年に DOE 予算はキャンセルされ、中止されました。[M. Barone, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 44 (1995) 186]

しかしこの実験の R&D は、後の BAIKAL, AMANDA, IceCube, ANTARES などに生かされ、宇宙ニュートリノが捕らえられつつあります。なお Hardware は NESTOR に引きわたされました。

23. ミューオン・ニュートリノ実験年表

宇宙ニュートリノの観測は、ANTARES (フランスのトゥーロンの沖合い) や NESTOR などが 2003 年からデータをとっているようです。一方南極の氷山に埋め込む AMANDA は IceCube へと発展し、2005 年に完成し、成果をあげつつあるようです。

小柴研究室が神岡で地下観測を始めたのは 1968 年頃です。核子の励起状態の二次粒

子としてミューオンの束を観測するのが目的で、結果は戸塚さんの博士論文になっています。[T. Suda, Y. Totsuka and K. Koshihara, J. Phys. Soc. Japan, 36 (1974) 351.]

1978 年頃から陽子崩壊実験が立案され、光電子増倍管の開発が始まり、1983 年に KAMIOKANDE が完成し、観測が始まっています。超新星ニュートリノ、太陽ニュートリノ、大気ニュートリノなどの観測で輝かしい成果をあげ、SuperKAMIOKANDE と発展し、SNO, KamLAND など多くの実験が加わり発展してきた歴史は皆さんよくご存知であり、現状と今後については荒船、梶田氏の講演で話されると思います。

24. ガンマ線観測事始

現在はなばなく発展している sub-TeV 領域のガンマ線天文学について、その事始を回顧しておきます。1950 年はじめには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りました。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 Jelley やアイルランドの Porter 等です。1948 年に英国の Blackett は、空気シャワーから発せられるチェレンコフ光は夜光の約 0.01% を占めると推定しました。[P.M.S. Blackett, Rep. Cassiot Committee, 34 (1948).] 早速 Galbraith と Jelley が 1952 年から空気シャワーからのチェレンコフ光の観測を試みました。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 の光電子増倍管を使い、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観測しました。ノイズの 3 倍の光を観測しましたが、チェレンコフ光である確証は得られませんでした。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いました。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、空気シャワーのエネルギーは約 10^{14} eV と推定しています。[W. Galbraith and J.V. Jelley, J. Atmos. Terr. Phys., 6 (1955) 250.. 6 (1955) 304.]

後に別の反射鏡の焦点においたイメージインテンシファイアーで撮像し、確かに空気シャワーはチェレンコフ光で光っていることを示したのがこの写真です。[J.V. Jelley and N.A. Porter, Quart. J. Astron. Soc., 4 (1963) 275.]

25 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、組織だった天体観測をおこなったのは、1960～1964 年にかけてレベデフ研究所の Chudakov 等が Crimea でおこなった観測です。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 以上での上限を求めています。[A.E. Chudakov et al., Transl. Consultants Bureau, P.N. Lebedev Phys. Inst., 26 (1965) 99.] 普通の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でし

た。上限値を更に下げるには、1963年に Jelley と Porter がガンマ線 EAS の選別に Cherenkov Image を使うことを提唱しています。[J.V. Jelley and N.A. Porter, *Quart. J. Astron. Soc.*, 4 (1963) 275.]

また 1961 年に初めてのガンマ線衛星 Explorer X1 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ました。[W.L. Kraushaar and G.W. Clark, *Phys. Rev. Lett.*, 8 (1962) 106.] それから推定すると、TeV 領域での頻度が予想以上に低く、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ました。

BASJE でガンマ線観測が始まったのは丁度その頃です。BASJE は日本、米国、ボリビアの共同研究ですが、米国の参加者は MIT の Rossi, Clark など、ガンマ線衛星 Explorer X1 や OSO-3 の推進者達です。

26. 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 Porter や 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ました。直径 90cm の鏡 248 枚を組み合わせた反射鏡で、コンピュータで制御された経緯台です。[M.F. Cawley et al., *Exp. Astronomy*, 1 (1990) 173.] 焦点距離 7.3m の焦点に 109 本の光電子増倍管をおき、約 3.75 度の視野をカバーしたものです。1972 年打ち上げられた SAS2 で、100MeV 以上での幾つかの点源(Crab, CygX-3, Vela, Geminga など)が確定されましたが、Mt.Hopkins では 1975 年にこれらを含む幾つかの天体につき 0.2TeV 以上での上限値を報告しています。なお COS B では、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ます [Mayer-Hasselwander et al., *Astron. Astrophys.*, 103 (1982) 164].

27. 1980 年初頭の Turning point

1970 年代には、Mt.Hopkins, Crimea, インドの Ootakamund, 英国ダーラム大学の Narrabri, Utah 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ていますが、それぞれ単発で、必ずしも信頼できる結果ではありませんでした。T. Weekes 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とのことです。[T.C. Weekes, *Phys. Report*, 160 (1988) 1.]

SubTeV 領域では、Mt.Hopkins [S. Danaher et al., *Nature* 289 (1981) 568.], Albuquerque [R.C. Lamb et al., *Nature* 296 (1982) 543.], Dugway [J.C. Douthwaite et al., *Astron. Astrophys.* 126 (1983) 1.] の 3 箇所で、CygX-3 の 4.8 時間周期の 0.6-0.7 に excess が観測されました。

PeV 領域では 1983 年にドイツのキール大学グループにより白鳥座 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ました [M. Samorski and W. Stamm,

Astrophys. J. 268 (1983) L17]。データは 1976 年から 80 年に観測されたデータが使用されています。CygX3 方向のシャワーとしては、 $\text{ageS} > 1.1$ のシャワーが選択されたときの excess ですが、 μ/e 比は必ずしも小さくなく、ガンマ線としての特性を示していません。

28. 1985 年頃の ACT(Atmospheric Cherenkov Telescope)

この CygX-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 0.1TeV から 1TeV の閾値でこの表に示すように 12 の ACT が稼動しています。[T.C. Weekes, Phys. Report, 160 (1988) 1.]

29. 1985 年頃のガンマ線観測を目的とした地表アレイ

また世界中の既設の 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-MIA やロスアラモスの装置、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てガンマ線源の探索が始まりました。この表にあるように 19 ものグループが参加しています。[T.C. Weekes, Phys. Report, 160 (1988) 1.]

観測当初は幾つかの有意な報告も発表されましたが、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ません。

30. 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 の開発です。

前述したように、1963 年に Jelley と Porter が Image Intensifier を使用することを提唱し、1977 年に Weekes と Turver が PMT のアレイを使用することを提唱し、1984 年に MT. Hopkins に 37pixels の Imaging camera が設置されました。1985 年に Hillas が simulation により、約 97% のバックグラウンドが排除できることを示し[A.M. Hillas, Proc. 19th ICRC (La Jolla), 3 (1985) 445]、設置された Imaging camera で、ガンマ線の像がシミュレーションで調べられました。その結果 Crab から得られた結果がこの図です。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この図です[G. Vacanti et al., Ap. J. 377 (1991) 467.]。横軸は、チェレンコフ像の幅を表したものと考えてください。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ていることがわかります。この頃多くの実験がなされ、多くの結果が報告されていますが、この結果の信号は 20σ で、単独の観測で初めて確信のもてる結果があったと言えるのではないのでしょうか。

31. ガンマ線観測の年表

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ました。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年間観測が行われましたが、 10^{12} eV から 10^{15} eV 領域ではガンマ線は観測できませんでした。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、木舟等のオーストラリアにおける CANGALOO 実験が始まりました。

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りました。 10^{12} eV という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しょう。

ACTは現在は、VERITAS, CANGAROO, MAGIC, HESS と大型望遠鏡の時代に入っており、現状と将来については荒船さんや梶田さんが触られることと思います。