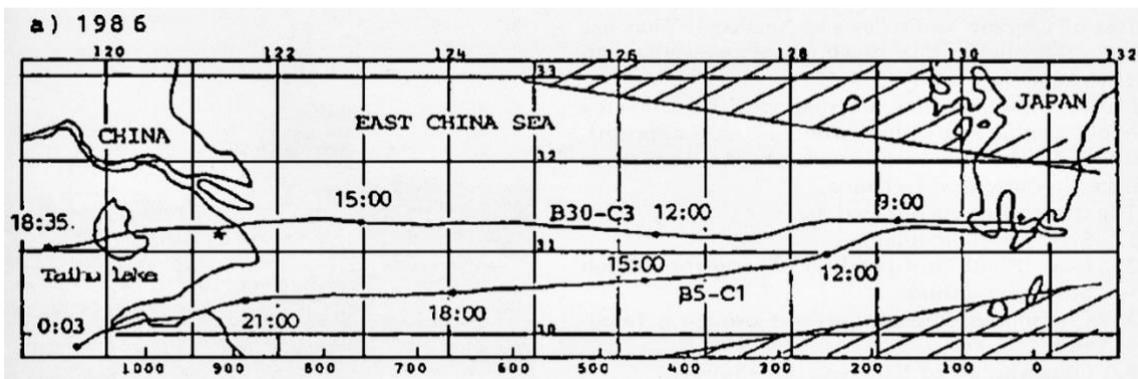
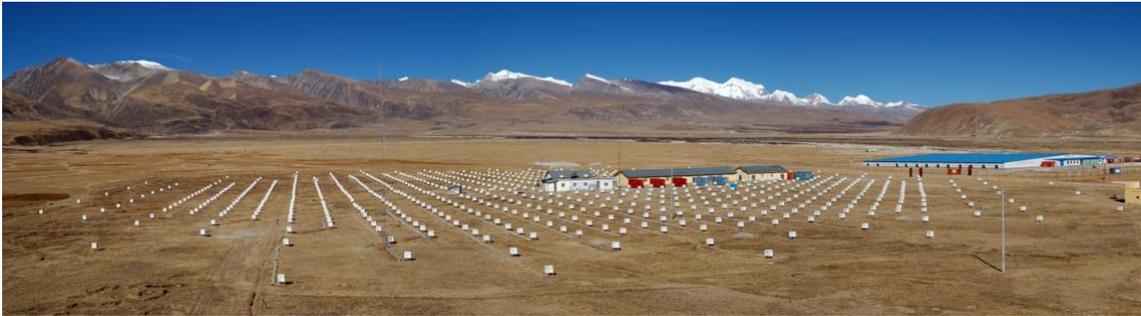


日本と中国の宇宙線共同研究



太田 周 編

東京大学宇宙線研究所

2022年2月

執筆者

太田 周 (I~II-2-3, III-1~III-3)

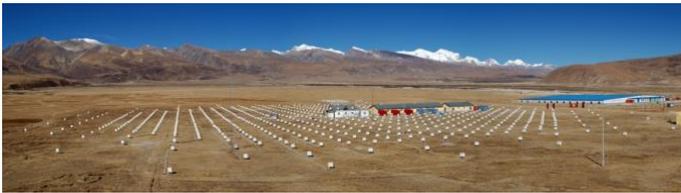
西村 純 (II-2-4, III-7)

柴田 槇雄 (III-4)

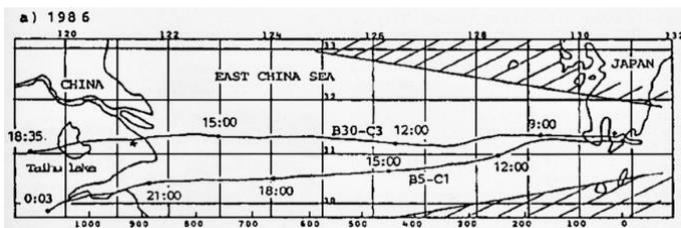
大西 宗博 (III-5)

村木 綏 (III-6)

鳥居 祥二 (III-8)



チベット・ヤンパーチン高原 Tibet III 空気シャワー観測装置 2003 年撮影



1986 年 東シナ海横断気球の航跡 内之浦宇宙空間観測所→中国大陸

はじめに

東京大学宇宙線研究所が作成しているアーカイブスに、日中宇宙線共同研究について加えたいので協力してほしいという依頼を梶田隆章所長から受け、宇宙線共同研究関係者の皆様のご協力を得てまとめの編纂に当たることとなりました。研究所のアーカイブスを担当されている中村健蔵高エネルギー加速器研究機構名誉教授から、参考資料、文献等を蒐集し、フォーラムを開くなど曖昧になっている記憶をできるだけ正確に蘇らせ記録を残すことにしたいとの依頼がありました。

これを受けて、2019年10月25日に日中宇宙線共同研究に従事された関係者によるフォーラムを開き、資料と記憶の確認を行いました。この作業を進めるなかで、アーカイブスを担当されている中村教授には、日中双方の60数年前からの古い文献や記録を掘り起こしていただき、また一部必要な中国語文献の英語への翻訳及び記録の編纂についても様々な提言をいただきました。

このアーカイブスは、中国建国後ほゞ70年間の研究交流をまとめることになったため、大きく初期の歴史的な交流と宇宙線実験共同研究の部分に分けることにしました。なお、初期の歴史的な交流には宇宙線分野に限らず関連分野の交流についても記録に留めることとしました。

このアーカイブス作成には下記の方々に各共同研究分野について分担執筆をお願いいたしました。また協力者の皆様には、原文の通読をお願いし、数々のご提案や修正のコメントをいただきました。参考資料、文献をひろくあたり、欠落や誤りがないよう執筆・精査いただいた関係者の皆様に深く感謝申し上げます。

執筆者及び協力者（敬称略/五十音順）：

執筆者：太田 周 大西宗博 柴田槇雄 鳥居祥二 西村 純 村木 綏

協力者：荒船次郎 笠原克昌 梶田隆章 瀧田正人 堀田直巳 中村健蔵

なお、2016年8月に急逝された湯田利典さんが遺されたチベット高原カンパラ山及びヤンパーチン高原における日中共同宇宙線実験の数々の記録は、氏の共同研究への強い意気込みと熱意を著しており、このアーカイブスの随所に採り入れさせていただきました。

ここに著した記録にはなお不十分な点があると思われます。修正・追加等が必要な事項を加え、また関連した資料・映像等を適宜ご提供いただき、記録の万全を期したいと思いますのでよろしく願いいたします。

2022年2月 太田 周

目 次

I. 黎明期の日中交流 —日中交流の幕開け— (太田周)	1
<日中国交回復前の三つの交流>	2
I-1. 訪中物理学代表团 朝永振一郎団長 (当時東京教育大学学長)	2
I-2. 北京科学シンポジウム 坂田昌一日本代表団長 (当時名古屋大学教授)	7
I-3. 北京シンポジウム暑気物理討論会 野上茂吉郎団長 (当時東京大学教授)	8
II. 中国改革開放後の交流	12
<日中宇宙線共同研究の幕開け> (太田周)	12
II-1. 日本宇宙線研究者の訪中	12
II-2. 中国側研究者の訪日	18
II-2-1) 中国科学院高能物理研究所 加速器視察団の訪日	18
II-2-2) 中国科学院高能物理研究所 中国宇宙線考察組の訪日	19
II-2-3) 第16回宇宙線国際会議 (京都)	20
II-2-4) 飛翔体人事交流、常進氏等の学振招聘研究員 (西村 純)	21
III. 宇宙線日中共同研究	22
<チベットにおける日中共同宇宙線実験> (太田周)	22
III-1. カンパラ山エマルジョン・チェンバー実験 (太田周)	23
III-2. ヤンパーチン (羊八井) 高原の調査	30
III-3. カンパラ山エマルジョン・チェンバーの実験結果	31
III-3-1) 研究成果の概要	31
III-3-2) 共同研究の評価	33
III-3-3) 将来計画・宇宙線の起源と組成	33
III-4. ヤンパーチン Tibet ASy 実験 I (柴田楨雄)	36
III-4-1) 全粒子エネルギースペクトル	37
III-4-2) 宇宙線化学組成 (AS+EC 連動実験)	38
III-4-3) YAC 検出器	40
III-5. ヤンパーチン Tibet ASy 実験 II (大西宗博)	44
III-5-1) 実験の構想、乗鞍観測所での実験、装置の建設 (1990年まで)	46
III-5-2) Tibet I 最初の成果	51
III-5-3) 装置の拡張 —Tibet I から Tibet III へ	53
III-5-4) Tibet II, Tibet III の成果	56
III-5-5) 地下ミュオン検出器 (MD) 建設と Sub PeV 宇宙ガンマ線の観測	60
III-5-6) 地下ミュオン検出器を併用したガンマ線観測の成果	70

Ⅲ－６．ヤンパーチン太陽中性子観測実験（村木 綏）	76
<飛翔体による宇宙線研究交流－１>	82
Ⅲ－７．観測用気球の開発と東シナ海横断気球（西村 純）	82
Ⅲ－７－１）プラスチック気球の開発と整備	82
Ⅲ－７－２）東シナ海横断気球（日中共同研究）	85
<飛翔体による宇宙線研究交流－２>	95
Ⅲ－８．CALET実験（鳥居祥二）	95
Ⅲ－８－１）日中における飛翔体観測の概要	95
Ⅲ－８－２）日中共同研究の歴史	96

I. 黎明期の日中交流 ―日中交流の幕開け― (太田周)

1972年の日中国交正常化以前の日本と中国の研究者の学術交流は、日本側においては一部の有識者あるいは社会人によるいわば民間交流から始まったといわれる状況にあった。実際、物理学の分野についてみると日本側においては茅誠司、有山兼孝、坂田昌一、朝永振一郎氏らをはじめとする大先輩が物理学分野の交流をそれぞれの思いと社会的な要請により担おうとしていたが、国交がないためもあって両国間の学術交流を願う多数の研究者や市民の参加による広がりをもたなかった。

このような中で、1955年5月にソヴィエト科学アカデミーの招待で、日本学術会議会長の茅誠司氏が15名の団員とともにソ連を訪問したが、出発前に中国科学院郭沫若会長に中国訪問を要請し、ソ連からの帰途中国を訪問したのが交流の始まりであった。日本の学術代表団は6月3日に北京に到着し、中国滞在中、多くの研究所、大学、工場、博物館、美術館、劇場を訪問し、中国の発展に「衝撃を受けた」と帰国後主要新聞を通じて報告している。この答礼として日本学術会議は郭沫若科学院会長を団長とする中国からの訪日代表団を55年12月に招待した。(以上、中国のインターネット「百度」による。)

1949年の中華人民共和国建国後間もない1955年、中国を代表する科学院訪日団(郭沫若団長)が4人の随員(総員15名)を伴い日本に視察訪問し、各地の教育研究機関、民間機関や会社・団体を訪ね友好を深めた。団長の郭沫若氏は、戦前に通算して20年以上を日本で暮らし学んだ中国科学院初代院長であり、歴史劇「屈原」を著わした中国文化界を代表する文人である。日本物理学会誌には1955年12月に、郭沫若団長と中国の著名な数学者蘇步青氏と金属物理学者葛庭燧氏が京都において湯川秀樹博士及び坂田昌一氏他と会談したほか、日本各地で講演と参加者との討論を行い、日本の科学者を中国に招きたいと述べたとあり、当時の新聞紙上には視察訪問先で訪日団が大きな関心と歓迎を受けたことが報じられている。時に1950年代の中国は、米ソ冷戦と対中封じ込めのなか侵略戦争の傷跡から立ち上がろうとする最中にあり、世界は親中の国々と反中の国々が対峙する状況にあった。1956年5月、カナダで開かれたパグウォッシュ会議の帰途、坂田昌一氏と日本代表団はソ連経由で北京に到着し、坂田昌一氏は郭沫若氏と再会し、郭沫若氏から日中友好の促進に関心がある日本の科学者を中国に招聘したいので協力するよう要請された。坂田氏は関係者と相談し日本物理学者訪中団の組織化に着手した。

1957年には日本物理学者訪中団(朝永振一郎団長)は、“竹のカーテン”の中にあり外部からはその実態がよく分らないといわれた新生中国の大学・物理関連研究所を視察交流し、訪問先の研究者との意見交換を行い友好を深めた。日中双方のこれらの視察訪問による相互交流は、閉ざされていた両国間の学術交流の道を拓く魁となった。

中国は建国から8年、新中国の息吹のなか人々は燎原の火のごとく「百家斉放」「百家争鳴」を謳歌したその社会情勢が、やがて「反右派闘争」に移り、相互批判を経て「人民公社」

運動に転じた時期である。一方、敗戦後の日本は新憲法の下で民主教育を希求し、物理学の研究者は、湯川秀樹博士の核力の中間子論によるノーベル物理学賞に刺激を受けて、それまでの一個人や一大学における研究の進め方から、組織的研究を集中的に進める体制に移行しようと、全国の研究者が共同で利用できる研究所の設置を希求した。1953年に設置された京都大学基礎物理学研究所と東京大学乗鞍宇宙線観測所は共同利用研究所の第一号であり、続いて1956年に東京大学原子核研究所（核研）が設置され全国の研究者に利用されることとなった。新設された核研に空気シャワー部とエマルジョン部が設置され、全国の大学・研究所において取り組んでいた宇宙線研究者の共同利用研究センターとしての役割を乗鞍宇宙線観測所とともに担うこととなった。

以下に日中国交回復以前の日中物理学分野の歴史的な三つの交流、1957年の訪中物理学代表团（朝永振一郎団長）、1964年の北京科学シンポジウム（坂田昌一団長）、1966年の北京シンポジウム夏季物理討論会（野上茂吉郎団長）と、国交回復後初の宇宙線分野の交流となった1977年の宇宙線研究者独自の交流について、訪中した方々や訪中団の訪中記・資料等をもとに黎明期の歴史的な交流について概観する。

<日中国交回復前の三つの交流>

I-1. 訪中物理学代表团 朝永振一郎団長（当時東京教育大学学長）

（日本物理学会誌には、訪中団名を「訪華物理学代表团」としているが、鎌田甲一氏の「中国訪問記（I）」中の記述に倣い以下「訪中物理学代表团」とした。）

- ・ 訪中日程：1957年5月7日－6月7日
- ・ 訪中団：物理学会誌資料には指名され招待された者6名、素粒子10名（内若手3名）、宇宙線4名、原子核実験3名、物性4名、応用物理3名、数学2名、化学1名で参加者33名とあるが（中国科学通報「百度」によれば20名）、その名簿は見当たらない。鎌田甲一氏の訪中記（I）と「百度」から名前が分る宇宙線以外の団員は、副団長有山兼孝（名古屋大学教授）、菊池正士核研所長、山内恭彦（東京大学教授）、伏見康治（大阪大学教授）、菅義夫（東京大学教授）、玉木英彦（東京大学教授）、広根徳太郎（東京大学教授）、吉永弘（大阪大学教授）、小谷正雄（東京大学教授）、木庭二郎（京都大学教授）、野上茂吉郎（東京大学教授）、小川修三（広島大学教授）、山田英二（名古屋大学助教授）、森田右（九州大学助教授）、末包昌太（大阪市立大学助手）、川崎昭一郎（東京大学研究生）等である。
- ・ 参加した宇宙線研究者：渡瀬 譲（大阪市大教授）、関戸弥太郎（名古屋大学教授）、藤本陽一（核研教授）、鎌田甲一（科学研究所研究員）（参加当時の所属）
- ・ 研究所訪問：北京〔物理研究所（銭三強所長、張文裕、朱洪元、肖健、何沢慧）応用物理研究所（施汝為所長）、地球物理研究所〕、雲南〔落雪山宇宙線研究所〕、
- ・ 大学訪問：北京大学（周培源副学長）、南開大学、雲南大学

1949年の中国建国後初の中国科学院の招待を受けた日本物理学代表団の訪中である。中国側からは、学術講演をすること、中国の科学者との討論を行うこと、研究所、学校、工場、農村等の見学することの三つの要請があった。中国側には、建国後の学校や工場、農村等の視察見学をして、中国の立ち上がる姿を確認し、改革への提言を期待するところがあった。

各訪問先での公演と討論は英語で行い、素粒子理論の朱洪元、宇宙線の張文裕、肖健氏などが中国語に翻訳し、参加者との質疑応答を行った。講演会の参加者は教室に約70名から80名の聴衆であった。宇宙線は、主に藤本（エマルジョン）、鎌田（空気シャワー）、関戸（宇宙線嵐、連続観測）、渡瀬（地下宇宙線観測）が専門領域の講演を分担し、「若手研究者の育成」、質疑と応答などについては全員で対応し討論した。

大学訪問：中国には15の国立総合大学があり、総合大学は文理系のみで、工学系、医科系の教育研究は工科大学と医科大において行われている。

北京大学、天津大学、天津南海大学、雲南大学を訪問した。大学の物理教育について、いずれの大学も学生実験室の実験器具は大半輸入品であるが日本より優れて整備されている、国家の理科系重視で予算も十分に使われているようだ。一方、大学教員は教育に追われ、研究に専念出来ない矛盾を抱えており、このことが大学訪問において如何に解決すべきか大学教員からの質問として出され、日本の研究者育成の紹介をするよう求められた。

研究所訪問：中国の研究所は総て中国科学院に所属している。

北京の物理研究所は北京市中心部から車で約35分の城外西北部に1953年建設され、原子核分野には原子核物理、宇宙線、理論物理、放射線科学の5部門があり、落雪山宇宙線研究所は附属施設である。中国の原子核物理の実験研究の主力は、この研究所に集められているようであった。銭三強所長は、「張文裕、肖健氏による落雪山の霧箱実験と何沢慧氏の原子核乾板の開発が唯一の物理活動である。」と強調した。落雪山の霧箱による新粒子の探索について、肖健氏は沢山の霧箱写真の中から新粒子候補を示し、訪中団に熱心に議論を迫った。また原子核乾板は Ilford C2 程度の感度のものを完成し、G5 程度（あらゆるエネルギーの荷電粒子の飛跡が写る）の乾板がようやく完成したとのことで、「自分達の手で努力して作り上げた仕事（自力更生）」の成果として銭所長の自慢するところであり、藤本氏にお土産として贈られた。原子核実験の部門には 2 基の Van de Graaff があり、1 基は 2.5MeV で運転準備中、他の 1 基は 700keV で中国製の絹布を使用しており、大部分が国産品であることが所長のご自慢であった。そのほか、マシンショップがあり、自力更生を地で行く測定器の作製や補修に取り組んでいた。

応用物理研究所は、1952年建設、半導体、固体発光、X線結晶学、金属物理、分光学、磁気、低温物理の7部門。地球物理研究所は、1957 IGYに向けて立上げ中であった。

落雪山宇宙線研究所は、1957年に建設され、北京から約2300km、海拔3,184m、北緯25度、昆明市から北北東約180kmに位置する。2台の霧箱が稼働している。50x50x24 cm³に1-2cm厚の鉛とアルミ板が交互に入れられた霧箱と有効体積30x30x7cm³、6,300

ガウスの磁場付の霧箱が稼働中で、新粒子の研究を目的としている。MDMは20cmトラックで8GeV/cという。他にニュートロンモニターを設置を予定している。世界的には、ストレンジ粒子の探索と多重発生の研究が各国において行われた時期にあり、霧箱による新粒子探索は日本においても乗鞍観測所の重要な実験課題であった。落雪山研究所は銅山の街にあり、市民生活環境が整っており居住可能である。そのため所員の滞在は1年間の長期も可能である。北京から二千数百kmの遠距離にある観測所の研究活動を支えた研究者の気力に敬意を抱いた。

訪中国の訪問先

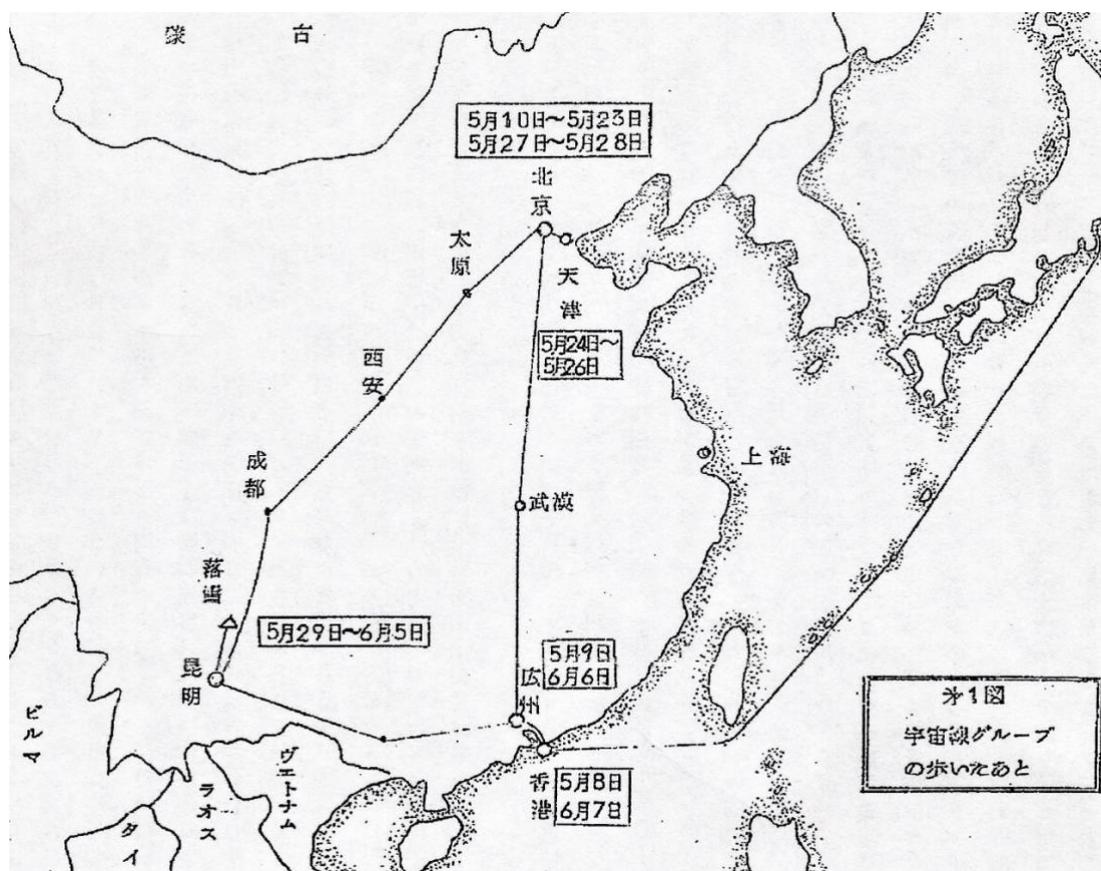


図.1. 宇宙線グループの訪問先

大学と研究所の訪問の印象として、大学（教員）は静的で研究所（研究者）は活動的であり、大学教員からは異口同音に若手の育成や人材養成の教育に忙殺され研究に専念する体制の整備が望まれていた。

中国の科学政策：中国は当時科学12ヵ年計画が政策として挙げられていた。これは「12年後（1970年代）に中国の科学が世界水準を追い越すよう発展させようとするもので、工業、経済の発展と睨み合わせて決められた。」（北京大学副学長周培源氏の説明）しかし「中国の研究には2つの困難がある。一つは経験ある専門家の不足、他は若手の不足である。落雪山の新粒子の実験も、物理的に面白い結果が出るというよりも、若い人がこれから目指す

高エネルギー物理に馴れる事が大切である。若手の養成は国内で行うことでうまくできると考えている。」との決意の発言があった。(銭三強所長、張文裕氏の説明。)

なお、鎌田甲一氏は、訪中の印象として、張文裕教授は二つの困難「一つは経験ある専門家の不足、他は若手の不足。」を掲げ、それには「特定部門に特異なピークが出るより、弱い部分を補充して国家全体としてバランスのとれた発展を意図している。」との意向を挙げたが、この発言に対して「あと10年の歳月が、中国科学界をどのように変貌させるか、甚だ興味ある問題である。」と述べ、中国宇宙線研究のこれからの発展を期待している。また、鎌田甲一氏の「訪中記(Ⅰ)」には、朝永振一郎団長が滞在中「子供と科学者とは、何処でもすぐに仲好くなる。」とよく発言されていたことを書いているが、お互いに知りたい専門家同士の自由な交流が行われていたことがうかがえる。

一方、訪中物理学代表团は、今後の学術交流の在り方について、一般的な形の約束を中国側ととりかわすために、中国側とメモランダム“日中両国物理学界の学術交流に関する覚書”を有山兼孝副団長と周培源中国物理学会理事長との間で作成した。(朝永団長は先に帰国され、有山副団長が代わって署名した。)野上報告(物理学会誌第12巻7号)には、北京大学、復旦大学からの日本の素粒子論研究者の長期派遣要請や、応用物理研究所からの固体物理の理論、実験の研究者の訪中要請、中国東北の金属研究所からの特殊鋼の専門家、電子顕微鏡や精密計器の技術者の訪中の要請などが中国側からあり、さらに宇宙線グループ代表団員達も中国の宇宙線研究者と交流し詳細な共同研究のプランについて打合せが行われるなど、第1回の訪中組織の受けた交流計画があまりに多岐にわたり混乱した。この苦い経験によって、具体的な計画を *implicit* に包含するような一般的な形の約束を中国側との間にとりかわすことが必要となり、訪中物理学代表团は、双方の学術交流の在り方について覚書として整理することとなった。

以下に、その覚書を再録する。

“日中両国物理学界の学術交流に関する覚書”

日本学術会議から派遣された訪華日本物理学代表团と中国物理学会とは、日本物理学界と中華人民共和国の物理学界との学術交流を進めるために、協議の上、以下のような提案をいたします。

両国の物理学界は物理学の交流と相互間の友好関係を促進し、かつ逐次に実現するために、最大の努力を払います。たとえば、

- (一) 両国のいろいろな研究機関の間に直接の学術交流の場をつくる。
- (二) 両国の物理学者達は互いに相手の物理学者を接待し、両国で開かれる物理学会議に参加、講演していただく。
- (三) 双方の物理学者達はたがいの招きに応じて各種の形式の訪問団を組織する。

訪華日本物理学代表团副団長 有山兼孝
中国物理学会理事長 周 培源

1957年5月28日 北京において

さらに、これまで訪中の実際の作業は野上茂吉郎氏を委員長に物理学会の小委員会において進めてきたが、57年の訪中が実現したことから、それ以降の物理学交流については、学術会議の物理学研究連絡委員会（委員長、小谷正雄教授）が中心となることが決定され、この中心機関が各専門分野と確りと連携して行くこととなった。（野上茂吉郎氏、物理学会誌第12巻7号）しかし、1958年5月に長崎市のデパートにおいて開かれていた「中国切手・切り絵展示会」に飾られていた中華人民共和国の五星紅旗が右翼団体に属する男により毀損される事件が起こった。この長崎国旗事件に日本と国交関係をもたない中国側が「国府」（台湾）の関与があったとして猛反発し、経済界をはじめ学術交流全般の活動が凍結され、60年12月に友好商社に限った取引が再開されたが、この覚え書が直ちに次の学術交流の牽引役になることはなかった。

1957年の訪中当時の中国の宇宙線研究を担っていた物理研究所の主幹研究員5名（銭三強、張文裕、朱洪元、肖健、何沢慧氏）について、鎌田氏の訪中記の記述をもとに、分る範囲でプロフィール（略歴）を再録しよう。いずれの方も1949年の新生中国に海外から建国に萌えて帰国された方々である。今は、鬼籍に入られた人々である。（年齢、年号は1957年当時。）

張文裕教授 (Zhang Wenyu) アメリカに13年間滞在し、プリンストンをはじめ各地の大学で宇宙線を研究した。1957年当時48歳で、穏健にして慎重な紳士である。陽電子の発見でノーベル賞を受賞したアンダーソンのところで霧箱の研究をした。55年に創設した雲南省の落雪山宇宙線観測所において霧箱による宇宙線の研究を指導し、多くの研究者を育てた。アメリカには多くの弟子がいるようで、七つになる一人息子もアメリカ国籍を持っているという。はじめ、Harwell から招かれたがどうしても出入国手続きがうまくゆかず、とうとう諦めてまっすぐ帰国したという。半年ばかり前に帰国した。（福建省の出身で若いころ方言に悩んだと語る。）

肖健助教授 (付研究員、Xiao Jian) 中国の大学（戦時中昆明にあった西南連合大学）を卒業後アメリカに渡り3年余りカリフォルニアのアンダーソンのところに留学した。肖氏の卒業した西南連合大学は抗戦中の「後方」にあり自由な雰囲気の中で学べる環境にあり、肖氏はノーベル物理学賞受賞者の楊振寧、李政道の両氏が同門であることを誇っていた。1957年当時37歳で、張文裕教授とは違って、才気渾発のハリキリボーイである。張文裕氏と霧箱実験を行い若者を指導した。

銭三強教授 (Qian Sanqiang) 中国解放闘争に参加、ドイツに亡命、キュリーの下で放射線の研究、終戦後新生中国に帰国し中国の核物理学の立上げに貢献する。当時は物理研究所長。卓球が得意で海外からの研究者との間で卓球交流を楽しむ。

何沢慧教授 (He Zehui) 銭三強所長夫人（山西省出身）、中国解放闘争に参加、フランスに亡命、マダムキュリーの下で研究、終戦後新生中国に帰国した。当時原子核乾板の開発研究を指導し、ソ連ドゥブナから入手した加速器露出乾板の解析を進めた。

日本の研究誌「宇宙線研究」には、1957年に訪中された宇宙線の方々を訪中報告をする

ことが予告されているが、同研究誌には鎌田甲一氏以外の訪中記の記載は見当たらない。日本物理学会誌には、1956、57、58年の談話室あるいは学会ニュース欄に訪中前後の記載が各巻に散見する。

参考文献：

宇宙線研究 鎌田甲一「中国訪問記（I）」 第2巻第3号 244-283

日本物理学会誌 【談話室あるいは学会ニュース】

木庭二郎 「中国の科学者を囲んで」 第11巻 第2号 pp77-79, 1956

伴野雄三 「中国との学术交流について」 第11巻 第11号 pp170-171, 1956

藤本陽一 「中国訪問団について」 第12巻 第3号 pp101-103, 1957

野上茂吉郎 「日中両国物理学界の学术交流に関する覚え書について」

第12巻 第7号 pp320-321, 1957

野上茂吉郎 「BUKURI日中交流小委員会発足のおしらせ」

第13巻 第1号 pp42-43, 1958

広根徳太郎 「今年の日中物理学交流はどうする」

第13巻 第1号 pp43-44, 1958

寺島由之助 「日中学术交流の正しい方向」

第13巻 第10号 pp654-655, 1958

中国科学通報「百度」 知网随問搜索引擎（堀田直巳、周楊華氏邦訳） pp1-16

I-2. 北京科学シンポジウム 坂田昌一日本代表団長（当時名古屋大学教授）

1964年8月16日から31日まで北京で開催された科学シンポジウム。その記録は、「北京科学シンポジウム特集号」として、研究者グループの雑誌「素粒子論研究」及び「原子核研究」に北京シンポジウム物理学実行委員会により詳しく報告されている。また、坂田昌一団長の著作「科学に新しい風を」（新日本出版）、「物理学と方法」（岩波書店）において、シンポジウム開催の趣旨が詳しく述べられている。

アジア、アフリカ、ラテンアメリカ、オセアニアの四大州44カ国から参加した帝国主義、新旧植民地主義の科学に反対する科学者の参加による国際会議であり、坂田日本代表団長は「自国に根をおろした科学」を創造し、「自国の人民に役立つ科学」を発展させることの重要性を述べている。

このシンポジウムに参加した日本代表団は61名（自然科学、農学、医学、歴史学等）であり、物理学分野からの出席者は、坂田昌一（素粒子論）、有山兼孝（物性論）、町田茂（素粒子論）、森田右（原子核物理）、永田忍（原子核物理）の5氏であり、宇宙線関連研究者の参加は記録からは見当たらない。

当時の世界の情勢は、このシンポジウムの直後に勃発したベトナム戦争が米国の介入により激戦化し、カムラン湾の戦闘において苦戦したアメリカ軍が核兵器の限定使用を行うのではないかと、世界大戦を誘発するのではないかと、という一部の論評が熾るなか、中国が核爆弾の実験を行い核爆弾の保持を明確に示した時期であり、日本においては高度経済成長の中、東海道新幹線の開通と東京オリンピック開催に沸いた時期であった。

中国側としては、北京科学シンポジウムをどのように捉えていたのだろうか。中国科学院国際合作局アジア・アフリカ・ラテンアメリカ課課長邱華盛氏は「中国科学院と日本の科学技術交流20周年」（学術月報1993年, Vol.46, No.1）において次のように述べている。

『1964年、著名な物理学者坂田昌一教授は日本の科学者代表団を率いて北京科学シンポジウムに出席するため（国交回復以前の）中国を訪問した。毛沢東主席はシンポジウムに出席した各国代表団と会見した際、坂田教授に「あなたの『新素粒子の対話』という論文は非常に多くの人に影響を与えるすばらしいもので、われわれはそれを中国語に翻訳して発表するつもりです。滞在中、中国をよく見て、多くの友人を作ってください。中国の多くの科学者が日本の科学者のよい友人になれることをわたしは信じています。」と語った。1966年夏、また北京で日中暑気物理討論会が開催されることとなった。これらの往来は日中両国の民間科学技術交流を促進し、国交正常化以降の両国の突っ込んだ、幅広い科学技術の交流のために基礎を築いた。』

北京科学シンポジウムにおいて際立った論点を挙げるならば、坂田昌一教授の論文『新素粒子観対話』の基礎にある「物質階層無限論」を毛沢東主席は自身の掲げる“階級的世界観”との比較において高く評価し、中国共産党中央機関誌「紅旗」に掲載公表し、機関紙「人民日報」がこれを取り上げたことにより、中国人民がこのことを広く知ることになった点であろう。

しかし、4年後の1968年に開催が予定された北京科学シンポジウムは文化大革命勃発のため開催されなかった。

参考文献：

坂田昌一著「科学に新しい風を」新日本出版社 1966
「北京科学シンポジウム特集号」北京科学シンポジウム物理学実行委員会編
「原子核研究」1965年8月 Vol.10 別冊、
「素粒子論研究」 1965年8月号 別冊
邱華盛 「中国科学院と日本の科学技術交流 20周年」学術月報 Vol.46 No.1, 11-15

I-3. 北京シンポジウム暑気物理討論会 野上茂吉郎団長（当時東京大学教授）

- ・会期：1966年7月23日から8月31日
- ・討論会参加者：四大州33ヶ国・一地域の物理学者、144名
- ・日本代表団31名参加（有職者17名、大学院学生14名）
- ・訪問・参観：北京で討論会后、延安、西安、武漢、上海、杭州、広州を訪問。
- ・研究所訪問：北京 [原子能研究所（城内、城外）、物理研究所]、上海 [原子能研究所]
- ・大学等訪問：北京 [清華大学（原子炉施設）、北京大学、技術学校]、延安 [人民公社、敬老院]、武漢 [武漢大学]、上海 [復旦大学、原子能研究所]
- ・参加した宇宙線関係者：早川幸男（名古屋大学）、丹生潔（核研）、政池明（名古屋大学）、岬曉夫（甲南大学）、田原博人（立教大学）、太田周（名古屋大学）（当時の所属）

1964年に開催された北京科学シンポジウムは、準備会のコミュニケにある「新興諸国の科学活動を発展させるためには、帝国主義に反対し、いろいろな形の植民地主義に反対し、民族や国家の独立をかちとるための努力が根本的に重要である。」という見解に連帯感をもった研究者による国際会議である。会議終了のコミュニケにおいて、この趣旨に賛同す

る研究者による2年後の「1966物理夏の学校」の開催を呼びかけている。日本側は、北京科学シンポジウム修了後、66年の夏の学校の実施に向けて日本準備会が結成され、物理学の各分野の若手グループ（宇宙線、素粒子論、原子核、プラズマ、物性）に北京科学シンポジウムの精神の理解を呼びかけ、参加を募り、各地区（北大地区、仙台地区、東京地区、名古屋地区、京都地区、阪神地区、広島地区、九州地区）の協力を得ることとなった。訪中直前に中国側からの突然の連絡により「物理夏の学校」が「暑気物理討論会」に変更されたことを知り、日本代表団は「物理夏の学校」として準備していた講義やゼミ形式を急遽討論会における報告や発表に変更し準備を行い参加することとなった。

いわゆる「夏の学校」を「暑気物理討論会」とした理由は、64年開催された北京科学シンポジウムのハイライトが坂田昌一氏の『新素粒子観対話』の基礎にある「物質階層無限論」を毛沢東主席が自身の掲げる“階級的世界観”との比較において高く評価したことにあると推測される。

北京において開催された暑気物理討論会のプレナリーセッションにおいて、中国の若手素粒子物理研究者集団が「毛沢東思想の輝かしい灯の下に行われた素粒子論の研究」という論文を発表し、その中で「層子模型」という新理論を提唱した。基本的考え方は、64年北京科学シンポジウムにおける坂田昌一教授の『新素粒子観対話』における「物質階層無限論」を毛沢東が「矛盾論」の思想と結び付け、素粒子論に内在する矛盾と位置づけ「一分為二」の手法で掘り下げるものであった。このことについて原子能研究所長の銭三強氏が「ピンポンで中国が日本をこえて世界制覇をしたように素粒子物理でも今後中国は先進国をこえるであろう。」と演説した。64年の北京科学シンポジウムにおいては、それまで坂田の階層性の理論と武谷の三段階論法から学ぼうとしていた中国の中堅研究者が後方に退き、それから「2年の間に、毛沢東思想による殲滅戦に加わった若手層が素粒子の層子模型を提唱し前面に登場したことに中国の素粒子物理学の意欲と今後の自信を示す。」との論評が当時の日本の新聞に載ったことが強く印象に残る。

日中宇宙線分科会が開かれ、中国側宇宙線研究者の張文裕、呉宗潘、蔡邦鑑、任敬儒氏と初めて研究交流することができた。分科会において、日本、中国の宇宙線研究の歴史と現状についてそれぞれ報告し、質疑討論した。日本には宇宙線研究者組織CRCがあること、共同利用研究所である原子核研究所宇宙線部及び乗鞍宇宙線観測所があること、宇宙線将来計画についてCRCで議論すること、などの紹介をした。中国側からは、専門家の不足、若手研究者の不足、将来計画が議論中であること、などの紹介があり、今後研究交流を行うことなどが確認された。参加された任敬儒氏は、日本の「宇宙線研究」誌を研究資料として活用されており、独学で日本語を学び、日本の宇宙線研究の現状を理解されていることを知りその熱意に感服した。同氏は文革中の苦難の中でもエマルジョンによる粒子測定技術を継続され、その後のECによる日中共同研究の立ち上げと実施に渾身の努力をされた。

中国側の落雪山霧箱実験によるデータの説明があり、解析結果について多重発生現象の「火の玉モデル」との関係について議論した。引き続きECC実験について乗鞍、チャカル

タヤ山及び地下ECCの実験について紹介し、日中共同研究の可能性について意見交換をした。日本側は落雪山宇宙線研究所訪問を張文裕教授にお願いしたが交通事情により不可能のため実現しなかった。そのため、呉氏、蔡氏を雲南ステーションから北京に呼び寄せ討論に参加していただくこととなった。この中国側の配慮により、初めて研究者との交流が実現したことに感謝し、相互に今後の研究交流を進めることを確約した。



図.2 延安の毛沢東氏のヤオトン(穴倉住居)前の記念写真 日本側参加者と中国側の関係者。毛沢東は著作の大部分を認め中国共産党はここで革命戦略を完成したと云われる。

北京を発って、延安・西安・武漢・上海・杭州を経て8月末に広州から深圳経由で帰国した。この間、毛・劉路線の対立を露わにした文化大革命闘争が激化し、赤本「毛主席語録」を掲げる多数の人々のデモや集会が訪問先において日夜見られた。「造反有理」を掲げる人々の激しい恣意行為が何を意味するのか、今後の中国の社会にどのように影響するのかなど考えさせられながらの帰国となった。

1968年に予定されていた次回の北京科学シンポジウムは、中国の文化大革命運動及び各国間の政治思想的な立場の違いによりシンポジウムは実施されなかった。これ以降、北京シンポジウム暑気物理討論会も開催されていない。

北京に出発する直前に、「宇宙線の丹生、岬、太田の発表内容がいずれもECC実験に関する内容であるが、宇宙線実験には他の実験もあるのでは」、との問いかけを研究者から受

けた。この問いかけは至極当然であるが、北京科学シンポジウムは「自国に根をおろした科学」の創造の重要性を表明している。ECCはまさにその考え方を体現した高エネルギー粒子の測定器であり、ECC実験は今回の夏の学校への出し物として当を得ている、と当時の我々は一方的な説明をした。その理由を以下に補遺する。

1950年代にはF e r m i と L a n d a u による多重発生理論の提唱があり、超高エネルギー多重発生が大きな物理学の課題であった。欧米においてはエマルジョン・スタックにより研究がおこなわれていた。日本においては、1956年基礎物理学研究所で開いた研究会で西村純氏は相対論的に不変な物理量である多重発生粒子の横方向運動量 P_T の測定をECC実験で調べることを提案した。具体的には、高エネルギー宇宙線の実験をECCと気球の開発及び三次元シャワー理論の組み合わせにより実施することを提案した。当時の各大学の実験グループが協力して、ECCの上部に炭素板を発生層として置いた測定器を気球により成層圏で宇宙線に露出して、炭素板中で発生する $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ によるカスケードシャワーを原子核乾板中で捉えることに成功した。西村純と鎌田甲一による三次元カスケード・シャワー理論により乾板中のシャワー電子数の計数値の遷移から γ 線のエネルギーを決定した。更にこのようにして決めたガンマ線エネルギーを用いて $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ の開角とエネルギーの運動学的関係を利用してエネルギーの精度を更に高めた。

このことにより超高エネルギー多重発生による中間子 π の横方向運動量 P_T が平均値約 400MeV/c であり、 π^0 のエネルギーにも入射エネルギーにも寄らない“一定の低い値”であることを発見した。これは超高エネルギー相互作用の2次粒子の P_T を精密に調べた世界最初の実験であり、日本のECCグループは、このことによって一足飛びに世界の第一線で先進国の研究室とわたりあうことができるようになった。横向き運動量一定の結果は、約十年後に欧米の加速器実験により再確認された。

このECCによる実験は、日本の個性的な実験として、気球から乗鞍、飛行機、富士、そしてチャカルタヤ、パミールとECC実験の拡大が図られた。また、その後、丹生潔氏ほかによる飛行機、加速器による精密ECC実験は、チャームクォークを「陽に含む」新粒子の発見への道を拓いた。このようにECC実験の手法は、日本で生まれた「自国に根をおろした科学」の典型であるといえよう。

参考文献：

北京シンポジウム日本物理実行委員会編

冊子「1966年北京シンポジウム夏期物理討論会—その活動の記録—」

西村純 素粒子論研究 12 (1956) 1.

K.Kamata and J.Nishimura:Prog.Theor.Phys.5(1950)899,6(1951)262,628,7(1952)185.

丹生潔 「チャーム粒子の発見」学士会報 No.879 (2009-IV) pp56-64

鎌田甲一「宇宙線研究者の組織」日本物理学会誌 第13巻 第11号 pp710-713, 1958

Ⅱ．中国改革開放後の交流

＜日中宇宙線共同研究の幕開け＞（太田周）

中国建国から四半世紀の中国の政治・社会を担ってきた周恩来総理と毛沢東主席が1976年に相次いで逝去し、華国峰氏による「四人組追放」が文化大革命の終焉を告げた。二度にわたり失脚した中国の最高実力者鄧小平氏の「改革開放路線」に中国だけではなく世界の文芸界・経済界が沸き立ち、各国の人々は中国との交流を目指して蝟集した。このような中、1977年の宇宙線研究者の訪中が可能となった。単純に歴史を眺めればその通りである。しかし1964年の北京科学シンポジウム、1966年の北京暑気物理討論会への日本の参加者は、それまで中国との友好を支えた人々であったが、中国の毛沢東思想に依拠する文化大革命の政治思想に馴染まない、あるいは反対する研究者が当時の日中学术交流に熱意を失い活動から去っていく状況にあった。

超高エネルギー核相互作用の研究を目指す宇宙線研究者有志は、1966年の北京暑気物理討論会の折に、日本の富士山を超える中国の高山や平原における宇宙線共同研究の実施を提案した。しかし中国側からは具体的な応答を受けることが出来なかったため、その実現を目指して宇宙線の研究会や研究者会議において中国との宇宙線共同研究の早期実現を提案してきた。このようななか、北京科学シンポジウム暑気物理討論会の日本側団長を務められた野上茂吉郎東大教授から精神的な激励を受けて、中国科学院に共同研究の希望を送り続けた。その努力が実り、暑気物理討論会から10年後の1976年中国科学院から訪中の招待を受けた。しかし、同年河北省唐山で起こった大地震の被害が北京を含め甚大であったため、この訪中は中止され、翌年77年に改めて宇宙線研究者の訪中が実現した。

Ⅱ－1．日本宇宙線研究者の訪中

- ・訪中記及び期日：1977年4月8日から4月29日 参考文献参照。
- ・参加者：和田雅美（理研）、西村 純（宇宙航空研究所）、棚橋五郎（宇宙線研）、岬 暁夫（埼玉大）、太田 周（宇都宮大）
- ・訪問先：北京、昆明、落雪山、広州において、学术交流、座談、参観を行う。
- ・研究所訪問：高能物理研究所、原子能研究所、物理研究所、昆明天文台、落雪山宇宙線観測所、昆明植物研究所
- ・大学訪問：北京大学、雲南大学
- ・中国若手研究者との討論
- ・中国の宇宙線研究への提言

北京における交流：

中国科学院の招待を受けて、和田雅美、西村純、棚橋五郎、岬暁夫、太田周の5名は19

77年4月8日から約3週間中国に滞在し、北京、昆明、落雪山、広州、上海において、学術交流、座談、参観等を行い4月29日に帰国した。西村純氏は所用のため昆明から上海を経て一足先に帰国された。中国滞在中の日程と交流を表1に上げる。

1972年の日中国交回復を受けて、いわゆる民間交流が人と物において経済界を中心にして急速に進展するなか、学術分野の交流を促す風潮が学会・政界・財界からも声があがった時期にあった。中国への今回の訪中は、「文化大革命」、「四人組追放」を経て日中国交回復後「改革開放路線」を迎えた中国の宇宙線分野の研究者と研究活動の率直な交流を行うことにあった。中国の研究の現状と将来への取組について意向を確かめ、宇宙線共同研究について意見交換し、友好を具体的に深めることが目的であった。

高能物理研究所の研究体制は、宇宙線物理研究部門とともに新たに加速器による高能物理（高エネルギー物理）研究部門を立ち上げ、張文裕教授が初代所長に就任していた。この間に核物理の研究体制について激しい議論が行われたようで、張所長とともに中国の宇宙線研究の立役者の一人であった肖健教授は宇宙線から加速器物理の建設に担当を変え、張文裕教授が老舗の宇宙線部門を立て直すために役割分担し、新たな出発点に立ったところであった。（譚有恒著「From Yunnan mountain to a Tibetan Highland」中国科学院高能物理研究所 北京 100049）20年前の1957年の訪中団に向って物理研究所銭三強所長（当時）が、「落雪山霧箱実験を成功させたのは、張文裕教授と肖健助教授の力である。」と胸を張って述べていたのは、高エネルギー物理・宇宙線物理の新体制の構想を見越した発言であったと云える。1977年当時、張文裕教授が所長を務める高能物理研究所は、建設中であり、場所は北京市の西郊外を予定しているとのことで、まだ土地建物ともに整備されていない“姿なき研究所”であり、見学することはできなかった。

日本側は、訪中した5人がそれぞれの分野の講演を行い、座談会において中国の研究者と交流を積極的に行い、共同研究を含め研究計画の進め方について提言を行った。講演会には70～80名が参加し、会場は北京市北部の学術研究区ともいべき北京大学に近い中関村の物理研究所で行われ、座談会と研究者との交流は滞在した北京ホテルにおいて主として夜間行われた。中国側の参加者は住区からバスで来られ、座談会は夜間10時過ぎにおよぶこともあった。中国滞在中の交流ともてなしは、極めて行き届いた配慮をいただき、特に北京301所（医院）技師の羅英明氏の日本語・中国語の通訳は完璧であり、参加者全員が深く感謝したところであった。

1970年代は、日本においては「素粒子物理研究所将来計画」をめぐる高エネルギー研究と宇宙線研究の進め方について、60年代からのほゞ数十年におよぶ議論がようやく決着し、二つの研究所、高エネルギー物理学研究所と宇宙線研究所において研究を進めることとなった時期である。宇宙線の研究は、乗鞍宇宙線観測所を改組拡充して、原子核研究所宇宙線部からの3部門弱の移管を含む合計6部門および乗鞍観測所と明野観測所を附属施設として持つ宇宙線研究所として、大学付置の全国共同利用研究所として行うことになった。初代所長に大阪市立大学教授三宅三郎氏が就任し、宇宙線将来計画が進められることとな

った。一方、ECC実験やAS実験の宇宙線研究者は、スイスの欧州連合原子核研究機関（CERN）の大型加速器LHC及び米国フェルミ研究所（Fermilab）の大型加速器（Tevatron）の稼働を見越して、加速器より2桁エネルギーが高い100TeV領域から上の超高エネルギー核相互作用の様相を探究する計画の早期着手に燃えていた。

中国は鄧小平氏の「改革開放路線」を迎え、外国との交流が各分野で立ち上がった時期にあり、歓迎会において中国側の要人からは教育・研究について文革中のブランクから早期に立ち上げたいとの発言があり、協力の要請があった。学術交流・座談・訪問において、中国の宇宙線研究者からは、研究の早期具体的進展を図りたいこと、特に張文裕高能物理研究所長からは今後の宇宙線研究の進め方について率直に進言してほしい、高エネルギー加速器計画は陽子加速器か電子加速器か高能加速器研究部門で検討中であり、加速器物理と宇宙線研究のことは日本と同じであるとの発言があった。中国の若手研究者との毎夜の座談を通じて高い研究意欲をもって真面目に文献調査を行っており、ECC、AS実験等の共同研究に高い研究意欲をもって熱心な準備研究を進めていることを知った。

<中国若手研究者との討論>

中国の若手との懇談会は科学院の仲介で数回開かれたが、文化大革命のお陰で学問が著しく損なわれた事に悩みを持ち、将来に対する大きな不安を抱いているとのことであった。

「このような状況では中国の科学の発展は望めないのではないか？」との真剣な問いかけに対し、「我々も戦争中学問をする機会が損なわれたが、戦後努力を続けることにより、我々の世代で国際的な成果を上げている人も出てきた。環境が悪かった事は心配することではなく取り返すことが出来る。中国は数千年に亘って優れた才能をもって、文化を築いてきた実績もある。10年位で経済レベルも日本と同じ程度になるだろうし、そこから先は中国の方が高いレベルに成るだろう。」と励ましたところ、大変自信がついたと喜んでくれた。中国がその後発展するのがどうして判ったのかと後年聞かれて、優れた歴史を持つ多くの国民が居れば発展するのは当然だと答えておいた。（西村純「中国の宇宙線研究をみる」科学 Vol. 47, No. 8, 504-506 (1977); 和田雅美「中国の宇宙線研究」日本物理学会誌 第32巻, 第12号, 967-970 (1977)）

<中国の宇宙線研究への提言>

我々が北京に到着した翌々日、科学院外事局主幹の方毅氏主催の歓迎懇談会が開かれ、また北京から雲南省昆明に移動する前日には、科学院外事局副局长の黄坤益氏が送別会を開いてくれた。席上中国の研究計画について意見を求められた。我々は、中国の研究計画について、中国がほかの国との競争にたえ、かつ国際的に高いレベルの成果を上げるためには、中国に特異性有る研究に力を注ぐ必要がある事を強調し、具体的には次の5つの提言を行った。

- (1) 気球実験は広大な国土を利用して長時間観測が可能であり、将来に備え宇宙科学研究の発展に寄与できる。これまで別々にやっていた研究者を統合し将来の中国の宇宙科学発展の基礎を天文、地球物理、宇宙線の研究交流により創り出せる。
- (2) 高山におけるエマルジョン・チェンバーの研究を早急に進める。すでに中国にはその技術があり、他国では中々できないアクセス可能な高山があり、エネルギーの高い特徴的なデータが得られる。将来中国の高エネルギー物理研究の基盤として有意義だろう。日中共同研究が可能であろう。
- (3) 地上または高山において宇宙線連続観測を行うこと。中国の地理的な位置のデータは他の場所では得られない学問的重要性があり、また中国で観測は行われた経験があり、技術的にそれ程困難ではない。
- (4) カウンターによる実験について、原子能研究所で見た各種検出器を具体的に空気シャワーの観測に生かすことにより、さらに高度な測定器が開発できるとともに、また加速器実験が始まる段階でこれらの経験がそのまま活かせる。
- (5) これらの実験を通じて人事交流が盛んになり、人材の育成が行われる、良い研究者が増えることになる。

張文裕所長からは、これらの提言について感謝し、今後検討したいとのことであった。また、それぞれの懇談会には、科学院の外事主幹の方毅氏、科学院外事局副局長の黄坤益氏等の政府高官も出席しておられたので、政府の高いレベルでこの方針について検討され議論されたと思われ、その後の日中交流の発展はほぼこの線に沿って発展していった様に見える。(西村純「中国の宇宙線研究をみる」科学 Vol. 47, No. 8, 504-506 (1977); 和田雅美「中国の宇宙線研究」日本物理学会誌 第 32 巻, 第 12 号, 967-970 (1977))

雲南大学・落雪山における交流：



図.3. 雲南省烏蒙山の落雪山宇宙線観測所（標高 3200m） 磁場付き霧箱と多重発生層付きの霧箱が稼働している。（今世紀に入り、観測所は閉鎖され、チベット高原ヤンパーチン宇宙線観測所に転換された。）

雲南省昆明における落雪山宇宙線観測所の訪問は1966年の北京シンポジウム夏季物理討論会の折りに、日本側出席者から訪問を要請したが実現できなかったため、今回の訪問に大きな期待があった。観測所の霧箱2基による研究は1957年訪問時から引き続き行われていた。1957年の渡瀬、関戸、藤本、鎌田の宇宙線研究者の訪問後20年、霧箱は拡大化され、1台は7500ガウスの磁場付容積 $150 \times 150 \times 30 \text{ cm}^3$ 、他の1台は多段式容積 $200 \times 140 \times 40 \text{ cm}^3$ で新粒子の観測を行い陽子の約10倍の新粒子の発見を内外に表明した。しかし、1953年アメリカのブルックヘブンの3GeVの加速器コスモトロンが新粒子の発見を次々と行い、世界の宇宙線による霧箱実験はシャワー現象や中間子多重発生の研究へと移って行った。米国における加速器の発達には日本の乗鞍観測所における霧箱実験においても影響があり、1950年から目指した多重発生研究からは、二次宇宙線の研究や空気シャワーの発達の研究などへ進み、中性子スペクトルの観測、空気シャワー発達の研究などで成果をあげた。

落雪山の実験は霧箱をはじめとして国産測定器が完備し、1957年から大幅改良の跡が各所に見られた。このような中、座談会等において霧箱による宇宙線研究に変わるEC実験やAS観測といった新たな研究を進めたいという研究者の意欲が各所に見られ、近い将来新たな物理の展開が期待された。

1977年宇宙線訪中者全員が、北京、昆明、落雪山、広州における研究交流、座談を通じて、実験的な環境は十分とは云えないが“自力更生”を指針として極めて真面目な努力を

つみあげている中国の科学者が近い将来必ず大きな発展をとげるに違いないという印象を参考文献にあるそれぞれの訪中記に認めている。この訪中を契機に、日中共同研究の実施が決まり、日中双方の多数の宇宙線研究者の交流の実現が可能になった。

表1 訪中滞在日程(1977年)

月 日	午 前	午 後	夜
4月8日		羽田発 北京着	
9日	日程相談 中国の高能研紹介	故 宮	観 劇
10日	長城	明の十三陵	歓迎会
11日	日本の宇宙線研究(西村)	一次宇宙線研究(和田) (市内見学)	科学院幹部と討論
12日	日本のEC実験(太田) (原子能研究所の視察)		座談会:一次宇宙線
13日	空気シャワー(棚橋) (手工芸工場)	歴史博物館	座談会:AS, EC
14日	カスケード理論(岬) (物理研究所)	座談会:宇宙線・加速器 天体物理:宇宙線	座談会:AS, EC
15日	大気球実験(西村) (市内見学)	天壇公園、瑠璃廠	座談会:新旧友人交流
16日	北京大学、頤和園	科学院幹部送別会、 座談会:気球	
17日	北京発	昆明着、西山参観	日程相談
18日	学术交流(全員)	座談会:天体・AS	歓迎会
19日	石 林 観 光		
20日	昆明天文台、雲南大学	新村へ(西村氏上海へ)	歓迎会
21日	落雪山観測所見学	座談会、新村へ	
22日	昆明へ	雲南植物研究所視察	
23日	座談会:宇宙線実験 (雲南出土文物展示場)	昆明発 広州着	曲芸、日程相談
24日	広利人民公社見学	七星岩へ	
25日	七星岩見学	広州へ	市内見学
26日	広州交易会	鎮海楼見学	歓迎会
27日	学术交流	初等・高等学校見学	
28日	広州発 上海着	漫画展・市内見学	歓迎会
29日	上海発	羽田着 帰国	

- (1) 北京における学術講演は日程の都合上、講演者以外は研究所見学・参観等を並行して行った。
(2) 昆明と広州における学術交流は、時間的余裕がないため、北京で行った講演のアウトラインまたは日本の研究の紹介に限られた。昆明においては、雲南大学、昆明天文台から25名が、また広州においては中山大学、広州師範大学、気象台から24名が学術交流に参加した。

参考文献:

西村純「中国の宇宙線研究をみる」科学 Vol.47, No.8, 504-506 (1977)
岬暁夫、太田周「日本と中国を結ぶ宇宙線研究」科学朝日 1977年9月号 71-74
和田雅美「中国の宇宙線研究」日本物理学会誌 第32巻第12号 967-970 (1977)
太田周、和田雅美、棚橋五郎、岬暁夫、北京基本粒子理論組 「中国訪問記」宇宙線研究 Vol.22 No.3 226-279 (1978)

譚有恒著「From Yunnan mountain to a Tibetan Highland」中国科学院高能物理研究所 北京 100049、(中国語からの英語訳：中村健蔵氏)
三宅三郎 「宇宙線談話」日本物理学会誌 Vol. 39, p800(1984)

II-2. 中国側研究者の訪日

1978年は、日中平和友好条約が締結され、10月に鄧小平主席来日により、政界、経済界、日本社会において日中友好とパンダ礼讃、中国観光旅行にどよめいた時期となった。宇宙線交流においても、中国科学院の高能物理研究所、空間物理研究所などから、所長格をはじめ多数の研究者が訪日し、研究者レベルの交流が一举に可能となり、広がった。以下に、中国から来日した宇宙線・加速器・宇宙科学分野の研究者の交流の動静についてみてみよう。

II-2-1) 中国科学院高能物理研究所 加速器視察団の訪日

・訪日期間：1977年7月5日から1ヶ月

・団長：高能物理研究所張文裕所長

この年の4月に、日本の宇宙線研究者と北京で交流し、共同研究など大きな研究交流を進めた直後の加速器視察の訪日である。高齢の張文裕所長の姿に改革開放後の中国の立ち上がる気迫が如実に表れていた。

・訪問研究所：高エネルギー物理学研究所、宇宙線研究所、理化学研究所

・訪日団員：張文裕、方守賢、嚴太玄、徐紹旺、干清浮、張質賢、鐘輝（秘書長）

中国の加速器（後にBEP Cと命名）計画について、加速器の機種を陽子衝突型加速器か電子衝突型加速器かの器種選定のため視察調査を行い、高エネルギー物理学研究所、大学、企業等を精力的に訪問・参観したようだ。宇宙線研究所への訪問もあったと記されているが、訪日団と宇宙線研究所の固有の交流記録は見当たらない。

高エネルギー分野の交流はその後、高エネルギー加速器研究機構と中国科学院高能物理研究所との研究者交流及びBファクトリー共同研究に関する交流等に発展している。また核物理学分野では、1980年代から「原子核日中シンポジウム」を大阪大学核物理センター等を会場として複数回開催しており、日中双方の実験・理論の研究者がシンポジウムに参加し交流している（RCNPの記録より）。

参考文献：

科学朝日グラビア 1977年9月号 98-99

高崎史彦「高エネルギー物理学研究所と中国の研究機関との研究交流」

特集：中国との学术交流 学術月報、49巻、9号、29-33頁（1996）

Ⅱ－２－２）中国科学院高能物理研究所 中国宇宙線考察組の訪日

- ・ 訪日時期：1978年9月23日から10月21日の約1ヶ月間
- ・ 団長：高能物理研究所霍安祥教授
- ・ 訪日団員：霍安祥、丁林凱、任敬儒、袁余奎、李揚碯、柳修彰（外事局幹部）
- ・ 訪問先：宇宙線研究所、宇宙研三陸バルーン・センター、理化学研究所、宇宙航空研究所、高エネルギー物理学研究所、乗鞍観測所、明野観測所、京都大学、神戸大学、名古屋大学

中国科学院高能物理研究所宇宙線考察組、団長霍安祥教授一行は、中国の宇宙線研究の進展を図るために、日本の宇宙線研究の中心である東大宇宙線研究所を訪問し、三宅三郎所長及び研究者と交流し、共同研究の実施と研究者の交流について確認した。また、各地の大学・宇宙線関連研究機関、宇宙航空研三陸バルーン基地を視察し、調査を行い、各地で座談を行った。訪日団は気球実験に関心があり、東大宇宙航空研究所三陸バルーン基地に招待を受け、大型気球の飛揚に参加し、西村純所長と日中間の気球共同実験について意見交換した。平均年齢40代半ばの訪日団員が早朝から朝食もとらず宿泊所のそばの三陸の海に接し、生まれて初めて本当の海に接したと子供のように興奮して楽しんでしたが、中国の大きさを改めて知らされた。

なお、24日に東京で行われた三宅宇宙線研究所長による歓迎会には、中国大使館に滞在中の科学院主幹の崔泰山氏が特別出席し、今回の交流訪問の目的は、日本の宇宙線研究について、実践を学ぶこと、研究組織の在り方、若手研究者の養成、国際協力等について視察と意見交換をお願いしたいとの挨拶があった。

高能物理研究所霍安祥団長からは、中日友好条約が今年結ばれ、中日研究者の友好が深まったとの挨拶があり、中国の宇宙線研究の現状について以下の報告があった。

落雪山宇宙線観測所は、1953年に雲南省東川市海拔3180mに建設し、初期から霧箱2基、多段式1基を稼働してきた。56～58年に奇妙粒子 Λ 、 K^0 、…の探索を行い、その後高エネルギー核相互作用、電磁相互作用の研究をした。1965年8km離れた場所に150 x 150 x 30 cm³の磁場付の大型霧箱を設置し重素粒子の研究をした。加速器実験の確認は未だない。

気球による観測研究を開始した。気球の製作、放球技術の訓練を行い、昨年末から小型気球のテストを開始した。中国ではまだ厚さ20ミクロンのポリエチレンは出来ていないが、出来るようになった暁にはどのようなテーマを採用するか検討中である。ASは未だ本格的ではないが、この2～3年内に実行に移したい。宇宙線連続観測は、これから始めたい。四人組のために基礎科学は大幅に遅れた。率直に言って文化大革命以降何もできない状態であった。華体制の下で科学研究に本格的に取り組みたい。

10月7日に宇宙線研究所セミナーにおいて高能研任敬儒氏より、「中国におけるエマルジョン・チェンバー実験」について以下の現状報告があった。この報告は、宇宙線研究に特

別寄稿された。

落雪山宇宙線観測所（3180m）において小規模のECの露出を行い、上海5F型X線フィルム上に宇宙線シャワーを捉えることに成功した。この実験はおそらく中国における初めてのEC実験である。シャワーの作るフィルム上の黒化度をエネルギーに変換することにより、宇宙線エネルギースペクトルを作成し、日本側の乗鞍EC実験結果と比較し適切な結果を得た。また、1977年にチベット高原甘巴拉山（カンパラ山）海拔5500mに約13トンの鉛板を用いて屋内に20cu, 8.3m²のECを建設した。200TeV以上15イベントを観測した。カンパラ山麓には、透明度60m、鱗のない魚がいる湖、羊卓雍湖（ヤンツウユンホ）がある。湖の広さは、中国の県（日本の郡）が三つも入る広さである。1977年日本の訪中団から送られた小型ECは、カンパラ山より高い6400mの高山に登山家に露出してもらった。エマルジョン・チェンバーの中国語は、乳膠室である。

中国からの訪日団のメンバーは、前年の日本の宇宙線訪中団の面々とは将に「有朋自遠方来、不亦乐乎」であった。訪日した宇宙線考察組は、後に「中国側は、日本を訪問してカンパラ山宇宙線共同実験は実施できると判断し、その準備を始めた。」と述べている。

参考文献：

中国宇宙線考察組「中国におけるエマルジョン・チェンバー実験」[特別寄稿] 宇宙線研究 Vol. 22 No. 4 p 281-288 1978年10月

II-2-3) 第16回宇宙線国際会議（京都）

IUPAP主催の第16回宇宙線国際会議が、1979年8月京都新都ホテルにおいて開催され、海外から多数の宇宙線研究者が参加した。宇宙線研究所が開催国代表となり、研究所長三宅三郎氏がIUPAP宇宙線部会議長として、また国際会議事務局長として会議の運営を行った。中国からは、10名を上回る会議参加者があり、ソ連、インドに並ぶ一国からの最大参加国となった。これを機会にEC、AS、宇宙物質、気球実験、シミュレーション等の分野に日中の研究者の交流が広がった。

国際会議においては、大阪市大・インドの共同研究による深地下ミューオンとニュートリノ実験結果が量子電磁力学と矛盾しないこと、及びチャカルタヤ日伯EC共同研究による新たな中間子多重発生モデルの提案等が注目された。乗鞍、チャカルタヤ、パミール、富士のEC実験結果の解釈について、超高エネルギー領域において核相互作用の極端な変化があるのか、それとも一次宇宙線の組成の変化が表れているのか、今後実験においてデータの統計をあげて研究グループ間の主張を検証する必要性が確認された。

国際会議終了後、中国側研究者とEC共同研究、年代測定、宇宙物質研究、AS実験などについて個別に議論が行われた。各分野個別の記録は不明であるが、宇宙物質の研究交流において、1988年3月、山越和雄氏（宇宙線研究所）が「日本・中国友好と地球化学の分野での学問的貢献」への寄与により功労記念証章を中国科学院地球化学研究所から受けている。氏の著作「低レベル放射線計測」は中国語に翻訳され、氏の中国との交流がうかがえる。

(原著は共立出版,1980 ; 中国語版は「低水平放射性線量」北京原子能出版社, 1985)

Ⅱ－２－４）飛翔体人事交流、常進氏等の学振招聘研究員（西村 純）

飛翔体による宇宙線研究については、具体的な内容はⅢ-6 及びⅢ-7 に詳しいがこの分野で特に大きな役割を担ったのは願逸東氏と常進氏である。

願氏は 1977 年に日本の訪問団が中国に訪れたとき、文化大革命の直後で前途に不安を抱いていたが、訪問団との議論で刺激を受けて、気球開発の責任者となった。気球システムの開発に成果をあげシステムエンジニアとしての才能を示したが、その後宇宙研には 2 回にわたって訪問教授として滞在している。共同利用研究機構としての宇宙研の研究体制にも大いに関心を示し、まさに理想的な研究体制であると喜んでいて、年とともに責任の大きな部門を任されて、現在では有人飛翔体の観測関係の責任者となっているもようである。なおそのほかの方々については人名など正確を期するためには願逸東氏に知らせて頂いたメモ（Ⅲ－７－２．東シナ海横断気球（日中共同研究）の文末）をそのまま掲げて置いた。

常進氏は南京紫金山天文台の所員であったが、筆者（西村）が南京を訪れた際行なった宇宙線研究の講演を聴いて、それがきっかけで宇宙線研究に興味を持つようになった。西独のマックスプランク研究所でアメリカとの共同研究をおこなっていた。しかし、日本で研究を行いたいというので中国で博士号をとり、日本学術振興会の招聘研究員として採用され、鳥居さん（神奈川大学）の所で研究を進めた。研究者としても成長し、現在 DAMPE と呼ばれる衛星の責任者となって、着々と成果を挙げている。これらの成果により、紫金山天文台長に昇進し、最近はさらに中国のこの方面の全体を総括する中国科学院国家天文台台長に就任したとのことである。詳しくはⅢ-8 の文末を参照。

Ⅲ. 宇宙線日中共同研究

＜チベットにおける日中共同宇宙線実験＞（太田周）

高山におけるエマルジョン・チェンバー（EC）共同研究については、既に1966年の北京科学シンポジウム暑期物理討論会で提案され、ついで1977年にも提案されている。この様な経過を経て、1979年に張文裕高能物理研究所長から三宅三郎宇宙線研究所長にチベットにおけるエマルジョン・チェンバー（EC）共同研究の具体的な提案があり、日中共同研究が正式にスタートすることとなった。その内容は、チベット高原のカンパラ山（甘巴拉山、標高5500m）に1000 m²規模のECを日中共同研究により設置し、加速器を超える超高エネルギー核相互作用の研究を行いたい。このため、中国はチベットのカンパラ山に1000 m²のコンクリート平台を作っており、日本から具体案に取組むために、研究者を派遣して欲しいという極めて野心的な提案であった。

日本側は、富士山頂で露出量は1000m²・年規模に達し、この実験で得られた結果の検証と新たな発展のために、より高い場所での実験を必要としていたこと、中国側もすでにECのテスト実験を行い実験の大型化を望んでいたこと、ECは比較的簡単な装置で予算と場所が確保できればすぐに実験を開始できることなどから、最初の宇宙線共同研究としてEC実験が最適であると判断された。また、当時の競争相手は、ソ連・ポーランド共同のパミール高原（4200m）、日伯共同のポリビア・チャカルタヤ山（5200m）のEC実験であり、互いに提唱する異なる物理成果の検証の重要性が世界の学会からの注目されていた。これに応えるためにも、富士山の約4倍の宇宙線強度をもつ世界最高高度のカンパラ山（5400m）のEC実験の重要性は明確であった。

中国側の対応は極めて速やかであり、1979年2月1日から4月11日まで日本学術振興会の海外学術調査の枠を利用して、中国科学院高能物理研究所 任敬儒氏と王允信氏が宇宙線研究所に滞在し、日中双方の共同研究に使用する感光材料の感度・現像処理法等の確認を行い、1980年度のEC日中共同研究に向けて実験の準備打合せを行った。中国チベット自治区カンパラ山（5400m）にEC実験用の宇宙線観測実験基地としてプラットフォーム（コンクリート製）1000m²の設営をすでに完了していることを知らされた。

日本側で調達するX線フィルムFUJI 200の特性曲線と中国側のX線フィルム上海5Fの特性の比較を行った。中国側が持参したフィルムを核研エレクトロンシンクロトロンに照射し、電子線照射量（dose）とフィルム黒化度（darkness）を比較することにより特性曲線を作成して、上海5Fフィルムの電子密度 vs 黒化度を比較検討した。その結果、上海5FフィルムをN型または中国製の天津Ⅲ型とともにECに併用することにより、宇宙線シャワーがEC中でのシャワースポットをマイクロフォトメトリーにより黒化度を測定することが可能であり、宇宙線シャワーのエネルギーがより精度よく決定できることを確認した。滞在中に宇都宮大学、中国側の多数の先輩がかつて留学した東京教育大学キャン

パスの見学等を行い、また初めての温泉体験として箱根宮ノ下保養所を訪ねた。

日本側は、本格的なEC共同研究を実施するためにECの感光材料（原子核乾板、X線フィルム）等の調達に向けて、科研費の申請を準備し、科研費B950万の配分を受けて1980年カンパラ山宇宙線共同研究のスタートに備えた。

1970年代末の宇宙線による超高エネルギー相互作用の研究は世界的競争の時代に入っていた。一方、欧州原子核共同研究所や米国フェルミ加速器研究所の大型加速器の稼働が目前にあった。日本においては、日本とブラジルの共同研究によるボリビアのチャカルタヤ山(5200m)のEC研究が62年頃から行われており、1970年に富士山頂(3700m)のEC実験が開始され79年には3ヵ年計画の特別設備費が認められ、規模の拡大を進めていた。一方、ソ連・ポーランドによるパミール高原(4200m)の共同研究は、約3000トンの鉛を用いて大規模なEC実験を開始していた。このようななかで、ECで観測した超高エネルギーファミリー現象の解釈をめぐり、チャカルタヤ実験、パミール実験グループは多重発生の特異な現象が核相互作用の大きな変化を示すと主張し、それに対して富士山実験グループは 10^{15} eV領域において核相互作用にそれ以下の領域と大きな変化はなく、一次宇宙線の組成に変化があるのではないかと主張していた。観測効率が高いカンパラ山の日中共同研究において、チャカルタヤ、パミール実験が主張する特異現象が検出できるか、あるいは富士山実験の結果が検証できるか、という重要な物理的意義をもっていた。この問題の真の解決には、日中共同研究により、近い将来空気シャワー装置とECの連動により、それを検証したいと考えていた。

日中宇宙線共同研究の現地の活動は、1980年9月に湯田利典と太田周がチベット高原カンパラ山宇宙線基地に中国の研究者と協力してECを設置し、さらに将来の空気シャワー実験基地の探査のためヤンパーチン高原を訪ね視察調査したことに始まる。

以下に述べる日中共同研究カンパラ山EC実験、及びヤンパーチンAS γ 実験の経緯と内容・成果については、2016年に突然逝去された湯田利典氏が遺された多数の記録と論文をこの章末に揚げた。共同研究の日本側の実施責任者であった湯田利典氏の熱意と弛まぬ努力に深く感謝する。

Ⅲ-1. カンパラ山エマルジョン・チェンバー実験（太田周）

1980年8月15日～10月13日の間、湯田利典(8/15-10/3)と太田周(8/15-10/13)の2名が中国科学院高能物理研究所を訪問し、カンパラ山宇宙線観測基地において日中共同研究によりECを建設した。高能物理研究所においてカンパラ山EC実験の準備作業を行ったほか、山東大学、西蔵大学、重慶建築工程学院において講演、座談を行い、各大学の共同研究者と交流した。

北京到着の翌日16日に中国科学院高能物理研究所を訪ねた。まず、研究所の玄関で多数の所員の歓迎を受け、張文裕所長とカ一副所長、霍安祥宇宙線部主任から、歓迎の挨拶を受けた。当研究所を訪ねた日本からの研究者はわれわれが初めてであるという。1977年の

日本宇宙線訪中時には、高能物理研究所の所在と研究所の構えが未だ決まっていなかったため、物理研究所に仮住まいしていたからだ。その夜、研究所長と崔泰山中国科学院外事局幹部とによる歓迎会に出席、席上崔泰山氏から、日中科学技術混合委員会があり文部省の遠山敦子氏が訪中しており、宇宙線共同研究について宜しく、と挨拶があったとの報告を受けた。また、張文裕所長からこれまでの交流と三宅所長と合意している共同研究を進めたいとの発言があった。われわれは、EC共同研究の中国側の準備に感謝し、これまでの交流を大切に共同研究の成果を出すよう努力したいと述べた。

中国科学院高能物理研究所は、中国科学技術大学が安徽省に移転したため、その後地の6階建ての大きなビルを研究所として利用している。研究所には宇宙線物理部、高能物理部、理論物理部、事務部があり、福祉施設も含めて職員数約1500名の研究所である。北京市西郊玉泉路に位置し、先年開通した北京の東西を貫く長安路の地下鉄駅が歩いて5分の位置にあり、市中心部への交通の便はきわめて好い。宇宙線物理部には雲南省落雪山宇宙線観測所が附置されており、中国の宇宙線研究の中心を成している。宇宙線研究部の主任は、78年に日本に来られた霍安祥教授であり、研究部にはエマルジョン、空気シャワー、気球、X線、シミュレーション等の研究を行う1グループ数名の研究グループがあり、宇宙線部の研究者数は約50名である。

中国側のEC研究のホスト研究所は、科学院高能物理研究所であり、これに山東大学、鄭州大学、重慶建築工程学院、雲南大学、西藏大学が参加している。中国のEC研究体制はホスト研究所と各大学で担っており、各大学が地理的に離れているため電話連絡を駆使し、大きな研究会を年2～3回行うという。研究体制は、ほぼ日本と同じとみられる。

日本側は、東大宇宙線研究所を中心に弘前大学、宇都宮大学、埼玉大学、横浜国立大学、神奈川大学、相模工業大学、甲南大学が参加している。それぞれの大学は1人または2～3人程度の研究者であるが、研究計画や実験の実施について絶えず相談し共同研究を進めている。



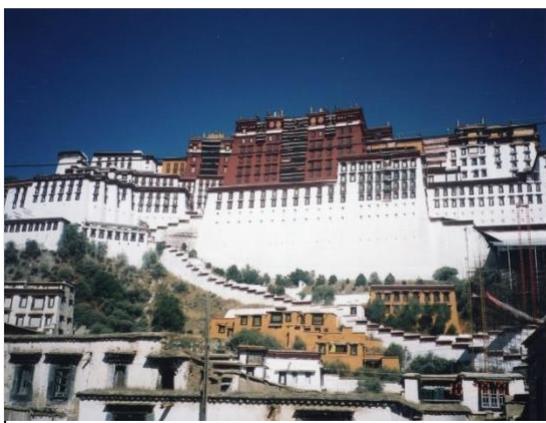
図.4.中国科学院高能物理研究所 バスケット・ボードや所員の通勤バスがのどかな研究所の雰囲気をはかせる。幹部所員は 20 km離れた学園都市中関村から通勤している。(1980年8月)



図.5.中国高能物理研究所宇宙線組および共同研究参加大学の研究者
前列左から、況浩杯、布紉（西藏大学）、丁林凱、王承瑞（山東大学）、霍安祥主任、湯田利典（ICRR）、陳映宣、劉中和（重慶建築工程学院）、袁余圭（右端）等

チベット情勢の混乱があったため出発が遅れ、北京から任敬儒さんと丁林凱さんとともに9月中旬になってようやく四川省成都に飛び、成都からソ連製の小型機で雪峰の高山と赤色の山肌をぬってチベット高原ラサ（拉薩）に入ることができた。北京から直線距離で2600 km、チベット自治区の主都ラサは北緯28度、海拔3600mにある。周辺を含めると人口30万以上というチベットの首都である。紺碧の天空に陽光輝く緑の街である。150年前に鎖国状態のチベットに潜入した僧侶川口慧海が著わした旅行記の世界の雰囲気は今も街に残っていた。到着後5日程は高地順応のため市内の滞在となり、中国科学院チベット自治区主任への挨拶のほかはラサ市近郊の見学となる。北京を発つ前には、今回のチベット入りに備えて、北京首都病院で健康診断を受けた。宿泊は外国人専用ホテル、食事は中洋折衷というべきか、腹八分目に留意、高地における安全に注意を怠らない。

ラサのシンボルは、ポタラ宮（布达拉宮）である。市の旧城の西はしにある岩山の尾根に鞍のようにまたがって建つダライ・ラマの住んだ宮殿だ。3800mの高原の陽光に輝くポタラ宮の黄金の天蓋を拝して人々がマニ車（お教車）を手に宮殿を周回する。旧市街の中心にあるジャポンス（哲邦寺）では遠い辺境の各地から巡礼してきた聖徒が門前でお教を唱えながら五体投地で祈っている。市内にはチベット自治区の役所や百貨店、病院などがあるが、まさにラサはチベット仏教の聖地である。



左図.6 チベットのシンボル ポタラ宮

右図.7. 左から、丁林凱、湯田利典、チベット科学院主任ザシ・ロブ、任敬儒の各氏

カンパラ山ECの建設

カンパラ山へは、主都ラサ市から西南に約150 km、まだ明けきらぬ暁のラサの街を後に、ランド・クルーザーに揺られて3時間、川幅100mの滔々と流れるヤルンツァンポ川（ベンガル湾に注ぐブラマプトラ川の上流）を渡って、チベット山脈の山麓をたどる。やがて、背の低い棘のある灌木が山肌を覆う九十九折の山道を長々と登り、荒涼とした山稜をたどると突然天空に開けたカンパラ峠（4200m）に着く。石積みのオオゴ（祠）に色とりどりのタル

チョ（小旗）がチベット山脈に連なる雪嶺を背に風に揺れる。ラサからチベット第二の都市シガツェを経てチベット仏教の聖地カイラス山に巡礼する聖徒の道だ。聖徒の祈りがそこにある。カンパラ山頂へは、そこで脇道に逸れて眼下に陽光に輝く羊卓雍湖（ヤムズユンホ、中国の3県におよぶ広さと、鱗のない魚類が生息するという、60mの透明度を誇る湖）を見ながら登る。

5400mの山頂は、紺碧の天空に吸い込まれるような空の下にあり、眩しくて、陽光に目を向けることができない。空気が薄い（平地の約半分）こともあるだろう。最初に目にしたのは、中国側がカンパラ山上に設置した約 1000 m²、厚さ 20 cmの屋外露出用のコンクリート製の白いプラットフォームである。コンクリート平台の広さと頑丈さに驚かされた。5400mの高山における平台工事の難しさは想像に余りあるものであったであろう。目を転ずれば、美しいヤムズユンホの上方に、はるかにチベット山脈の霊峰が連なる。北京からのわれわれ4人は、息を整えて作業に取り掛かる。高地になれたチベットの頑強な現地の人々に協力してもらいECを建設する。ECで捉えられる高エネルギーのファミリーは、大気中に突入する高エネルギー宇宙線が大気中の原子核との衝突により発生する主にガンマ線およびハドロン成分からなる。ガンマ線成分はその平均自由行程が短い（約 1c.u.：鉛 0.5 cm、鉄 1.8 cm）が、ハドロン成分のそれは鉛中で約 30c.u.、鉄中で約 10c.u.である。そのため、カンパラ山のEC実験は、高エネルギーのガンマ線ファミリーの観測には比較的薄型の鉛ECを大面積に設置し観測効率を上げ、ハドロン成分を効率よく観測するために鉄チェンバーを設置することを方針とした。



図.8 カンパラ山（標高 5500m）のコンクリート平台と1980年に露出した最初のEC
背景の湖はカンパラ山を取り囲むヤムズ湖（4400m）。約 500 トンの鉛板と鉄板が北京から列車とトラックによりここまで運送された。

1980年に露出した最初のECは、1000 m²の屋外露出用のコンクリート製のプラットホーム平台上の鉄箱の中と建屋内に合わせて15 m²の小規模な鉛ECを設置した。日本の原子核乾板FUJIE T7Aと工業用X線フィルム小西六N型、及び中国側のX線フィルム天津Ⅲ型及び上海5F型をパッキング整包した感光材料を使用した。これらの感光材料のパッキングと露出用の鉄箱の準備を北京で中国の研究者と行い、EC技術の打合せを綿密に行なってカンバラ山への取組に備えた。最初のECの露出は予算の制限もあり15 m²の小面積であったが、屋内と屋外鉄箱に分けて露出した。

コンクリート平台上の屋外ECは厚さ3mm、縦1m30cm、横90cmの鉄箱に断熱材としてスチロールで保護して、1年間の露出による感光材料の劣化を調べることにした。1年後の1981年8月に回収した感光材料を北京の高能物理所の暗室で現像し、詳しく調べた結果、プラットホーム上の鉄箱の感光材料の劣化は認められず、81年からは屋外露出を本格ルーチン化することが可能となり、ECの露出面積を拡大することができた。

チベットへの物資の運送は困難を極めた。まず北京から鉄道で→600 km、鄭州→900 km、蘭州からトラックで→海拔5200mの西藏公路の難所タングラ(唐古拉)峠を越えて→900 km、ゴルムド(格爾木)→さらに1000 km、終着地カンバラ山に到着、総輸送距離3500 km。冬季はタングラ峠が氷結し封鎖という悪条件で、重量級の鉄板、鉛板の輸送にはトラックが1往復で廃車となることもあり、また輸送時間も数ヶ月を要することもあったと聞いた。このような困難極まる共同研究の実施となったが、中国側の強い熱意と努力に支えられ10年間EC実験を継続することができた。



図.9 プラット・ホーム上のECの建設

強烈な太陽光と薄い空気に目が回る



図.10 高能研に設置した自動光電濃度測定装置

計算機は当時最先端の8ビットマイコン、フォートラン77で稼働

高能研の地下暗室には、各年に露出する感光材料のパッキング包装、デパッキング、現像処理を行うため現像薬品の保管、フィルム・ハンガーの作製、現像・水洗タンクの整備等を行った。これらの用具の作製は、高能研の工作室が手際よく進めてくれた。また、ECの解析には、光学顕微鏡と光電濃度測定装置（フォトメーター）が不可欠であるが、顕微鏡はドゥブナの加速器照射乾板の解析に使ったツアイスの顕微鏡があり、シャワーの電子線トラックのカウントに技術上の問題はなかった。フィルム上に核相互作用によって作るシャワーファミリーと呼ばれる一黒化点の測定に必要なフォトメータは、ソ連製の旧式なものでは役立たず、三鷹光機に開発してもらった座標と黒化度が同時に測定できる光電濃度測定装置を日本から持ち込んで活用した。

カンバラ山のEC実験は、79年に締結された日中文化交流協定に基づく文科省の「国際共同研究」第1号に認定され、81年から5ヶ年の特別事業として採択される幸運に恵まれ、比較的スムーズに実験規模を拡大することができた。1980年から1989年までのカンバラ山ECの露出データを表2に示す。現像済みのフィルムは日本と中国が等分に配分し、さらに両国の各大学の共同研究者が分担して解析を進め、その結果の集積と研究結果の取りまとめ、及び論文作成のための意見交換を研究者の相互の訪日・訪中により綿密に行った。

ファミリーデータの解析には、特に笠原克昌氏が中心となって富士山EC実験当時から精力的に作成した本格的な大気中の宇宙線伝播のシミュレーションが大きな役割を果たした。データの解析に避けられないミスへの混入を避け、客観的なデータの解釈を可能にした。またこの宇宙線伝播の計算機シミュレーションコードは、後にヤンパーチンAS γ 実験、その他の宇宙線実験に広く有効に活用された。2020年6月その功労に対して、笠原克昌氏はCRC（宇宙線研究者会議）から第3回宇宙線物理学功労賞を授賞された。授賞理由は、「宇宙線粒子カスケード現象の計算機シミュレーションコード開発に、その草創期から現在まで一貫してとり組み、数多くの宇宙線測定装置の設計や性能向上に、また信頼度の高いデータ解析に、広く深い貢献を行ってきた功績に対して」とされている。

Ⅲ-2. ヤンパーチン（羊八井）高原の調査

カンパラ山のEC建設を無事終了した1980年9月28日、湯田、太田の2名は、チベット滞在の最後の日に、任敬儒氏の案内でヤンパーチン（羊八井）高原を視察調査した。ヤンパーチンは、ラサ西北方約70km、ランド・クルーザーで約1時間半の距離にある高度4300mの高原である。遠く南方にチベット山脈の雪峰、北方にニンチェンタングラ（念青唐古拉）峰を仰ぐ広大な平原である。その広さは、40平方kmとも100平方kmともいう。ただ、黒いYak(ヤク・チベットの野牛)がのんびり草を食む長閑な高原の風景であり、地域の役所と簡易的な宿泊所の他は建屋もない。9月末の高原の日中の気温は20度を超え、平原の一郭には温泉の湯煙が立ちあがっており、地熱発電所が稼働している。発電所はフランスと日本の援助で稼働しているとのことで、1基が稼働中で、出力1000kWの試験発電であるが、間もなく3基を稼働し、6000kWに出力を上げ地区の電力提供を予定しているという。将来は数十MWに強化する予定という。ただし、温水は130℃以上で、フッ素泉で飲むことはできないが、平原の西方には天然の湖が多数あり、飲料水の確保には問題ないという。気候の面では、冬季は北からの強風があるが降雪はほとんどないという。

高エネルギー宇宙線の起源と組成、加速の問題を総合的に探究するためには、時間分解能をもったAS測定機器の配置・稼働が必要であり、電力の確保が不可欠である。ヤンパーチンは、電力の確保が可能な点と主都ラサの近郷にあることから、この広大なチベット高原において極めて有利な条件を備えているものと判断した。この調査の結果ヤンパーチン平原は、カンパラ山EC実験の次のAS実験基地の重要な候補地と確認してチベットを後にした。

今では、北京から青海省の西寧を経てラサに通ずる鉄道が運行され、ヤンパーチン宇宙線基地の重要性は世界の研究者から注目されており、ASの日中共同研究と中伊共同研究ARGO-YBJがおこなわれ、またESTOPが話題となった。

Ⅲ-3. カンパラ山エマルジョン・チェンバーの実験結果

Ⅲ-3-1) 研究成果の概要

1980年から1989年の10年間にわたり中国チベット自治区カンパラ山宇宙線観測基地(5400m)に面積1038.0m²・yearsのエマルジョン・チェンバーECを日本と中国との共同で設置し、10¹⁵~10¹⁷eVの一次宇宙線が大気中で起こす核相互作用を観測した。これら高エネルギー宇宙線現象の大気中での振舞いから、このエネルギー領域での核相互作用の変化の様相および一次宇宙線の組成、エネルギー・スペクトルを調べることを目的とした。

表2 カンパラ山に露出したエマルジョンチェンバーEC

チェンバー名	露出期間	面積(m ²)	物質名	深さ(c.u.)
K0	'80.9-81.9	3.7	Pb	14
		11.0	Fe	30
K1	'81.9-82.9	1.0	Pb	14
		49.0	Fe	28
K2	'82.9-84.5	143.0	Pb	14
		39.1	Fe	29
K3	'83.5-84.5	6.3	Pb	14
		31.1	Fe	29
K4	'84.5-85.5	85.0	Pb	14
		58.0	Fe	29
K5	'85.5-86.4	84.8	Pb	14
		58.4	Fe	29
K6	'86.5-87.4	5.4	Pb	20
		68.0	Pb	30
		58.4	Fe	29
K7	'87.5-88.4	71.4	Pb	30
		58.0	Fe	29
K8	'88.5-89.4	71.4	Pb	30
		58.0	Fe	29
	露出面積・期間	*1038.0 (961.0)	—	—

*露出期間による補正を行った。

1986年と1987年の実験のルーチンを例に上げると、1987年度は86年5月に設置したエマルジョンチェンバーK6(面積58.4m²、厚さ29c.u.の鉄EC、および面積68m²、厚さ30c.u.の鉛EC)を4月に解体し、その跡に厚さ29c.u.、面積58m²の鉄EC、および厚さ30c.u.、面積71.4m²の鉛ECのエマルジョンチェンバーK7を設置した。(このK7ECの解体作業は88年4月に行った。) 解体したK6ECの露出感光材は北京の高エネルギー物理研究所で現像処理を行い、フィルムに捉えられた核相互作用(ファミリー現象)の解析を進めた。このK6ECでエネルギー1000TeVを超えるファミリー現象を3例観測した。また約400TeVの2芯コア現象、および100TeV程度のハドロン3本からなるファミリー現象も観測された。このような実験を各年遂行して、データの集積を図った。

87年までのカンパラ山実験で200TeV以上のファミリー現象を約100例観測することができた。これらの結果を4編の総合報告として纏め、国際学術雑誌に発表した。エマルジョンチェンバーEC実験では、多数のファミリー現象のほかにファミリーを形成しない単独

の高エネルギーガンマ線やハドロンも数多く観測される。後者は大気中の伝播において大気との衝突後電磁シャワーとならずに単独で生き残り EC に到達した成分である。EC で観測されるファミリーのエネルギーはおおよそ 100TeV 以上であり、これらのファミリーを作る親の宇宙線の平均エネルギーは陽子の場合 $(3\sim 5)\times 10^{15}\text{eV}$ である。

この実験で得られたデータの解析は、最新の加速器による実験結果および量子色力学 (QCD) の効果等を取り入れたシミュレーション計算の結果と比較検討することにより、 $10^{14}\text{-}10^{16}\text{eV}$ 領域の一次宇宙線と $10^{15}\text{-}10^{16}\text{eV}$ 領域の核相互作用について、次の課題について検討した。

- ① 10^{16}eV 領域での核相互作用の大局的様相と “knee” 近辺での一次宇宙線のスペクトルをファミリーデータとシミュレーション計算の結果と比較して調べた。
- ② ファミリー中のガンマ線エネルギースペクトルと横拡がり等から高エネルギー領域での多重度と横向き運動量の変化を調べた。
- ③ 2 芯コアファミリー現象から大 Pt 現象について調べた。
- ④ ファミリー中のハドロン成分から特異現象の存在等の検証を行った。
- ⑤ スーパーファミリーの観測から 10^{16}eV を超えるエネルギー領域の宇宙線の組成を探った。

これらについて実験データの解析から得られた主な結果は以下のようなものである。

- 1) 一次宇宙線については、ファミリーの頻度と広がりからの分析から、一次宇宙線に占める陽子の割合は 10^{14}eV 近辺から徐々に減少し 10^{15}eV では $15\%\sim 20\%$ 程度と予測することができた。
- 2) 核破砕領域でのファイマンのスケーリング則の大きな破れは認められない。
- 3) 核相互作用断面積は 10^{16}eV 領域までエネルギーの約 0.06 乗に比例して増大している。
- 4) 発生する二次粒子の横向き運動量の大きさは緩やかに 10^{16}eV 領域で約 $500\sim 550\text{MeV}/c$ に増大する。

これらの宇宙線核相互作用の大局的な様相は、1980年代後半になって巨大加速器が得た核相互作用データの結果と矛盾がなく宇宙線による先験的成果が確認された。この他にファミリーの2芯構造などの特異現象と思われる数例のイベントについては、その頻度は小さく (2%以下) 揺動の範囲と看做され、この結論を変えるものではなかった。また、チャカルタヤ EC 実験で観測されたハドロン様ファミリー: センタウロ・イベントは、CERN の大型加速器実験で探索が行われ、ネガティブな結果が出たが、カンパラ山 EC 実験においてもそれまでにセンタウロ様の特異現象は観測されていない。ただ、最近チャカルタヤ EC 実験グループ内の重要メンバーから 1972 年来の宇宙線実験の課題であるセンタウロ・イベントの解釈/解析への変更意見が出されている。

Ⅲ-3-2) 共同研究の評価

中国側では、日中宇宙線共同研究をどのように捉えていたのだろうか。

再び中国科学院邱華盛氏が日本の「学術月報」に寄せた「中国科学院と日本の科学技術交流20周年」(1993年)及び「中国科学院と日本の科学技術共同研究三十年」(中国科学院刊 2002年 第4期)の記述に見てみよう。

『中国科学院と日本との交流の全般的な状況は、1978年まで民間交流、視察といった形のもの比較的多く、共同研究はわずか1件しかなかったが、1978年の日中平和友好条約締結を受けて、日中文化協定と日中科学技術協力協定などが政府間で調印され、両国は相次いで人的、財政的に民間団体では担えない大規模な共同研究が可能となった。

1980年、中国高エネルギー物理研究所(高能物理研究所)と東京大学宇宙線研究所などは「宇宙線協力」という中日文化協力プロジェクトを推進した。中国チベットの標高5500メートルのガンバラ(甘巴拉)山上に世界最高の高山エマルジョン室(EC)を建設し、超高エネルギー物理実験を行い、素粒子の構造と高エネルギー粒子の相互作用の法則を探究した。10年にわたった協力を通じて、双方は宇宙観測の研究を推進しただけでなく、高エネルギーの分野でも新しい発見があった。このエマルジョン室が挙げた高多重数双環事例などのような重大な成果には、国際高エネルギー研究学界の広汎な注目を集めた。双方の科学者は数回の国際宇宙線学術会議に、合計40数編のレベルの高い論文を提出した。1985年、北京でエマルジョン室の実験をめぐる国際シンポジウムが開催された。会議において、上記の共同研究で遂行した多くの重要な成果が報告された。1986年、エマルジョン室の超高エネルギー研究室は中国科学院の科学技術進歩一等賞を受章した。』と記述している。

さらに、邱華盛氏は2002年、中国科学院の院刊誌にヤンパーチンAS実験の成果に触れて、『1990年、両国は、中国チベットの羊八井(Yangbajing、海拔4,300メートル)に宇宙線地上観測基地を建設しました。1994年までに、約150,000の宇宙線事象が取得され、国際的に注目される物理的結果が得られました。同時に、第2期の実験装置の建設が開始されました。1996年末に完成した後、データ収集が開始され、Mrk501からの10TeV信号を観測しました。これは世界で初めての空気シャワー観測装置によるガンマ線源の観測です。』と成果を報告している。

Ⅲ-3-3) 将来計画・宇宙線の起源と組成

89年度以降の研究計画については、数年来、日中双方の研究者間で議論されてきた。その背景には、83年にドイツのキールグループより白鳥座X-3から超高エネルギーガンマ線を検出したという宇宙線の起源にとって刺激的な発表があり、また、87年2月に、日本のカミオカンデによるニュートリノ束の観測による超新星1987Aの爆発の発見があり、世界の宇宙線研究は高エネルギーガンマ線の観測に集中する状況にあった。日本の理論・高エネルギー・宇宙線研究者が協力してニュージーランド大学との共同研究によりJANZ

OS実験を実施し、また、アデレード大学との共同研究によりCANGAROO実験がオーストラリアで開始された。超新星1987Aからのニュートリノの観測により、小柴昌俊氏がノーベル物理学賞を受章され、宇宙線研究所はニュートリノ物理学のセンターとして新たな活動を開始した。

このようななか、スイスの欧州連合原子核研究機関 (CERN) の大型加速器 LHC 及び米国フェルミ研究所 (Fermilab) の大型加速器 (Tevatron) が素粒子相互作用の新たな姿を次々と提示することとなり、カンパラ山の核相互作用に視点を置いた passive な EC 実験を中止し、今後は $10^{15}\sim 10^{16}\text{eV}$ 領域の一次宇宙線の組成とスペクトル、および宇宙天体からの高エネルギー・ガンマ線の観測が重要と考え、研究計画をさらに広げて推進することで日中双方の意見の一致をみた。そのためには $10^{15}\sim 10^{16}\text{eV}$ 領域の AS のシャワー粒子数の最大到達点に対応するチベット・ヤンパーチン高度 (4300m) が最適であるとの結論に達した。

この計画の実現は、1989年ヤンパーチン AS γ 実験が日中双方の協力により開始され、宇宙線国際学会に重要な物理的な成果を提示して行くこととなった。中国が1994年 "International Symposium on Cosmic Ray Physics in Tibet" を Lhasa で開催したのも Tibet の日中共同研究の成果を踏まえてである。

参考文献：

シミュレーション論文、実験計画：

A Monte Carlo approach to QCD jet simulation in $10^{12}\sim 10^{17}$ eV hadron collisions, 18th ICRC, Bangalore, Vol. 5, p483 and ICRR-Report 107-83-1 (1983)

QCD jet effect on gamma-ray families,

Proc. of International Symposium on Cosmic Rays and Particle Physics, Tokyo, 1984, (Institute for Cosmic Ray Research, Univ. of Tokyo) p87.

Brief Description of Future Plan in Tibet

Proc. Intern. Sympo. on Cosmic Ray Superhigh Energy Interactions, Beijing China, 1986.

カンパラ山 EC 日中共同研究の論文等：

Primary Cosmic-Ray Composition in the Energy Range of 10^{14}eV to 10^{16}eV and High-Energy Atmospheric Cosmic Rays Observed with Emulsion Chambers at Mt. Kanbala

Nuovo Cimento Vol.10C No.1, 1987 (pp.43-60)

Hadronic interactions and primary-cosmic-ray composition at energies around $10^{15}\sim 10^{16}\text{eV}$ derived from the analysis of high-energy gamma families. Phys. Rev. D Vol.38, No.5, 1988 (pp.1404-1416)

Properties of hadron families observed with thick-type emulsion chambers at Mt. Kanbala and Fuji and search for Centauro events Phys. Rev. D Vol.38, No.5, 1988 (pp.1417-1425)

Primary-cosmic-ray protons above 10^{15}eV derived from the observation of super-high-energy halo events Phys. Rev. D Vol.38, No.5, 1988 (pp.1426-1432)

Exotic models are no longer required to explain the Centauro events. Phys. Rev. D. 73 (8): 082001, Kopenkin, V.; Fujimoto, Y. (2006).

Proceedings of the First International Symposium on Cosmic Ray Physics in Tibet, 12 - 17, August 1994 Lhasa, China

<https://inspirehep.net/files/045329c552081d6d988b0687697cdb06>

記録・解説に関する文献：

湯田利典 日中共同研究 東京大学宇宙線研究所 1988年11月

—チベット高原に於ける超高エネルギー宇宙線の研究—過去・現在・未来

湯田利典 研究紹介「中国と20年」ICRR ニュース No. 40 2000/04/28 p4-12

湯田利典 解説「チベットにおける高エネルギー宇宙線の研究」—日中共同研究—
日本物理学会誌 Vol. 57, No. 7, 2002 p483-491
邱華盛 「中国科学院と日本の科学技術交流 20 周年」学術月報 Vol.46 No.1, 11-15
〃 「中国科学院と日本の科学技術共同研究三十年」中国科学院 院刊 2002 年 第 4 期
太田 周「チベット高原における宇宙線観測」(カンパラ山EC実験の懐古録)
名古屋大学太陽地球環境研究所(STE研) ニュースレター、2003, No. 35
湯田利典 「チベットにおける高エネルギー天体現象の観測
—四半世紀を超える日中共同研究— Science Portal China 日中の人材・機関・連携
2009年1月5日
中村健蔵 「世界の加速器科学」学術月報 Vol. 50 No. 10 993-998
西村 純 特集「宇宙線100周年」「わが国における宇宙線研究の始まり」
日本物理学会誌 Vol. 67, No. 12, 2012 816-821
荒船次郎、梶田隆章 特集「宇宙線100周年」「宇宙線研究所が果たしてきた役割」
日本物理学会誌 Vol. 67, No. 12, 2012 860-86

Ⅲ－４．ヤンパーチン Tibet AS γ 実験 I

—宇宙線スペクトルと化学組成—

横浜国立大学名誉教授 柴田 慎雄

<カンバラ山エマルジョン・チェンバー実験以後>

背景

エマルジョンチェンバー (EC) 実験の主目的は加速器を上回る超高エネルギー領域の宇宙線が大気中で起こす相互作用を観測して新たな知見を得ることであった。カンバラ山での EC によるガンマファミリー観測はおよそ 100~数 1000 TeV 領域の中間子多重発生の特徴を捉える目的で行われ、その頻度が当時信じられていた陽子を主成分とする宇宙線化学組成および加速器データが示す強い相互作用の描像を仮定したモンテカルロシミュレーションから期待されるより約 3 倍も低いことを示した。この結果は宇宙線の化学組成の変化か、強い相互作用の変化のどちらか (または両方) によって説明できる。宇宙線の化学組成については飛翔体による直接観測が数 10 TeV 以下に限定され、それより高エネルギー側は確定しておらず低エネルギー側からの単純な外挿で議論されるのが一般的であった。EC によるガンマファミリー観測では発生する大気深度が観測点に近いものを効率的に捕えるため、一次陽子やヘリウムなど軽核に対して感度が高い (一次線が重い原子核の場合は衝突断面積が大きいので大気上空で相互作用が始まり、2 次粒子は減衰・拡散して到達するため観測効率が低い)。したがって、ガンマファミリーの頻度が小さいことは陽子、ヘリウムなど軽核成分の割合が高エネルギー側で減少しているとすれば説明できる。一方、強い相互作用については 1970 年代に CERN ISR が重心系エネルギー 60 GeV (実験室系相当エネルギー 1.8 TeV) で稼働し、中間子多重発生に関するスケーリング則を明らかにした。その描像が更に高エネルギーまで続くのかまたは新たな現象が現れスケーリング則は破れるのかということが盛んに議論された。

1980 年代の加速器エネルギーは CERN SPS の重心系エネルギー 540 GeV (実験室系相当エネルギー 150 TeV) に上昇し、重心系の中心領域で起きる大 PT 現象 (QCD ジェット) に伴うスケーリング則の破れが注目されたが宇宙線観測に最も寄与の大きな重心系最前方領域は測定の大困難を伴うため 1980 年代には不明瞭であった。その後、加速器のビームパイプに近接した領域を測定する CERN-SPS-UA7 実験 (PLB 242, 1990, 531-535) により最前方スケーリングの強い破れは否定され、カンバラ実験の結果は一次線化学組成の変化を強く示唆するものとなった。

日中共同研究は研究の幅を広げるために空気シャワーアレイを設置して一次線の情報を加え、宇宙線の起源 (宇宙線源天体の探索、異方性)、化学組成 (Knee の解明、加速、伝播)、太陽圏磁場 (太陽による宇宙線遮蔽効果の観測) などのテーマを含む観測を行うこととなった。空気シャワーアレイの設計は、一次線エネルギーが 10 TeV 以上のシャワーの到来方向を 1 度以内の分解能で決定することを目指した。これは空気シャワーの到来方向分布の中に宇宙線源天体から直進して来るガンマ線による頻度過剰を見出すことを可能にす

る。

<Tibet AS γ Collaboration>

カンパラ山での EC 実験終了後は新たなメンバーも加わり実験場所を電源等のインフラを備えた標高 4300m のチベット羊八井 (Yangbajing) に移し、Tibet AS γ Collaboration がスタートした。1990 年には 65 台のプラスチック・シンチレーション・カウンターから成る空気シャワーアレイ (Tibet-I アレイ) が完成し観測を開始した。それぞれの検出器は、プラスチック・シンチレーターと光電子増倍管により宇宙線が発する電気信号を中央の制御室に送り、信号をデジタル化して記録する。

その後アレイの改良と拡張を行い、チベット空気シャワー観測装置は、面積 0.5 m² の地表粒子検出器 789 台を約 65000m² に展開し、さらにアレイ中心部に地下ミューオン観測装置 MD を設置し、超高エネルギー宇宙線・宇宙ガンマ線を連続的に観測している。

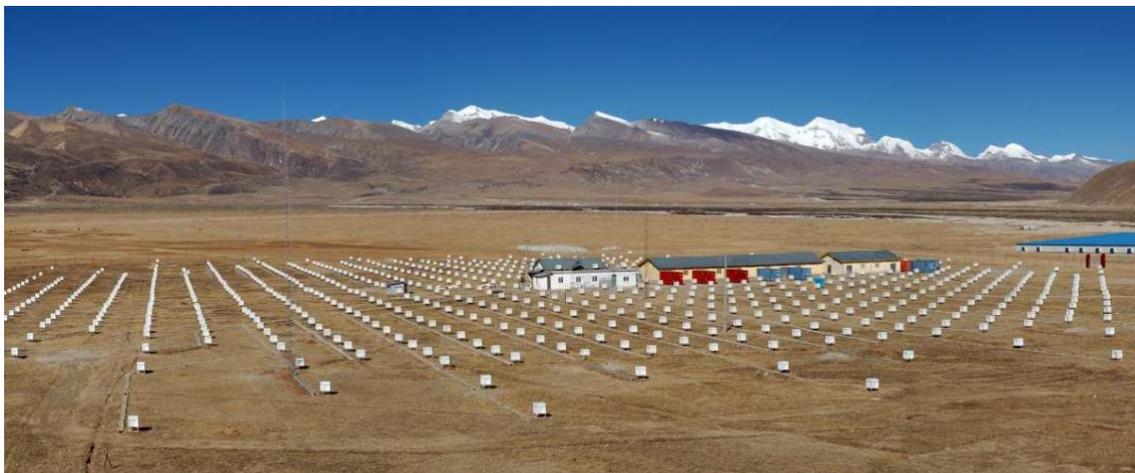


図.11. Tibet AS γ Collaboration AS Array, 中心部地下にミューオン観測装置 MD を設置している (2019 年)

Ⅲ-4 において、全粒子エネルギースペクトルと化学組成研究について、次章のⅢ-5 において、超高エネルギー宇宙ガンマ線観測について述べることにする。

Ⅲ-4-1) 全粒子エネルギースペクトル

空気シャワー観測の利点 (Ⅲ-3-3 参照) により Tibet-I アレイはエネルギー決定精度に優れ、得られた全粒子エネルギースペクトルは PeV 領域の折れ曲がり (Knee) を従来にない精度で明瞭に示した。

文献

“THE COSMIC-RAY ENERGY SPECTRUM BETWEEN 10^{14.5} AND 10^{16.3} eV COVERING THE KNEE”

Astrophysical Journal, 461, 408-414 (1996)

その後、チベットアレイは徐々に増強され、Tibet-II, Tibet-III アレイへと拡張された。Tibet-III アレイは 789 台のプラスチック・シンチレーション・カウンターから成り、観測エネルギー領域が広がり、エネルギー決定精度も向上した。また計算機の進歩に伴いデータ解析に必要とされるシミュレーションが詳細に行えるようになって、宇宙線組成と相互作用モデルの不確定さがもたらす系統的誤差を明示できるようになった。Tibet-III で得られた全粒子エネルギースペクトルは 4 PeV 付近に鋭い折れ曲がりを示し、宇宙線の起源および加速機構の研究にとって重要な手掛かりを与え、現在までも多くの論文に引用されている。

文献

“The all-particle spectrum of primary cosmic rays in the wide energy range from 10^{14} to 10^{17} eV observed with the Tibet-III air-shower array”,
Astrophysical Journal, 678, 1165-1179, (2008)

Ⅲ-4-2) 宇宙線化学組成 (AS+EC 連動実験)

カンバラ実験の結果から 100TeV 以上の一次線化学組成の変化が示唆された。EC を用いて空気シャワーコア部に生成されるガンマファミリーを観測することが一次線の核種に対する感度を有することを利用して Yangbajing では空気シャワーアレイ (AS) と EC の連動により陽子、ヘリウムスペクトルの測定を目指すことになった。EC は入射した TeV 以上の電磁成分が鉛板を通過してカスケードシャワーに発達する過程の正確な位置とシャワーの発達状態を鉛板と交互に挿入された数枚の X 線フィルム上に記録するがいつ到来したものかという時間情報を欠く。ガンマファミリーと AS との対応のために EC の下にすり抜けてきたシャワー粒子を検出するためのプラスチックシンチレータとその 4 隅に取り付けられたフォトダイオードから成るバースト検出器 (BD) を置き時間情報と検出器内の位置情報を得られるようにした AS コア検出器を開発した。



図.12.連動実験用のチェンバーの建設

EC では複数枚のフィルムからシャワー発達の空間再構成ができ到来方向がわかるので、EC-BD-AS の連携から時間、入射位置と方向の3つの情報からガンマファミリーと AS との対応は一意的に決まる。AS コア検出器の総面積は 80 m²であり、100 台のユニットから成る。1 ユニットは 160cm×50cm のサイズで底部に置かれたバースト検出器とその上に置かれた4ブロックの EC から成り、それぞれの EC は面積 40cm×50cm、厚さ 7cm であり、X 線フィルムは鉛板の深さ 2cm~7cm に 1cm ごとに 6 層挿入されている(都合、計 400 ブロックの EC)。最初の連動実験は 1996 年から 1998 年の 3 年間行われ、X 線フィルムは 1 年ごとに交換された。使用された X 線フィルムは 7200 枚に及ぶ。

BD 解析

X 線フィルムの解析は手作業でおこなわれるため大量のフィルムの解析に長い時間を要する。そのため EC の下に置かれたバースト検出器の解析によって初期のデータ解析が行われ AS コア観測による最初の陽子とヘリウムのエネルギースペクトルが求められた。

文献

“Measurement of air shower cores to study the cosmic ray composition in the knee energy region”

Phys. Rev. D, Vol.62, 072007,1-12 (2000)

“Primary proton spectrum between 200 TeV and 1000 TeV observed with the Tibet burst detector and air shower array”

Phys. Rev. D, Vol 62, 112002,1-13 (2000)

X 線フィルム自動解析

大量の X 線フィルム解析のためにフィルム画像をスキャナーでコンピュータに取り込み画像処理によりガンマファミリーを自動検出し、位置座標、到来方向、各カスケードシャワーのエネルギー決定までを行うシステムが開発された。

文献

“Automatic analysis of the emulsion chamber using the image scanner applied to the Tibet hybrid experiment”

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 523, 193-205 (2004)

AS+EC 連動実験結果

X 線フィルムの自動解析により入射一次エネルギー400TeV 以上のガンマファミリー177例が得られた。各イベントの親核種判別は Artificial Neural Network (ANN) を用いて行った。モンテカルロシミュレーションで多種の一次粒子について生成したイベントの空気

シャワーとガンマファミリーの特徴を表すいくつかのパラメータを計算機で機械学習させた後、実験データに対して親核種を推定させる方法である。BD 解析による初期結果とも矛盾しない陽子スペクトルとヘリウムスペクトルがより広いエネルギー領域で得られた。陽子、ヘリウム共に Knee 領域でのスペクトルのべき指数の絶対値が低エネルギー側より大きくなり、Knee 付近での重原子核優勢な一次線化学組成を示している。

文献

“Are protons still dominant at the knee of the cosmic-ray energy spectrum?”

PHYSICS LETTERS B 632, 58-64 (2006)

課題 (KASCADE との論争)

ドイツの KASCADE グループが地表 AS 観測により電子—ミューオン相関の解析から一次線化学組成の結果を出しスペクトルの折れ曲がりについてはチベット連動実験と同様の結果であるが、陽子、ヘリウムのフラックス絶対強度についてはチベットよりも 2~3 倍高い値を報告して論争となっている。KASCADE の結果は相互作用モデルによる系統的誤差が大きく、チベットの結果はモデル差は小さいが統計が少ないことが指摘されている。

文献

“Primary proton spectrum around the knee observed by the Tibet air-shower experiment”

ADVANCES IN SPACE RESEARCH, 37, 1938-1943, (2006)

Ⅲ-4-3) YAC 検出器

上述のように EC 連動実験ではデータの統計を上げるのが難しい。X 線フィルムより検出閾値が低く、検出器のどこに落ちてもガンマファミリーのエネルギーが正しく測れるように BD を改良して (uniformity の確保) EC 部分は X 線フィルムを取り除いた 3.5cm 厚の鉛板のみとした。これを YAC 検出器 (Yangbajing Air shower Core detector) と呼ぶ。Uniformity を確保するためにはプラスチックシンチレータに穴を空けて wave length shifting fiber を張り巡らせて集光したものを PMT につなぐという方式を採用した。このような AS コア検出器を AS アレイの中心部に高密度に配置することで大統計のコアイベントを得ることができる。4 台の試作機を Yangbajing の環境で動作テストし、北京の加速器ビームに当ててゲインのキャリブレーションも行った。

文献

“Calibration of the Yangbajing Air-shower Core detector using the test beam of BEPCII”, Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.), 175+176, 521-524, (2008)

YAC による連動実験 (YAC-I, YAC-II)

これらの準備研究を経て最初の連動テストランは 16 台の YAC 検出器を密着配置 (YAC-I)

して行なわれ、期待通りの結果が確認された。その後 YAC 検出器は 124 台に拡張されて (YAC-II) 中国科学院高能物理研究所が主導する形で進められている。

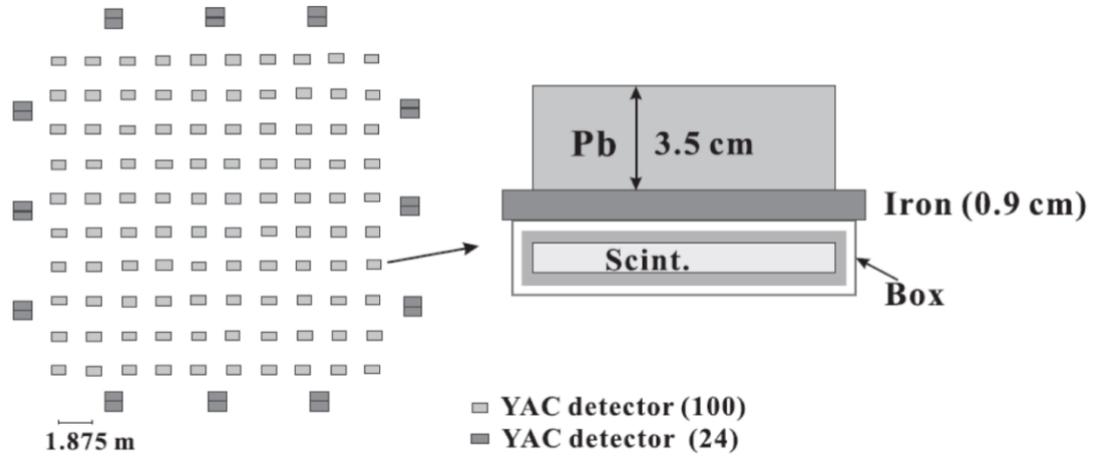


図.13. YAC (空気シャワーコア検出装置) 配置図 (左) と検出器断面図(右). 空気シャワー観測装置の中心付近に配置されている.



図.14. YAC(空気シャワーコア観測装置)全景. (地下ミュオン観測装置建設のために、周辺の空気シャワー観測装置の一部が撤去されている。)

文献

“Chemical Composition of Cosmic Rays around the Knee Observed by the Tibet Air-Shower-Core Detector”,

JPSJ, 78, Suppl. 206-209, (2009)

“Chemical composition and maximum energy of galactic cosmic rays”,

The Astrophysical Journal, 716, 1076-1083, (2010)

“Cosmic-ray energy spectrum around the knee observed with the Tibet air-shower experiment”, Astrophys, Space Sci, Trans., 7, 15-20, (2011)

“Cosmic-ray energy spectrum around the knee obtained by the Tibet experiment and future prospects”

Advances in Space research 47 (2011) 629-639

カンパラ山 ECC 実験&ヤンパーチン AS γ 実験 I への参加機関：

TAS γ の研究の日本側参加機関は弘前大学、宇都宮大学、埼玉大学、芝浦工業大学、都立航空高等専門学校、国立情報学研究所、東京大学宇宙線研究所、神奈川大学、横浜国立大学、湘南工科大学、名古屋大学太陽地球環境研究所、甲南大学、中国側は中国科学院高能物理研究所、山東大学、西南交通大学、雲南大学、西藏大学であり、双方の窓口は東京大学宇宙線研究所と中国科学院高能物理研究所である。(2002年3月現在)

この共同研究は1988年以来、日本側は文部省特別事業「国際共同研究」経費及び科学研究費補助金により行い、1999年度からは科学研究費特定領域研究B（研究領域名「チベットにおける高エネルギー宇宙線放射天体の研究」）の研究課題として行われた。

共同研究代表機関：

日本 東京大学宇宙線研究所

中国 中国科学院高能物理研究所

表 3. 日中共同研究カンパラ山 ECC&TibetAS γ 実験 (学術交流協定・年次計画等)

「文部省が推進している中国との学術交流について」 (学術月報 Vol. 49 No. 9 p9-11 (1996) 抜粋)	
1996年9月 学術月報 文部省学術国際局国際学術課 特集：中国との学術交流 1. 中国との学術交流の推進 2. 現在、中国との間で実施されている国際共同研究	
(1) 日中高エネルギー宇宙線共同研究計画	
① 研究機関 平成5年度('93)～平成9年度('97) (5年間)	
② 経緯	
昭和54年度 ('79)	中国科学院高能物理研究所長より、東京大学宇宙線研究所長に対して共同研究の正式な申し入れ (1976年宇宙線研究所設置 所長三宅三郎氏)
昭和55年度 ('80)	中国科学院と文部省の日中混合会議で、カンパラ山における共同実験の開始について合意がなされる。
昭和56年度 ('81)	カンパラ山における日中国際共同研究開始
昭和63年度 ('88)	カンパラ山における日中国際共同研究終了 中国科学院高能物理研究所長より、東京大学宇宙線研究所長に対してチベットにおける新たな日中共同研究の申し入れ (1987年宇宙線研究所 所長荒船次郎氏)
平成元年度 ('89)	予備実験の覚書の取り交わし
平成4年度 ('93)	共同研究継続のため5か年有効の覚書の取り交わし
平成5年度 ('94)	チベットにおける日中国際共同研究(平成5年度～9年度)開始
③ 共同研究の目的 この共同研究は、中国チベット自治区ヤンパーチン(標高4,300m、北緯30度)に高角度分解能を有する空気シャワー観測装置とエマルジョン・チェンバーの複合観測装置等の宇宙線観測装置を設置し、 $10^{13}\sim 10^{17}$ eV エネルギー領域での宇宙ガンマ線と一次宇宙線の組成及び未解決の最大の問題である超高エネルギー宇宙線の起源、加速、宇宙空間での伝播について総合的な研究を行うものである。	
④ 主たる研究課題 ○白鳥座 X-3, ヘラクレス X-1 など宇宙線源からの $10^{13}\sim 10^{14}$ eV 領域のガンマ線の探査と観測 ○ $10^{15}\sim 10^{17}$ eV 領域の一次宇宙線のエネルギー・スペクトルとグローバルな宇宙線組成の観測	
⑤ 共同研究の進め方 日本側は東京大学宇宙線研究所のほか、弘前大学(理学部)、宇都宮大学(教育学部)、埼玉大学(理学部)、横浜国立大学(教育学部)が参加しており、中国側の窓口は中国科学院高能物理研究所で、これに中国国内の雲南大学、西南交通大学、チベット大学が参加している。共同研究を進めるに当たっては相互尊重、平等互惠、緊密合作を原則とし、それぞれが分担協力して行うこととなっている。日本側は主として空気シャワー観測装置とバースト検出器の基本部分、装置の制御とデータ取得部分を担当し、中国側は実験場所及び実験室の確保、エマルジョン・チェンバー、検出器用架台の製作等を担当している。	
⑥ 共同研究の成果 この共同研究による成果は、宇宙線現象を説明する核相互作用の大局的様相は、少なくとも 10^{16} eV 領域までは加速器領域実験の延長と矛盾しないことが判明しており、また、最近の月及び太陽の方向から来る宇宙線の頻度の観測から、太陽の影に磁場の影響からくるズレがあることが観測されており、実験的にこれが観測されたのは、世界で初めてのことといわれている。	

III-5. ヤンパーチン Tibet AS γ 実験 II

—月と太陽の遮蔽影と 100 TeV ガンマ線の観測—

東京大学宇宙線研究所 大西宗博

はじめに

Tibet AS γ の実験で 1989 年の暮れに建設に行ったのは 大西、齋藤、日比野、梶野の甲南勢と笠原と中国側若手と記憶する。(図 III-5. 1. の写真が唯一当時の写真で日本勢が全員写っているもの。) ただし、笠原と梶野は現地地で 1 週間程度の滞在で帰国した。残る日中の若者が 1 月か 2 月頃まで滞在し、頑張って建設を完了し、無事観測を開始できた。本格稼働は少し遅れたと思うが、それから 1 年ほどで (1991 年半ばすぎ?)、月の影が見え出したと記憶するが正式論文として出版されたのは 1993 年のことだと記憶する。笠原は 1990 年には神奈川に移籍したので、新しい環境でデータ解析などやるどころではなく、その後も AS γ はお任せ状態でした。

甲南・神戸グループは 1980 年代から EC + AS の実験を乗鞍で行っていた。笠原は EC の実験をやっていてカンパラ山の EC 実験などにも参加していたが当時は核相互作用になにか面白いことはないかということが主目標だったが、これからはエレキを使った実験をやらないとだめだろうと AS での観測に目を向けモンテカルロ・シミュレーション (MC) などを始めていた。1983 年に Samorski and Stamm が Cyg X-3 から PeV 領域のガンマ線が到来しているという論文を出したことがこの業界に火をつけた (Cyg X-3 の話は結局確認されなかったが)。当時の AS での観測では到来方向の決定精度は 3~4 度がせいぜいというのが通説だったが、観測を高山でやれば 角度分解能は大きく改善されることを MC で示し、高山での観測を目指すことにした。1986 年の Proc. Intern. Sympo. on Cosmic Ray Superhigh Energy Interactions, Beijing, China では、甲南・神戸グループの AS + EC の結果やカンパラ山の EC の結果のほかに、カンパラ山実験の将来としてヤンパーチン (羊八井) での AS によるガンマ線の観測という計画が BRIEF DESCRIPTION OF OUR FUTURE PLAN IN TIBET として述べられている。たぶん、譚さん湯田さんが羊八井に視察に行ったのはこのころだろう。

1986 年に科研費により、乗鞍に小規模な AS アレーを展開し、羊八井での準備と並行して、実験と MC の予想との整合性などのチェックをおこなった。まとめの NIM に論文が出たのは 1990 年で、羊八井の建設はすでに始まっていたが、MC と観測の整合性から 数 10TeV 以上なら角度分解能は 1 度より良く成ることが明らかとなった。これを 1 年とたたずに Tibet AS γ 実験が実証できたのが世界初演の月の影の観測だった。

初期の準備段階では甲南大のエレキの才能にあふれた学生が大きな役割をした。エレキに疎い EC 研究者も当時はいろいろ勉強はした。乗鞍でテストをしているときに、重し用にシンチボックスの上に鉛板を載せて観測していたら、鉛版が無い時より格段に信号が増え、よいデータが取れることがわかった。その結果にびっくりしたが、これがその後 Tibet AS

γ のシンチボックスの上には 5 mm の鉛板を置くことになったきっかけで、5 mm はほぼ optimum な厚さだと上記 NIM では書いてある。

あとでわかったのは、このようなアイディアはほぼ同じ時期に Linsely ももっていた。

以上 笠原克昌氏の Tibet AS γ メモより



図Ⅲ-5.1. 最初の Tibet I 空気シャワー観測装置設置隊（日本側メンバー）。拉薩ポタラ宮前にて。左から笠原、チベット大学英文科女子学生（通訳）、扎西次仁（チベット大学数理系）、齋藤、日比野、大西、梶野。1989年12月撮影。

チベット AS γ 実験の研究目的は、大まかに、

- 1) 3 TeV - 1 PeV 領域の高エネルギーガンマ線放射天体の探索と観測
- 2) 太陽活動における“太陽の影”の時間変動を観測し、太陽及び太陽磁気圏の磁場の大局的構造についての新たな知見を得る
- 3) knee ($10^{15} - 10^{16}$ eV) を含む超高エネルギー領域での一次宇宙線のエネルギースペクトルと化学組成の研究
- 4) 宇宙線異方性の観測

である。超高エネルギー宇宙線のスペクトルと化学組成についてはⅢ-4 節ですでに述べたので、ここでは 1) 2) 4) について、その実験と結果の概要を述べる。

Ⅲ-5-1) 実験の構想、乗鞍観測所での実験、装置の建設 (1990年まで)

1980年頃から、日中共同研究は、カンパラ山 EC 実験の次の実験として、高エネルギー宇宙線の起源と組成、加速の問題を総合的に研究するために、EC と連動する空気シャワー観測装置をもつ新しい実験を検討していた。実験場所は、調査の結果、チベット自治区拉薩(ラサ)の北西約 80 km の距離にある標高 4,300 m の羊八井 (Yangbajing, ヤンパーチン) の広大な平原 (10 km × 20 km) が冬季も殆ど積雪がなく、地熱発電所から電力の供給が受けられる最適な場所であることが判明した。しかし、当時の文革後の中国の科学技術レベルを考えると、エレクトロニクスを使う大掛かりな宇宙線実験をすぐに始めることは容易でなく、スタートに向けて双方で準備が必要であった。

ちょうどその頃、1983年に、キール大学のグループが白鳥座 X-3 から 1 PeV を超える超高エネルギーのガンマ線を検出したと報告した (M. Samorski and W. Stamm, 1983)。加速源でエネルギーを得た宇宙線は銀河系内をさまよい、その一部が地球にやってくる。しかしながら、電荷を持つ宇宙線は銀河系内の磁場で進行方向を曲げられるため、地球でそれを観測したときには源の空間情報を失っている。一方、加速源でエネルギーを得た宇宙線の一部は、その近傍の物質と相互作用し、元の宇宙線の約 1/10 のエネルギーを持つガンマ線を生成する。そのガンマ線を地球で観測することにより、宇宙線加速源の情報を得ることができる。宇宙からのガンマ線の観測は宇宙線の起源に大きな知見をもたらすため、空気シャワー観測装置を持つ新しい実験の最初の目標は、EC との連動実験から超高エネルギーガンマ線観測に変更することとなった。日本側は乗鞍観測所で科研費による本格的な準備研究を開始し、中国側は観測用地の確保に努めた。

1986年秋到北京において超高エネルギー宇宙線相互作用に関する国際ワークショップが開催され、そこでチベットでの空気シャワー実験計画が具体的に議論され、予算の見通しがついたらすぐに日中共同研究として開始する合意がなされた。観測サイトは中国チベット自治区羊八井と正式に決定し、日本側が観測装置一式、中国側が観測所用地 (300 m × 300 m) と観測用建屋を用意することとなり、実験実施の覚書が東大宇宙線研究所と中国科学院高能物理研究所間で交わされた。

空気シャワー観測装置で宇宙ガンマ線を観測する場合、ガンマ線の数 100 倍以上の頻度でやってくる宇宙線が背景雑音となる。ガンマ線は、このほぼ一様にやってくる大量の宇宙線に重畳する形で事例の頻度超過として観測される。ガンマ線に対する装置の感度を上げるためには、まず、この大量の宇宙線を除去することが重要である。それには大きく 2 つの方法がある。一つ目は、空気シャワー観測装置の角度分解能を上げることである。角度分解能を上げると観測窓を小さくできるため、その面積に比例して背景宇宙線の頻度は下がるが、ガンマ線源が点源の場合にはガンマ線の頻度はほとんど変わらない。したがって、角度分解能に反比例して感度が向上する。二つ目は空気シャワー中のミュオン数を測定する方法である。ガンマ線が作る空気シャワーにはミュオンがほとんど含まれないが、宇宙線が作る空気シャワーにはミュオンが含まれている。空気シャワー観測装置にミュオン

検出器を付加し、ミューオン数の多い事例を排除することでガンマ線に対し感度を上げる手法である。我々はまずは一つ目の手法に挑戦した。二つ目の手法は2010年以降に使うこととなる。

空気シャワー観測装置では、地表に多数の粒子検出器を設置し、それぞれの検出器によって検出された粒子数と時間差を測定し、検出粒子数から元の宇宙線・ガンマ線のエネルギーを推定し、時間差から到来方向を決定する。当時の空気シャワー観測では到来方向の決定精度は3~4度がせいぜいというのが通説だったが、我々は1度以下の角度分解能を目指した。日本側は1986年に科研費により、乗鞍観測所に16台の0.25 m²シンチレーション検出器からなる小規模なプロトタイプ空気シャワー観測装置を設置し、実験の実現可能性、シミュレーションとの整合性などのチェックをおこなった。1度以下の角度分解能を得るためには、各検出器からの信号の相対時間については、おおよそ1 ns以下の時間分解能が要求される。我々はプロトタイプ空気シャワー観測装置でこれを実現するために、検出器に取り付けられた光電子増倍管からの信号の処理に、旧来の宇宙線観測で一般的に使われていた回路技術ではなく、当時最新の素粒子実験で使われていた回路技術を採用した。そして、新たに2つのキャリブレーション手法を開発した。一つ目は、ある時点での検出器間の相対時間差を精密に測定する手法で、「プローブ・キャリブレーション」と名付けた。検出器の上にプローブと呼ぶ小型のシンチレーション検出器を置き、粒子がプローブと検出器の両方を通過した際の、それぞれの信号の時間差を測定する。一つのプローブを順に持ち運んで、この測定を全ての検出器に対して実施することで、各検出器固有の相対時間差（時間特性）を得ることができる。二つ目は、このようにして得られた検出器の時間特性の経時変化を継続的にモニターする手法で、「レーザー・モニタリング・システム」と名付けた（M. Nishizawa *et al.*, 1989）。実験室に設置した窒素ガスレーザーから定期的に紫外線をシンチレータに照射し、発せられたシンチレーション光を光ファイバーで各検出器まで送り、検出器の光電子増倍管の受光面にあてる。その信号を測定することで、それぞれの検出器の時間特性の経時変化を±0.2 nsの精度で継続的にモニターすることができるようになった。これらの結果、乗鞍観測所でのプロトタイプ空気シャワー観測装置は、200 TeV ガンマ線由来の空気シャワーに対して0.8度の角度分解能を達成した（M. Amenomori *et al.*, 1990）。

その頃、実験の名称が Tibet AS γ （チベット・エイ・エス・ガンマ）実験と決定し、1988年に日本側で科研費が採択されたのを契機に、1989年夏の観測開始を目指して急ピッチで準備を進めた。日本側では65台のシンチレーション検出器からなる空気シャワー観測装置を準備し、現地では中国科学院高能物理研究所が中心となってインフラ関連の整備を進めた。

日本から実験資材を現地に輸送しようとしていた矢先の1989年春、チベット自治区の拉薩で大規模な暴動が発生し、政府は戒厳令を発令した。同時期、北京では民主化を求める大規模な抗議運動を中国人民解放軍が鎮圧した（六四天安門事件）。これらの影響をうけ、Tibet AS γ 実験も当初予定していた1989年夏の観測開始の予定を遅らせざるを得ない状況

となった。それでも、同年夏過ぎには日本から実験資材一式を送り出すことができ、同年 12 月には日本側から 5 名の研究者（東大宇宙線研から笠原、齋藤の 2 名、甲南大から梶野、日比野、大西の 3 名、ただし笠原と梶野は現地最初の 1 週間の滞在で帰国）が、戒厳令下の北京と拉薩を經由して羊八井へ行くことができた。日本側研究者のチベット自治区入域許可証の取得には中国側研究者の大変な苦勞があったと思われる。

日本側 5 名が 12 月中旬に羊八井に到着したときには、敷地を囲むフェンス、エレクトロニクスを収容する建屋（実験室、打ち合わせ室、管理人室）、検出器を設置する架台、検出器から建屋までのケーブルを通す溝などはすでに完成しており、電気と生活用水も使える状態になっていた。ただ、通信については、インターネットは当然のこと、電話回線もない状態で、中国国内との連絡については近くの郵電局を通して電報の送受信ができたが、日本との国際連絡は郵便に限られていた。この劣悪な通信事情は 1998 年まで続いた。日本から送った実験資材は、日本側 5 名が到着したとき、すでに一部が届いており、数日後に残りもすべて届いた。酷寒の中、中国側の研究者約 10 名と日本側の 5 名で装置を組み立て、1990 年 1 月 10 日には 49 台の検出器からなる空気シャワー観測装置（Tibet I）はとりあえず完成し、同日から試験的にデータ収集を開始した。現地には中国側が雇用した管理人 1 名が常駐した。

当時、空気シャワーによる宇宙線・ガンマ線の観測は 100 TeV 以上のエネルギー領域における観測が常識とされていたが、標高 4,300 m という地の利を活かして 10 TeV 領域から観測することとなった。ガンマ線は低エネルギーほど頻度が上がるため、検出が容易になるからである。しかし、それによりイベント頻度は空気シャワー観測装置では異例の毎秒 20 例となった。1 日あたりのデータ量は 500 MB にもなる。当時の日本の一般的なパソコン（NEC PC-9801 シリーズ）はハードディスク未搭載の状態で使用されることが多く、搭載されていても 20 MB から 40 MB 程度であり、普及が始まっていた UNIX ワークステーションでも搭載しているハードディスクは 100 MB から数 100 MB 程度が一般的だった。可搬型のメディアとしては、約 1 MB 容量のフロッピーディスク（FD）、数 10 MB 容量のカートリッジテープ、そしてオープンリールテープ（MT）が一般的に使われていた。FD を使うと 1 日 500 枚、MT の最大容量となる 2400 フィート（リール直径約 40 cm）6250 BPI（180 MB）を使っても 1 日 3 本となり、しかも、MT は装置が大変に高価で非現実的であった。データ記録媒体について窮していたところ、救世主が現れた。ハンディビデオと同規格の 8 mm カセットテープをコンピュータ用として使用することで 2 GB の超大容量を実現した Exabyte が 1987 年に発表されたので、我々は 1988 年にそれをいち早く手に入れた。Exabyte は画期的で、1 本の小さなカセットに 4 日分のデータを記録することができ、しかも非公式ながら家庭用ハンディビデオのメディアを流用することで、ランニングコストを非常に低く抑えることが可能であった。この Exabyte を使って、高頻度のデータ収集は問題なくできるはずだった。しかし、この装置は当時、対共産圏輸出統制委員会（ココム）で中国への輸出に対して厳しく審査され、通過は困難を極めた。そのため、本来の 20 例/秒の高頻度データ収集

は1990年6月を待つことになった。それまではデータはFDに記録することとなり、2例/分の低頻度でのデータ収集を余儀なくされた。

1990年5月から6月にかけて第2隊として日本側から3名の研究者（宇都宮大から堀田、甲南大から西澤、大西の2名）が現地を訪れ、前述の高頻度データ収集のための手直しと、「レーザー・モニタリング・システム」を組み込み、さらに、外周部に16台の検出器を追加して、Tibet Iとして完成した（図III-5.2）。Tibet Iは1994年に実施される拡張（Tibet II）まで順調に稼働した。取得したデータの入った8mmテープは、現地で2セット分のコピーを作り、オリジナルは現地に保管、コピーは毎月1回、北京の高能物理研究所と東京大学宇宙線研究所にそれぞれ郵便で送られた。

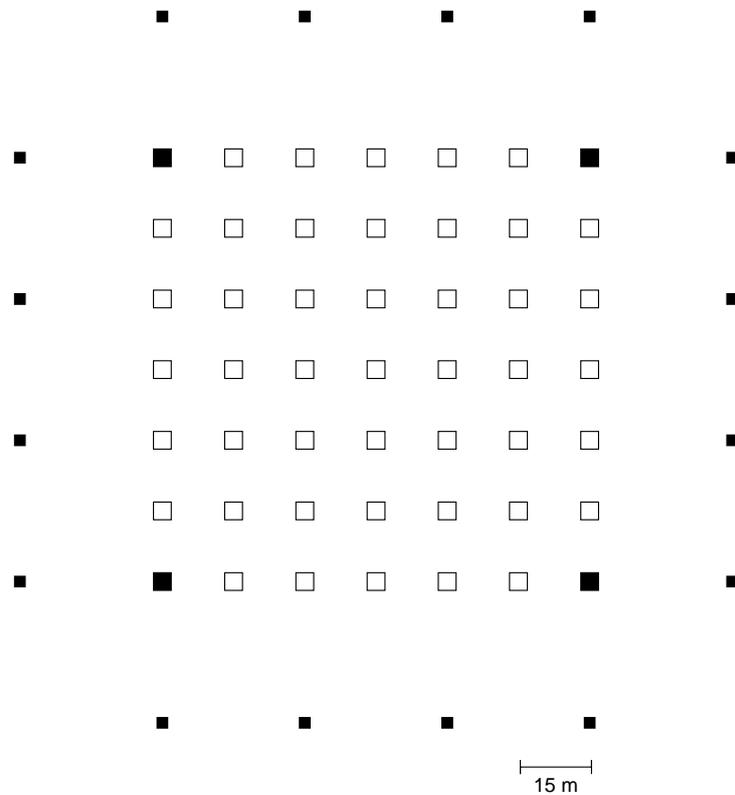
文献：

“Detection of 2×10^{15} to 2×10^{16} eV gamma-rays from Cygnus X-3” ,
M. Samorski and W. Stamm, The Astrophysical Journal Letters, **268**, L17-L21 (1983).

“A monitoring system of the fast-timing scintillation counters used for detection of air showers” ,
M. Nishizawa *et al.*, Nuclear Instruments and Methods, **A285**, 532-539 (1989).

“Development and performance test of a prototype air shower array for search for gamma ray point sources in the very high energy region” ,
M. Amenomori *et al.*, Nuclear Instruments and Methods, **A288**, 619-631 (1990).

Tibet I Air Shower Array



図Ⅲ-5.2. 1990年に完成したTibetI空気シャワー観測装置の検出器配置図。大きい四角が0.5m²検出器、小さい四角が0.25 m²検出器を表す。塗りつぶし四角は時間測定機能を持たない検出器である。



図Ⅲ-5.3. 設置完了直後のTibetI空気シャワー観測装置と実験室建屋。1990年1月撮影。



図Ⅲ-5.4. Tibet I 実験室内部。フロッピーディスクの箱、ブラウン管式のディスプレイやオシロスコープなどが往時の状況を表している。1990年6月撮影。

Ⅲ-5-2) Tibet I 最初の成果

— ガンマ線探索 —

49 台のシンチレーション検出器を 15 m 間隔の碁盤の目状に配置した小規模空気シャワー観測装置 Tibet I は、その性能と観測効率の良さにより、それまでの空気シャワー観測の常識を変えることになった。プラスチックシンチレータと光電子増倍管からなる検出器は、入射する粒子の到達時間差を 1 ns 以下の時間分解能で計測できるように設計された。そのため、宇宙線の到来方向をすなわち、10 TeV 領域の宇宙線がつくる小空気シャワーの到来方向を 1 度以下の精度で観測できることに成功した。また、空気シャワー事象を 1 秒間に約 20 例観測・記録できる装置の性能は多くの研究者を驚嘆させた。

1992 年に、この装置により、キール大学グループが主張した Cyg X-3 (白鳥座 X-3) からの超高エネルギーガンマ線観測結果を世界で最も厳しい上限値で否定する結果を学術誌に発表した。この成功の最大の要因は 4,300m の高地に高精度の空気シャワー観測装置を設置したことである。

文献：

“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”,
M. Amenomori *et al.*, Physical Review Letters, **69**, 2468-2471 (1992).

— 太陽の影と月の影 —

Tibet I 空気シャワー観測装置は予期せぬ結果をもたらした。地球から見る月と太陽の視直径はほぼ同じで約 0.5 度である。銀河宇宙線は月や太陽を透過することができないため、その方向からやってくる宇宙線の数は減少するはずである。モンテカルロ・シミュレーション (MC) によると、空気シャワー観測装置の角度分解能が良ければ、その影が観測できることが予測されていた。はたして、Tibet I 空気シャワー観測装置の実験結果は、高角度分解能を示し、月の影と太陽の影を分離して観測することに世界で初めて成功した。

図 III-5.5 は Tibet I によって月と太陽を 1990 年 6 月から 1991 年 10 月までの間観測して得られた“月の影” (月による銀河宇宙線の遮蔽影) と“太陽の影”である。月の影の中心の深さの統計的な有意度は 4.8σ である。真の到来方向と観測から求めた到来方向との間の角度の分布を求め、50%の事例が含まれる角度を観測装置の角度分解能と定義すると、Tibet I 空気シャワー観測装置の角度分解能は 10 TeV の宇宙線に対して約 0.9 度である。角度分解能はエネルギーとともに向上するため、35 TeV では約 0.5 度となる。月の影が西側にわずかにずれているのは、宇宙線が正電荷を持っているためその軌道が地磁気により曲げられていることによる。この僅かな入射方向の曲がり測定して入射粒子のエネルギーが推定できる。理論的なモデル計算からこのエネルギーでの空気シャワーの性質を計算し、実験との直接比較が初めて可能となった。

しかし、太陽の影は太陽の方向から大きくずれていた。太陽活動は 11 年周期で変動している。Tibet I 空気シャワー観測装置が稼働を開始した 1990 年頃は太陽活動が活発な時期であり、太陽磁場の変動が宇宙線による影を変動させていることが判明した。この結果は、太陽活動期における“太陽の影”の時間的変動の観測を通して、太陽及び太陽磁気圏の磁場の大局的構造についての評価ができることによる、新たな研究分野の発展につながる可能性を示すことになった。

文献：

“Cosmic Ray Deficit from the Directions of the Moon and the Sun Detected with the Tibet Air Shower Array” ,

M. Amenomori *et al.*, Physical Review, **D47**, 2675-2681 (1993a).

“Direct Evidence of the Interplanetary Magnetic Field Effect on the Cosmic-Ray Shadow by the Sun” ,

M. Amenomori *et al.*, The Astrophysical Journal Letters, **415**, L147-L150 (1993b).

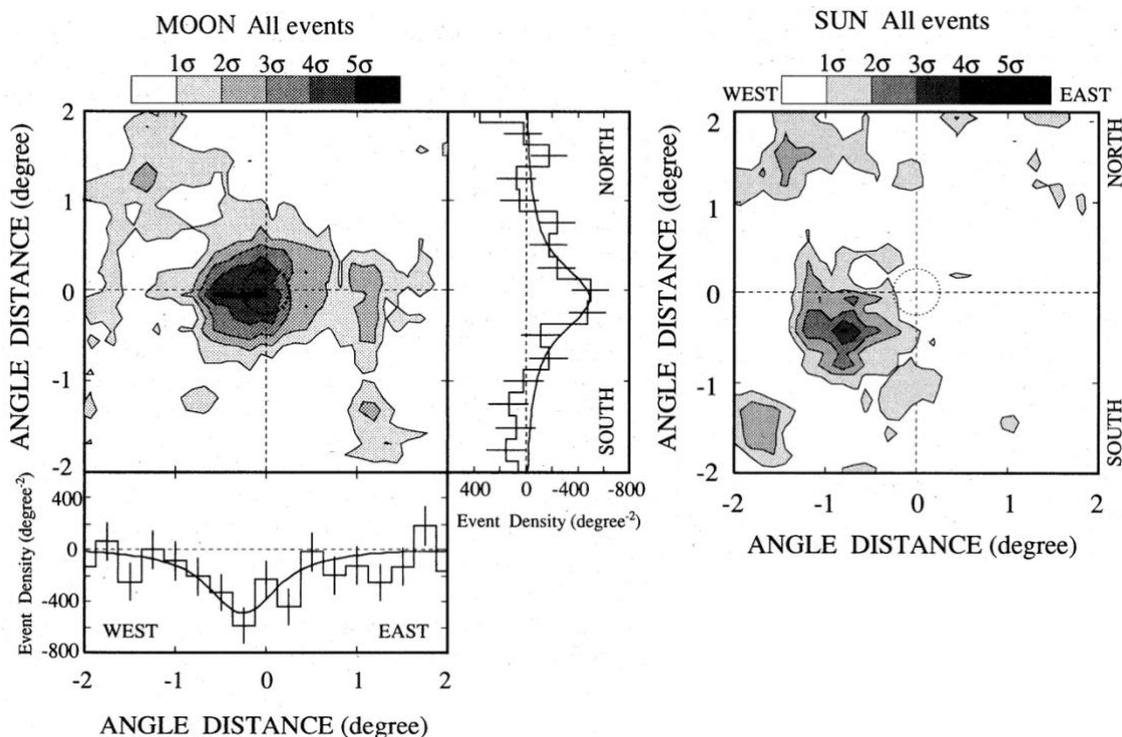


図 III-5.5. Tibet I による 1990 年 6 月から 1991 年 10 月までの観測で得られた月の影 (左) と太陽の影 (右)。座標の原点が月および太陽の中心を示す。月の影の中心は西側に有意にずれている。太陽の影は太陽の方向から大きくずれている (M. Amenomori *et al.*, 1993a)。

III-5-3) 装置の拡張 — Tibet I から Tibet III へ

その後、1994 年から漸次検出器を増設し、1996 年には TeV 領域の小空気シャワー観測を可能とするための検出器間隔 7.5m の高密度検出器 77 台を含む 36,900 m² の Tibet II が完成し、さらに 1999 年には、高密度検出器群を 22,000 m² に拡張した Tibet III による観測を開始した。Tibet III による空気シャワーのイベント頻度は約 680 例/秒、約 20 GB/day の膨大なデータ量を基に研究を進めることとなった。その後 2002 年と 2003 年にさらに検出器を追加して高密度検出器群の面積を増やして、検出器数は 789 台となり、Tibet III は完成した。イベント頻度は約 1700 例/秒となった。データの記録は Tibet III からは Exabyte に代わり SONY AIT-2 を使用することにした。AIT-2 も 8 mm カートリッジテープを使用するが、ビデオ用ではなく専用のテープを使うことで、1 本あたりの容量が 50 GB と飛躍的に大きくなり、Tibet III の高頻度データ収集に対応することが可能となった。

Tibet I の時は ADC (電荷測定)、TDC (時間測定) は TKO 規格のモジュールを使用し、データは TKO から CAMAC 経由で読み出していたが、装置拡張に伴う検出器数とデータ量の増大に対応するため、Tibet II からは FASTBUS の ADC、TDC を用いることにした。FASTBUS の

ADC, TDC はボード 1 枚にそれぞれ 64 ch と 96 ch 分の読み出し回路が実装されていたので、検出器数が大幅に増加したにもかかわらず、データ収集システムをコンパクトに組むことができた。2002 年からはフロントエンド回路としてグループで独自開発した DCT モジュールを使用した。この DCT は、PMT からの信号の時間情報を持つ論理パルスの生成、電荷量に比例した幅をもつパルスの生成、これら 2 つのパルスを合成する回路、トリガーを生成する回路、校正用の信号を PMT に送る回路を 1 モジュールあたり 16ch 分内蔵している。これにより、ADC が不要となり、タイミング情報と電荷情報を 1 つのマルチヒット TDC で同時に読み出すことで、死時間の削減に貢献した。

装置の校正についても改善を図った。Tibet I の時はレーザー・モニタリング・システムを使用し、一定の成果を上げたが、これにはいくつかの問題があった。繊細な光ファイバの敷設に際して、折らないように気を使うこと。光ファイバ自身も信号ケーブルよりは小さいが温度変化を受けること。光源となる窒素ガスレーザーを安定動作させることが困難であることなどである。Tibet II からは、フロントエンド回路から PMT に向けてパルスを発し、そのパルスが PMT で反射して戻ってくるタイミングを測定することでケーブル長の時間変化を測定した。この方法では、パルスが往復で同一経路を通ることから、さらに高精度の校正が可能となった。現在でもこの方法を用いて 20 分ごとに検出器の相対時間の校正を実施している。電荷量の校正は、20 分間に得られた全空気シャワーデータを使った各検出器の電荷量の最頻値（以下、1 粒子という）を基準とすることで行っている。他方、モンテカルロ・シミュレーション（MC）では大気トップに宇宙線を入射させ、大気中の原子核との相互作用を再現して、増殖した粒子を地表まで追跡し、検出器に入る空気シャワー粒子を抽出する。その粒子が検出器のシンチレータ中で損失するエネルギーを求め、それに粒子の検出器への入射位置による非一様性の実測値を加味し、その最頻値をもって 1 粒子のエネルギー損失と定義する。データ再構成の際に使用する各検出器の検出粒子数は、実際の観測においては、測定された電荷量を 1 粒子の電荷量で割ることで求める。宇宙線・ガンマ線の MC においては、各検出器の検出粒子数は、検出器でのエネルギー損失を前述の 1 粒子のエネルギー損失で割ることで求める。このような徹底した装置の校正を実施したことに加え、実験に即した精密な MC を行ったことで、Tibet III の角度分解能、到来方向決定の系統誤差、エネルギー決定の系統誤差、およびそれらの時間変動は、それまでの空気シャワー観測では成し得なかったほど小さくなり、さらに、月の影の観測からそれらを実験的に検証した（M. Amenomori *et al.*, 2009）。

一方、中国側の努力で、羊八井での生活環境も 1990 年から 2000 年頃にかけて、劇的に改善された。当初は実験室、打ち合わせ室、管理人室だけだった建屋は 1991 年には 2 室増え、さらに 1993 年には研究者が宿泊できる寝室 3 室と新しいミーティング室が完成した。それまでは我々は羊八井地熱発電所の宿舎を利用していましたが、これを機に実験室建屋に宿泊することになった。その後、1998 年に中国-イタリアの共同研究である ARGONAT-IBJ が始まり、それに合わせて 10 室を超える部屋を持つ新しい宿舎が完成したが、それまでの 1993 年か

ら 1997 年にかけては、日本側と中国側あわせて多い時には 20 人程度の研究者がわずか 6 室の狭い寝室に寝泊まりする超過密状態となっていた。1990 年から 2002 年頃までは、2 週間に 1 回程度、日本との通信、休息を兼ねて 2 泊 3 日で拉薩の町へ行き、1990 年代は拉薩で唯一設備の整った（それでも冷暖房なし、お湯は朝夕しか出ない）ホテルであった拉薩飯店（Holiday Inn Lhasa）に滞在することが恒例となっていた。1990 年頃は拉薩から日本への国際電話は交換手を通さなければならなかったが、拉薩飯店のフロントに依頼することで、日本との FAX の送受信ができた。1995 年頃からは出張時にノート PC を持参するようになり、また、電話回線を用いたダイヤルアップインターネット接続も一般的になってきたので、拉薩飯店の部屋の電話から中国国内のアクセスポイントにダイヤルアップ接続することで、接続時間に限りがあるものの、メールの送受信も可能となった。2005 年頃からは徐々に拉薩のホテルでも部屋から有線 Ethernet や Wi-Fi でインターネット接続ができるようになった。

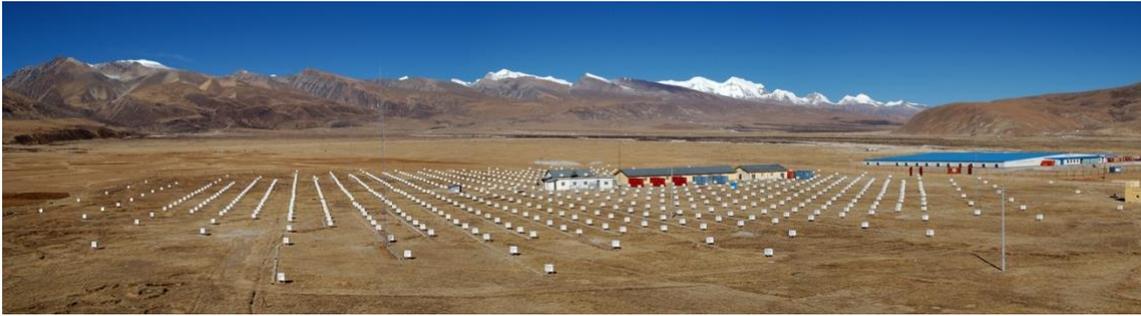
羊八井観測所では、1999 年に国際通話も使える電話回線が開通した。これにより一気に通信事情が改善した。電話回線を用いたダイヤルアップによるインターネット接続も可能となった。さらに 2001 年 10 月には 64 kbps と遅いながらもインターネット常時接続が実現し、2004 年には 8 Mbps にスピードアップした。

文献：

“Multi-TeV Gamma-Ray Observation from the Crab Nebula Using the Tibet-III Air Shower Array Finely Tuned by the Cosmic-Ray Moon’s Shadow” ,
M. Amenomori *et al.*, The Astrophysical Journal, **692**, 61-72 (2009).



図Ⅲ-5.6. Tibet II 空気シャワー観測装置。1994 年撮影。



図III-5.7. Tibet III 空気シャワー観測装置。2003年撮影。

III-5-4) Tibet II, Tibet IIIの成果

宇宙線全粒子スペクトルと化学組成についての研究は III-4 で述べたので、ここでは省略する。

— 月の影から求めた宇宙線中の反陽子/陽子の上限値 —

宇宙線中の反陽子は地磁気での曲がり方が陽子と逆になるので、反陽子が一定数を超えれば月の宇宙線遮蔽影が月を挟んで東西に2つできるか、あるいは東西に広がることから、MCと比較し宇宙線中の反陽子の割合の上限値を求めることができる。Tibet IIIの1041日間の月の影を分析した結果、multi-TeV エネルギー領域の反陽子/陽子の大气トップでの上限値を示すことができた。TeV以上の宇宙線の反陽子/陽子の上限値はTibet AS γ 実験により初めて求められた。

文献：

“Moon Shadow by Cosmic Rays under the Influence of Geomagnetic Field and Search for Antiprotons at Multi-TeV Energies”,
M. Amenomori *et al.*, *Astroparticle Physics*, **28**, 137-142 (2007).

— 太陽の影を用いたコロナ磁場モデルの評価 —

Tibet II以降の装置拡張で有効面積が増えたこと、1996年から2008年までの第23太陽周期全体の観測を含んでいること、コロナ磁場に基づく太陽の影の数値シミュレーションコードを独自に開発したことから、太陽の影を使ったコロナ磁場モデルの定量的評価が可能となった。

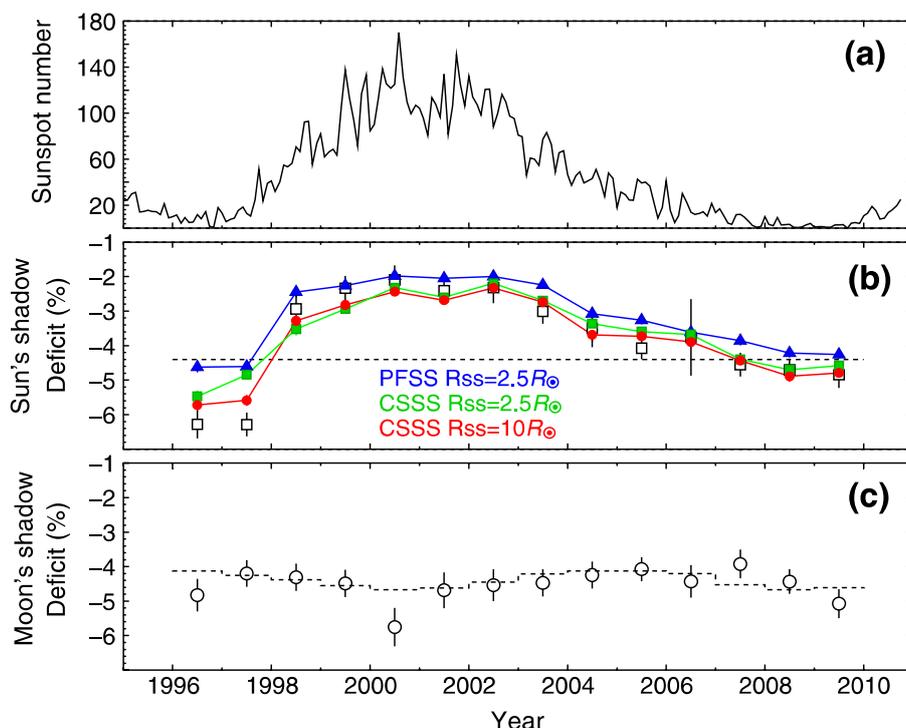
太陽から離れた場所では磁場は太陽風によって引き出された比較的単純な惑星間空間磁場となるが、太陽近傍のコロナ磁場は直接観測、地球からの観測共に難しく、光球磁場の観測から外挿しなければならない。その外挿は、コロナに電流が存在しないと仮定した potential field source surface (PFSS) モデルが広く知られているが、大規模な水平方

向の電流の存在を仮定した current sheet source surface (CSSS) モデルも提唱されている。

Tibet II, Tibet IIIの観測による太陽の影は、コロナ磁場として CSSS モデルを採用し、source surface (コロナ磁場と惑星間空間磁場の境界) を 10 太陽半径にとった場合のシミュレーションと最も良く一致した。これはコロナ磁場モデルを評価した世界初の成功例であった。この成果は Physical Review Letters に掲載され、Featured in Physics (Synopsis) と Editors' Suggestion に選ばれた (M. Amenomori *et al.*, 2013)。

文献：

“Probe of the Solar Magnetic Field Using the “Cosmic-Ray Shadow” of the Sun”, M. Amenomori *et al.*, Physical Review Letters, **111**, 011101 (2013)。



図III-5.8. (a)は月ごとの平均太陽黒点数。(b) は年ごとの太陽による宇宙線の欠損割合。黒四角がチベットによる観測値。青三角、緑四角、赤丸はそれぞれ PFSS モデル、CSSS モデル (source surface = 2.5 太陽半径)、CSSS モデル (source surface = 10 太陽半径) を表す。CSSS モデル (source surface = 10 太陽半径) が観測値を最もよく再現している。点線は太陽磁場がないと仮定した場合の期待値。(c) は装置が安定に動いていることを示すための月による宇宙線の欠損割合の年変化。点線は期待値 (M. Amenomori *et al.*, 2013)。

— 宇宙ガンマ線の観測 —

1996年以降、Tibet IIの一部に検出間隔が従来の半分の7.5 mとなる高密度部分を作ったことにより、ガンマ線の観測エネルギーがそれまでの10 TeVから3 TeVに下がった。このことにより、地表空気シャワー観測装置としては世界で初めて宇宙ガンマ線を捉えることに成功した (M. Amenomori *et al.*, 1999)。このガンマ線の源は「かに星雲」であったが、その後、1997年に大きなフレアを起こした系外の活動銀河核 Markarian 501からのガンマ線も捉えた (M. Amenomori *et al.*, 2000)。これらの成功を受けて、1999年から装置の高密度部分を拡張し、2000年から2001年にかけてフレアを起こした活動銀河核 Markarian 421からのTeVガンマ線の強度が、X線の強度と相関を持っていることを見出した (M. Amenomori *et al.*, 2003)。

文献：

“Observation of Multi-TeV Gamma Rays from the Crab Nebula using the Tibet Air Shower Array” ,

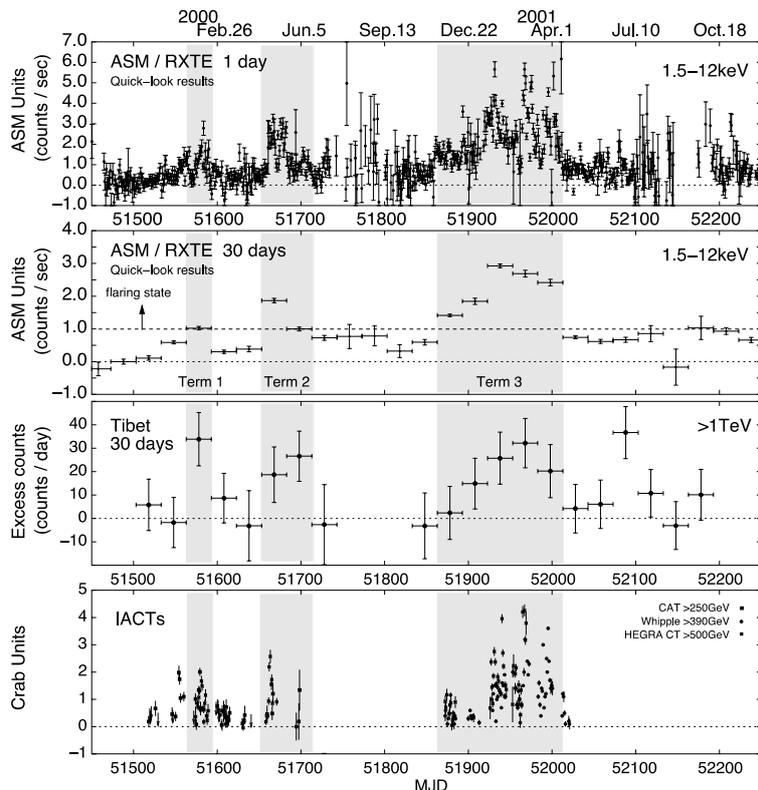
M. Amenomori *et al.*, *The Astrophysical Journal Letters*, **525**, L93-L96 (1999).

“Detection of Multi-TeV Gamma Rays from Markarian 501 During an Unforeseen Flaring State in 1997 with the Tibet Air Shower Array” ,

M. Amenomori *et al.*, *The Astrophysical Journal*, **532**, 302-307 (2000).

“Multi-TeV Gamma-Ray Flares from Markarian 421 in 2000 and 2001 Observed with the Tibet Air Shower Array” ,

M. Amenomori *et al.*, *The Astrophysical Journal*, **598**, 242-249 (2003).



図III-5.9. 2000年から2001年にかけてフレアを起こしたMarkarian 421からのX線とガンマ線強度。上から1日ごとのX線、30日平均のX線、我々が観測した30日平均のTeVガンマ線、チェレンコフ望遠鏡の観測結果。TeVガンマ線の強度がX線の強度と相関のあることがわかる (M. Amenomori *et al.*, 2003)。

— 宇宙線異方性の観測 —

高エネルギーの宇宙線はほぼ等方的に地球に到来するが、わずかながら、その到来方向分布に異方性を持つことが知られていて、古くから観測がなされていた。1997年に南アフリカのダーバンで開催された第25回宇宙線国際会議(ICRC)の会場で、宇宙線異方性観測の第一人者である信州大の宗像一起氏からチベットのデータを使った宇宙線異方性の解析についての提案を受け、チベットのデータを提供して共同解析することとした。その後2004年から信州大が正式にTibet AS γ グループのメンバーに加わった。その成果として、太陽時の宇宙線異方性からはこれまでで最も高精度なCompton Getting効果が観測された (M. Amenomori *et al.*, 2004)。恒星時の異方性からは、はくちょう座方向に今までに知られていない新しい異方性の成分が発見された。また、太陽系の銀河系内での公転によるCompton Getting効果が観測されないことから、太陽系近傍では銀河宇宙線は、局所銀河磁場に拘束されながら太陽系と共に銀河系を公転していることが示された。これらの成果は2006年にScience誌にて発表された (M. Amenomori *et al.*, 2006)。

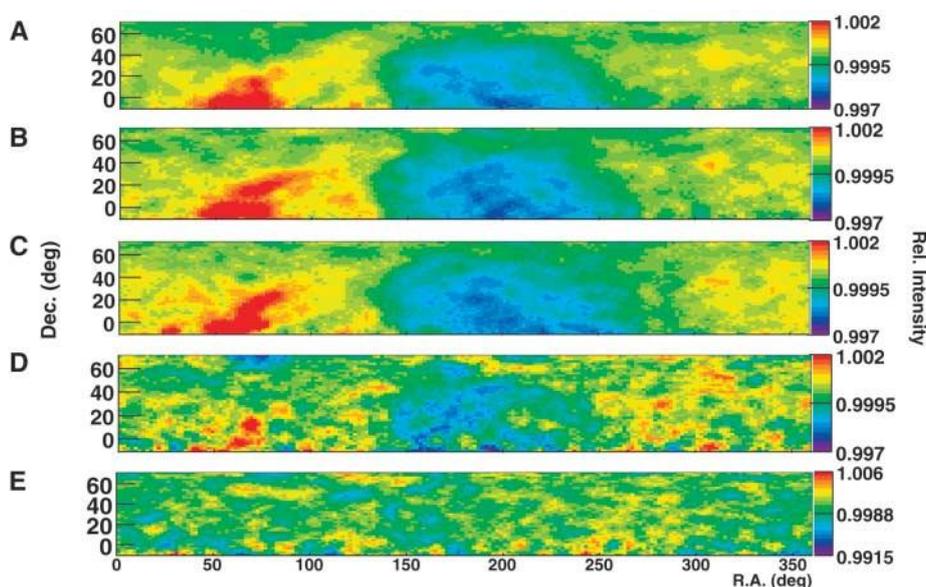
文献：

“Observation by an Air-Shower Array in Tibet of the Multi-TeV Cosmic-Ray Anisotropy due to Terrestrial Orbital Motion Around the Sun” ,

M. Amenomori *et al.*, Physical Review Letters, **93**, 061101 (2004).

“Anisotropy and Corotation of Galactic Cosmic Rays” ,

M. Amenomori *et al.*, Science, **314**, 439-443 (2006).



図Ⅲ-5.10. チベット空気シャワー観測装置を用いた1997年から2005年の観測で得られた宇宙線異方性マップ。5枚の図はエネルギーが異なる。A: 4 TeV, B: 6.2 TeV, C: 12 TeV, D: 50 TeV, E: 300 TeV (M. Amenomori *et al.*, 2006)。

Ⅲ-5-5) 地下ミューオン検出器 (MD) 建設と Sub PeV 宇宙ガンマ線の観測

地表空気シャワー観測装置 (空気シャワーアレイ) や大気チェレンコフ望遠鏡 (ACT) による空気シャワーの検出を通じた、高 (TeV 領域) ・ 超高 (PeV 領域) エネルギーガンマ線の観測は1950年代の終わりから模索されていた。その当時から感度を上げるために、背景となる宇宙線をいかに排除するかが焦点となっていた。すでに述べたように、空気シャワーアレイと ACT のどちらも角度分解能を改善することでガンマ線点源に対しては感度を上げることができるが、それ以外に、空気シャワーアレイ固有の手法としては空気シャワー中のミューオン数を使うこと、ACT 固有の手法としては撮像を行うことが有力とされてきた。前者は、宇宙線が作る空気シャワーにはミューオンが含まれるが、ガンマ線が作る空気シャワーにはそれがほとんど含まれないことを利用する。後者は、ACT の焦点面で撮像 (イメージを観測する) することにより角度分解能が劇的に向上するが、それ以外に、大気上空での

空気シャワーの発達の振舞いが宇宙線とガンマ線で異なるので、ACTの焦点面での像に違いが見られることを利用する。

空気シャワーアレイやACTを用いた高・超高エネルギーガンマ線観測装置は1970年代から80年代にかけて世界中にいくつも建設された。1983年にキール大学グループが主張したCyg X-3からのPeV領域ガンマ線検出の発表により、高・超高エネルギーガンマ線探索熱が世界中で過熱したが、キール大学グループが使用した装置はミュオン検出器を付加した空気シャワーアレイであった。

III-5-1で述べたように、日中共同研究もキール大学グループの発表に触発され、チベットでの超高エネルギーガンマ線の観測を計画した。装置としては、ACTではなく、元来の目的であったECとの運動実験と親和性の高い空気シャワーアレイを選択した。標高の高いチベット高原で観測することで、観測に有利な比較的低いエネルギーのガンマ線を空気シャワーアレイでも観測できるとの目論みである。その際、当然、空気シャワー中のミュオン数を使うことも候補に上がったが、PeVエネルギーの宇宙線陽子を作る空気シャワーでも含まれるミュオン数は100 m²あたり1個程度とそれほど多くないため、ミュオン数がほぼゼロであるガンマ線を作る空気シャワーと有意に区別するためには、少なくとも数100 m²のミュオン検出器(MD)を作る必要がある。観測エネルギーを下げるとミュオン数が少なくなるため、さらに大面積のMDが必要となる。MDは、空気シャワーの大部分を占める電磁成分(電子、陽電子、光子)を遮蔽するための数100 g/cm²の物質を検出器の上に載せる必要があることなどから、検出器単価が高く、大面積MDの建設は困難であった。また、モンテカルロ・シミュレーションによって得られる空気シャワー中のミュオン数は、使用する相互作用モデルに強く依存することもMDの建設に積極的になれない要因の一つであった。そのため、Tibet AS γ 実験では、MDに頼らず、空気シャワーアレイの角度分解能向上によりガンマ線に対する感度を上げる手法に注力することとなった。

世界の情勢としては、1980年代後半からは、超高エネルギーガンマ線に対して否定的な観測結果を報告するグループが増えてきた(1985年から1990年の宇宙線国際会議(ICRC) Proceedings 参照)。また、肯定的な結果の報告は信頼性に欠けるとされるものがほとんどであり、後述のWhipple望遠鏡の観測結果を除き、高・超高エネルギーガンマ線の検出が認知されたとは言えない状況であった。

1989年、撮像型大気チェレンコフ望遠鏡(IACT)を用いたWhipple望遠鏡によって「かに星雲」からのTeV領域ガンマ線が検出され、この発見によってTeV領域高エネルギーガンマ線天文学が切り開かれて以降、空気シャワーアレイではなく、IACTがTeV領域ガンマ線の標準的な観測装置として認知されるようになった。

その頃から空気シャワーアレイを使用したガンマ線探索はどのグループも否定的な観測結果ばかりとなり、風当たりが次第に強くなってきて、Tibet AS γ を含むごく少数のグループ以外はこの分野から次第に撤退していった。III-5-2)で述べたように、Tibet AS γ グループは、1990年に完成したTibet I空気シャワー観測装置を用いて、キール大学グループが

主張した Cyg X-3 からの超高エネルギーガンマ線観測結果を世界で最も厳しい上限値で否定する結果を 1992 年に学術誌にて発表した。それ以外の天体を含め、肯定的な超高エネルギーガンマ線検出には至らなかった。

1996 年に、観測エネルギーを $1/3$ から $1/4$ に下げるため、検出器間隔を従来の 15 m から 7.5 m に縮めた高密度検出器群 77 台を追加した。これによって空気シャワーアレイとしては世界で初めて宇宙ガンマ線（かに星雲由来）の観測に成功し、1999 年に学術誌に発表した。その頃には H. E. S. S. や VERITAS などの第 2 世代 IACT の建設が始まろうとしていて、空気シャワーアレイは IACT と比べて、昼夜連続観測が可能、広がった源の観測に強いなどの利点はあるものの、競争力はそれほどはなかった。それでも 1999 年から 2003 年にかけて高密度検出器群の面積を増やし、Tibet III を完成させた。Tibet III によって、ちょうどフレアを起こしていた Mrk 421 からのガンマ線検出に成功し、空気シャワーアレイの長所を生かした、ガンマ線流量の長期時間変動を観測することができた。

Tibet AS γ 実験によるガンマ線の観測はそれなりに評価はされたが、第 2 世代 IACT と比較して、明らかに感度が不足していることは否めなかった。Tibet III 完成後の 2004 年頃から装置のガンマ線に対する感度向上の検討を始め、やはり古くから知られているミュオンを使う手法に頼るのが良かろうと考え始めた。

それまで、ミュオンを用いて高・超高エネルギーガンマ線の観測に成功した例はなかった。過去の装置がなぜ失敗したかを検討することから始めた。その結果、多くのグループの失敗の原因は以下の三つに集約できることがわかった。

- ① 過去のほとんどの装置が北天での観測の目安となる「かに星雲」からのガンマ線の流量が知られていなかった時代に計画されたので、たとえ背景雑音となる宇宙線を完全に除去できたとしても、そもそもガンマ線信号が受かるに必要な空気シャワーアレイの（検出効率） \times （有効面積）がない。観測可能エネルギーの下限が高すぎる。角度分解能が悪い。などといった、空気シャワーそのものの観測に関係する部分に問題を抱えた装置が多い。
- ② ミュオン検出器（MD）の面積が不足している装置が多い。上に述べたように有意に宇宙線を除去するためには少なくとも数 100 m² の MD が必要となるが、MD には電磁成分の吸収層が必要なこともあり、非常に高価になるためである。
- ③ それまで一般的に使われていた MD はノイズが多い。すなわち、MD ではミュオン 1 粒子を確実に捉えなければならないが、吸収層の設計によっては空気シャワー中の電磁成分が混入する。また、MD としてよく使われるシンチレーション検出器や比例計数管は低エネルギーの粒子に感度があるので、土壌などからの環境放射線の影響を受けやすい。

検討の結果、①については、Tibet AS γ 実験の場合、標高 4,300 m の高地に装置があることで、観測エネルギーを低くできることもあり、空気シャワーアレイについては問題なしと判断した。②と③については、空気シャワーアレイの地下に水チェレンコフ型ミュオン検出

器を建設することで解決の目処が立った。すなわち、②については、地下に水深 1.5 m の鉄筋コンクリート製プールを作り、ミュオンが水中で発するチェレンコフ光をプールの天井から吊るした 20 インチ PMT（スーパーカミオカンデと同じ型）で捉えることで、非常に安価に大面積を作ることができる。約 50 m² の水槽に 1 個の PMT で十分なので、PMT を含むデータ収集系の価格を抑えることができる。発光体である水は、現地の豊富な地下水がほぼ無料で使える。鉄筋コンクリート製の地下プールは日本と比べると建設費は安価であるが、現地の業者が実際に建設できるかどうかは検証の必要があった。③については、検出器が地下に埋設されているので、十分深くに設置することで、空気シャワー中の電磁成分の混入は少なくできる。また、チェレンコフ閾値のため、環境放射線を含む低エネルギー粒子には感度がないのも好都合である。

上記の検討のために、フル・モンテカルロ・シミュレーションを行った。現有の Tibet III 空気シャワー観測装置の地下（土の厚さ約 2.5 m）に計 10,000 m² の水チェレンコフ型ミュオン検出器を設置する。検出器水槽 1 個のサイズは 7.3 m x 7.3 m（約 53 m²）で水深 1.5 m である。その水槽の中心の天井から 20 インチ PMT 1 本を受光面が水面のすぐ下になるように下向きに設置する。水槽の側面と底面は白色の反射とする。すなわち、チェレンコフ光を直接 PMT で捉えるのではなく、主として床に反射させて捉えるのである。このようにすることで、検出器の一様性が向上し、水深が 1.5 m と浅いにもかかわらず、20 インチの大口径 PMT を使用することで、53 m² を 1 本の PMT で賄うことができるようになった。この水槽 16 個を 1 プール（約 850 m²）とし、全体で 12 プール設置する計画である。すべてのプールは地下廊下でつながっていて、水を入れた状態でも、メンテナンス時にはすべての水槽に直接アクセスできるように設計した。このような MD を設置することで、ガンマ線点源に対して 10 TeV 以上のエネルギー領域で、IACT を含めても世界最高感度を実現できることがわかった（T. K. Sako *et al.*, 2009）。

しかしながら、このような大規模な装置をいきなりチベットに建設するのはリスクを伴う。まずは、2007 年をめどに試験的に 50 m² の地下水槽 2 個作ることを目標にした。建設の実現可能性とシミュレーションの確認のためである。2005 年頃から準備を始めた。水槽の上には 1 m² あたり 5 トン近くの土を載せるので、その荷重に耐える構造でなければならない。まずは日本で建築士に依頼して構造設計をしてもらった。並行して、建築と土木について勉強した。地下プールでの作業を伴うので、酸素欠乏危険作業特別教育も受けた。現地で建設を行うためには、中国の建築基準で設計をする必要があるので、2006 年には中国の設計事務所に設計を依頼し、それを日本での設計と比較することで、構造設計に問題がないことを確信した。2006 年から 2007 年にかけて、その設計図をもとに、現地で施工可能な建設業者探しをした。地下プールは強度を保つためと防水のため、その全てを鉄筋コンクリートで作らなければならない。しかし、中国の一般の建造物は、柱と梁のみが鉄筋コンクリートで、壁は煉瓦積み、屋根はコンクリート板を梁に載せた構造となっているため、チベットでは、壁や屋根を鉄筋コンクリートで作った経験のある建設業者は調べた範囲ではほぼ皆無

であった。請け負ってくれる業者をなんとか見つけ、2007年9月1日から建設を開始し、同年11月26日に竣工した。現場監督は日中の研究者が担当したが、こちらから建設業者を教育する場面が多々あった。竣工後、作業のために撤去していたTibetⅢ空気シャワー観測装置の検出器を元通りに戻した。同時に水槽に井戸水を注入した。そのために近くの井戸から専用の水道を敷設した。水槽内側は防水剤を塗布するが、チェレンコフ光を反射させるため白色にする必要がある。製作した2個の水槽を使って2種類の防水剤を試験した。一つは白色のエポキシ系防水剤、もう一方はセメント系防水剤の表面にタイベックシートを貼り付けたものである。どちらも防水は完璧であった。反射率はタイベックシートが勝り、価格もセメント系防水剤+タイベックシートの方が安かった。さらにセメント系防水剤は水をアルカリ性にするが、それが細菌の繁殖を抑えるという副次的効果もあった。よって、本番のMDでは、セメント系防水剤 + タイベックシートを採用することとした。この試験水槽によって、チベットでこのような建造物が建設可能であることが分かった。また、モンテカルロ・シミュレーションと実験を比較（粒子が通過した際の受光量、およびその水槽内における場所依存性、ミュオン数でイベント選別をした際の宇宙線の生き残りの割合など）したところ良く一致し、TibetⅢ空気シャワー観測装置に本格的MDを付加することになんら障害はなく、シミュレーション通りの成果が出せると確信した。

そこで、まずは中心付近の4プール（約3,400 m²）を建設するため、早速2008年から本格的に準備に取りかかった。中国側の研究者と一緒に拉薩にある設計会社、建設会社、そして入札会社をいくつも、何度も訪問した。この間、その他の問題にも見舞われ、やっと金額的、技術的に納得できる設計会社と建設会社を見つけることができ、2010年7月の着工に向けて、MD建設の障害となる既存のTibetⅢ空気シャワー観測装置の検出器を撤去する作業を2010年5月から開始した。MDを空気シャワー観測装置の周辺部分に設置すれば検出器の撤去は最小限で済むが、中心付近に設置した場合と比べ2倍程度感度が悪くなるのがシミュレーションからわかっていたので、それを避けて中心付近にMDを設置することとしたため、既存の約800台の空気シャワー検出器のうち約300台は架台も含めて完全に撤去、ほぼ全ての検出器に相当する約700台のケーブルを撤去する一大作業となった。この作業には宇宙線研、横浜国大、信州大、中国科学院高能物理研究所から多くの研究者と大学院学生が参加した。その後、予定通り2010年7月15日に着工した。2007年の時と同様に現場監督は研究者（中国側、宇宙線研、日本大、宇都宮大、神奈川大）が行った。2010年12月には大部分の建設が完了し、建設会社は冬季長期休暇に入った。2011年5月からはMD建設のために破壊した空気シャワー観測装置用のケーブル溝を作り直す作業に取り掛かった。その後、中国側は研究代表者の交代などがあり、MDの完成は2013年まで持ち越すこととなった。2013年5月からMD内にPMTを取り付け、MDへ井戸水を注入し、撤去した空気シャワー観測装置の検出器とケーブルを元に戻す作業を行なった。これらの過酷な作業には、宇宙線研、信州大、横浜国大、中国科学院高能物理研究所の大学院学生が大いに活躍した。2013年9月に装置はほぼ完成し、2014年2月までに最終調整を行い、データ収集を開始した。

この時期の解析からは、ガンマ線のエネルギーを精度良く決めるために S50 と呼ばれるパラメータを導入した。それまで Tibet AS γ 実験では、ガンマ線のエネルギーは空気シャワー観測装置で検出された総粒子数から推定していた。新しい方法では、空気シャワーの軸に垂直な距離ごとに検出粒子密度を求め、それを NKG (Nishimura-Kamata-Greisen) 関数でフィットし、軸から 50 m 離れた場所での粒子密度 (S50) と天頂角をパラメータとして、モンテカルロ・シミュレーションと比較して元のガンマ線のエネルギーを決める手法である。その結果、100 TeV のガンマ線に対するエネルギー分解能がそれまでの 30%から 16%に改善された (K. Kawata *et. al.*, 2017)。

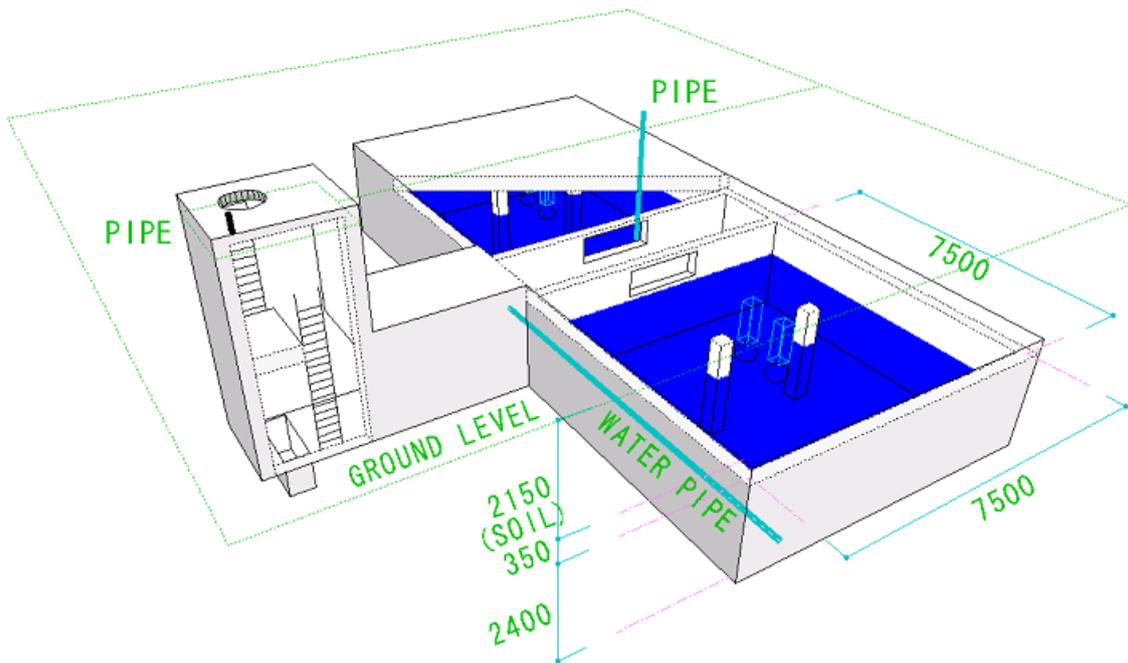
文献：

Exploration of a 100 TeV gamma-ray northern sky using the Tibet air-shower array combined with an underground water-Cherenkov muon-detector array
T. K. Sako *et al.*, *Astroparticle Physics*, **32**, 177-184 (2009)

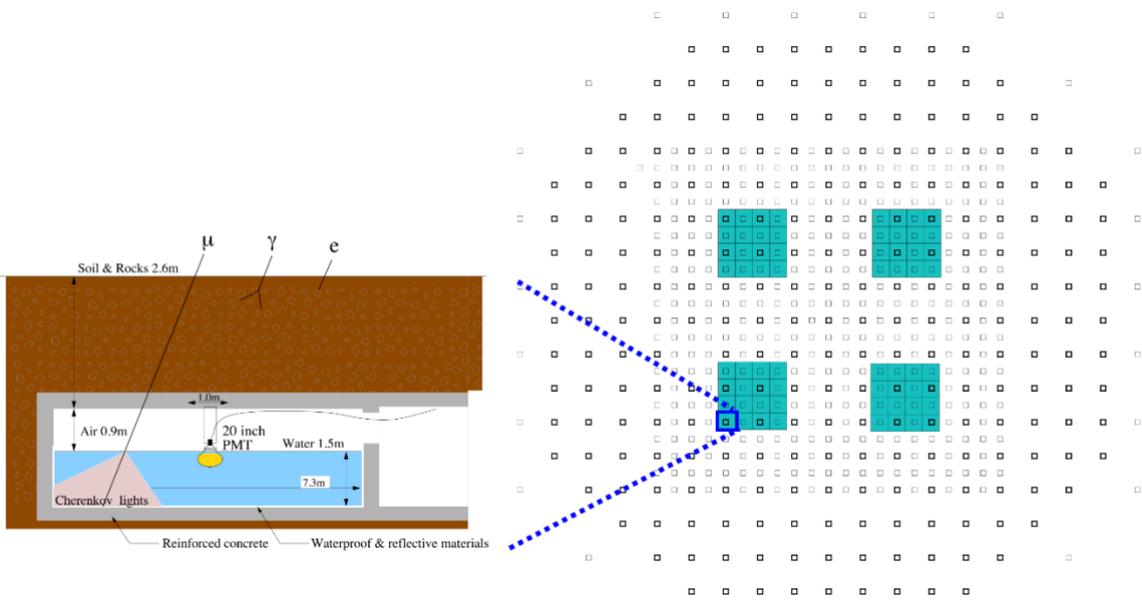
Energy determination of gamma-ray induced air showers observed by an extensive air shower array
K. Kawata *et al.*, *Experimental Astronomy*, **44**, 1-9 (2017)



図III-5.11. 試験ミュオン検出器 (2007年)。このあと土を埋め戻す。



図III-5.12. 試験ミューオン検出器のイメージ図。



図III-5.13. 地下ミューオン検出器の配置図（右）と検出器断面図（左）。1つの正方形が 54m^2 の水チェレンコフ型粒子検出器. 16個で1プールを構成し、全部で4個のプールが設置されている. 右図の白抜きの小さい正方形は空気シャワー観測装置の検出器。

図Ⅲ-5.14. 地下ミュオン検出器 (MD) 建設風景 (2010年から2013年)



地表検出器の解体



検出器を退避



室内に退避した検出器



架台も撤去する



ケーブルも一旦撤去する



地表検出器の撤去完了



重機を使って穴を掘る



かなり掘り進んだ



鉄筋の準備



セメントの準備



捨てコンを打つ



床の配筋



柱と壁の配筋



床のコンクリート打ち



躯体はほぼ完成



埋め戻し



光電子増倍管取り付けの準備



壁内面と床のタイベックシート貼り



光電子増倍管支持具の取り付け



光電子増倍管の取り付け



光電子増倍管取り付け作業完了



水入れの準備



水入れ



水入れの途中

Ⅲ-5-6) 地下ミュオン検出器を併用したガンマ線観測の成果

2014年からデータ収集を開始した地下ミュオン検出器とTibet IIIによる超高エネルギー(100 TeV以上)ガンマ線の観測は目覚ましい成果を上げることができた。

— かに星雲からの超高エネルギー（UHE）ガンマ線の検出

UHE ガンマ線天文学の幕開け —

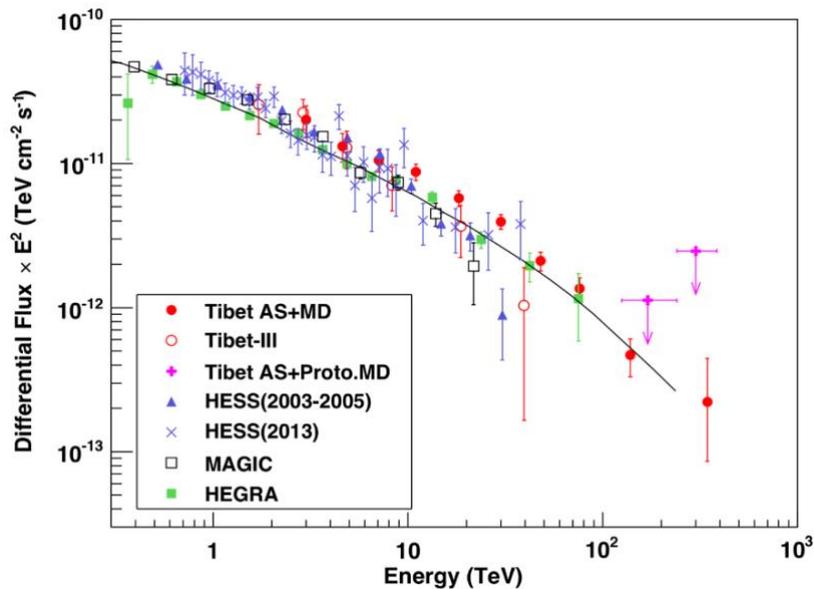
完成したミュオン検出器のデータを用いることで、100 TeV 以上のエネルギー領域において、背景となる宇宙線を 1000 分の 1 以下に減らすことに成功した。そして、2014 年から 2017 年までの約 2 年間のデータを解析して「かに星雲」方向からの 100 TeV 以上の超高エネルギー（UHE）ガンマ線を 5.6σ の有意度で検出した。これは UHE ガンマ線の世界初の観測である。それらのガンマ線の中で最も高いエネルギーのものは約 450 TeV にも達し、それまで観測されていた最も高いエネルギーである、HEGRA による 80 TeV ガンマ線の 5 倍以上高いエネルギーであった。この「かに星雲」からのガンマ線は、星雲中で PeV エネルギー付近まで加速された電子が宇宙マイクロ波背景放射と衝突することで発生したと考えられる。この成果は Physical Review Letters に掲載され、Featured in Physics (Viewpoint) と Editors' Suggestion に選ばれた (M. Amenomori *et al.*, 2019)。

本成果によって超高エネルギーガンマ線による天文学の新しい窓が開かれたと認知された。

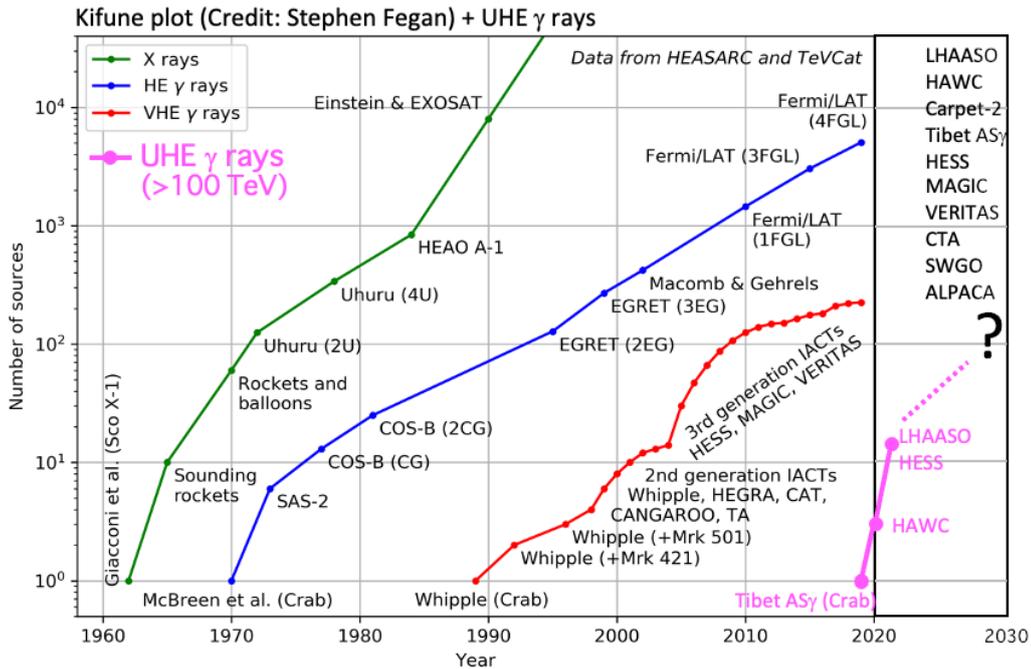
文献：

“First detection of photons with energy beyond 100TeV from an astrophysical source” ,

M. Amenomori *et al.*, Physical Review Letters, **123**, 051101 (6 pp.) (2019).



図III-5.15. かに星雲からの宇宙ガンマ線のエネルギー分布。赤丸がチベット空気シャワー観測装置と地下ミュオン観測装置により測定された「かに星雲」からのガンマ線流量。それまで知られていたより 5 倍高いエネルギーまでガンマ線が存在することがわかった (M. Amenomori *et al.*, 2019)。



図III-5.16. 木舟プロット。横軸に年、縦軸に電磁波の波長（X線，HEガンマ線，VHEガンマ線）ごとに発見された天体数の累積値をとったグラフは木舟プロットとして知られている。UHEガンマ線は2019年にTibet AS γ によって切り開かれた。

— PeVatron 候補 —

宇宙線を PeV (10^{15} eV) エネルギー領域にまで加速する天体は PeVatron と呼ばれている。ある天体が PeVatron 候補となるためには、

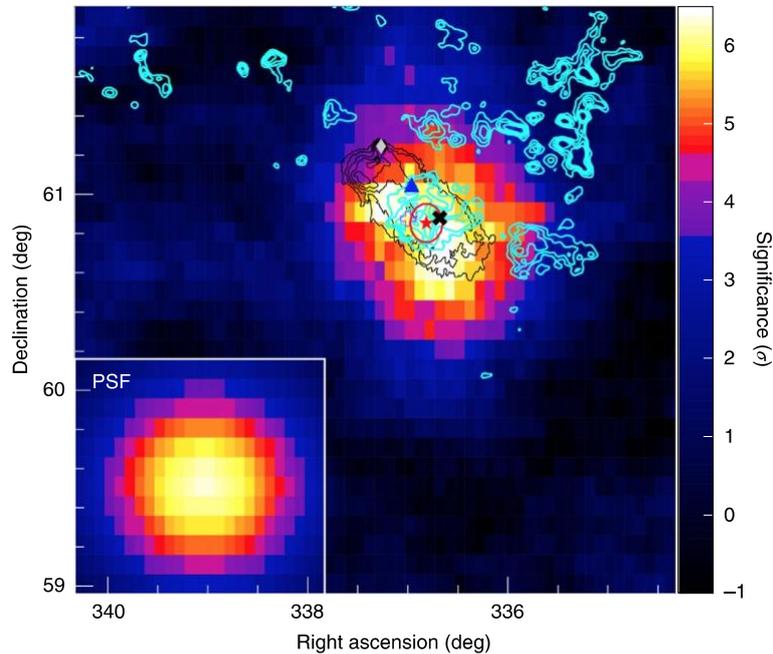
- 1) その天体が 100 TeV を超えるガンマ線を放射している。
 - 2) ガンマ線放射領域が分子雲の位置と合っており、パルサーの位置からは離れている。
- という2つの条件を満たす必要がある。TeV以上のエネルギーのガンマ線を放出する天体はこれまで200個以上確認されているが、これら2つの条件を同時に満たす天体はなかった。

ケフェウス座にある超新星残骸 (SNR) G106.3+2.7 は、Tibet AS γ 実験の観測によって、この2つの条件を満たし、初めての PeVatron 候補天体となった (M. Amenomori *et al.*, 2021a)。

文献：

“Potential PeVatron supernova remnant G106.3+2.7 seen in the highest energy gamma rays”,
M. Amenomori *et al.*, Nature Astronomy Letters, **5**, 460-464 (2021a).

「観測史上最高エネルギー宇宙ガンマ線の検出 — 銀河系宇宙線の加速限界にせまる」,
川田和正、大西宗博、佐古崇志、瀧田正人、
日本物理学会誌 **77**, 155-160 (2022).



図III-5.17. Tibet AS γ 実験によって観測された SNR G106.3+2.7 周辺の 10 TeV 以上のガンマ線有意度マップ。カラーは Tibet AS γ で観測されたガンマ線の有意度を示している。黒線は 1,420 MHz の電波強度を示していて、ガンマ線の放射領域と一致している。また、ガンマ線放射領域はパルサー（灰色菱形）からは離れていることがわかる (M. Amenomori *et al.*, 2021a)。

— Sub PeV 拡散ガンマ線 —

拡散ガンマ線を観測するためには広い視野を見る必要があるため、相対的に背景となる宇宙線の個数が増えるので、かに星雲のような点源を観測する場合より、より高い宇宙線の排除能力が必要となる。Tibet AS γ の装置は点源観測のための解析の場合にはすでに述べたように 100 TeV 以上のエネルギー領域で宇宙線を 1000 分の 1 以下に減らすことが可能であるが、拡散ガンマ線を観測するためにはこれではまったく不十分である。水チェレンコフ型地下ミューオン検出器が超低ノイズであることが奏効し、ガンマ線の生存率を若干犠牲にすることで、400 TeV 以上のエネルギー領域において、宇宙線を 100 万分の 1 に減らすことに成功した。この時のガンマ線の生存率は約 30% である。その結果、100 TeV 以上の拡散ガンマ線を世界で初めて検出することに成功した。検出したガンマ線の最高エネルギーは 950 TeV に達していた。400 TeV 以上のガンマ線は 38 例あり、それは銀河面に集中していた (図III-5.18)。

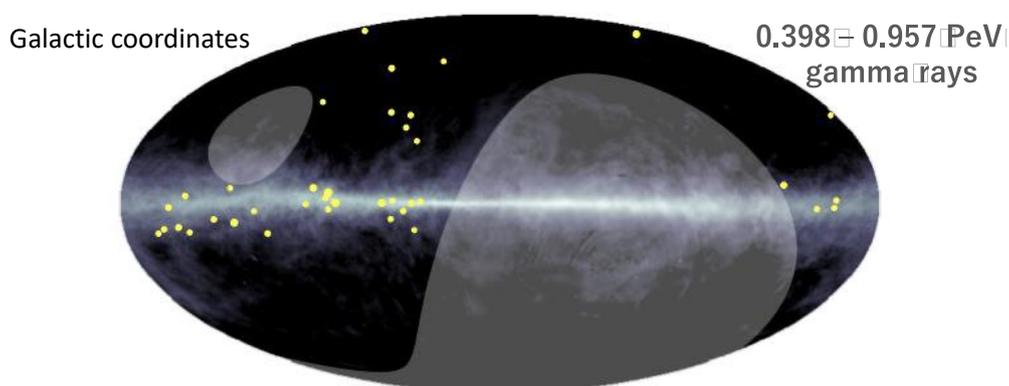
これらのガンマ線は既知の源や他のガンマ線の到来方向から離れた孤児 (orphan) ガンマ線であった。既知の源から離れていることから、これらのガンマ線の親が電子であるとは非常に考えづらい。銀河系内のどこかにある PeVatron で加速された数 PeV の宇宙線が銀河磁場に閉じ込められて銀河系内を漂い、たまたま星間物質と衝突して、およそ 10 分の 1 の

エネルギーを持つガンマ線が発生し、それが地球で観測されたとするシナリオが最も自然である。以前から、少なくとも数 PeV 以下のエネルギーの宇宙線は銀河系内が起源であると考えられていたが、今回の結果は、初めてそれを観測的に裏づけた (M. Amenomori *et al.*, 2021b)。

本成果は Physical Review Letters に掲載され、Featured in Physics (Viewpoint) と Editors' Suggestion に選ばれた。また、アメリカ物理学会 (American Physical Society) 主催の記者会見がオンラインで開催された。

文献：

“First Detection of sub-PeV Diffuse Gamma Rays from the Galactic Disk: Evidence for Ubiquitous Galactic Cosmic Rays beyond PeV Energies”,
M. Amenomori *et al.*, Physical Review Letters, **126**, 141101 (7 pp.) (2021b).



図III-5.18. 銀河座標系で見た拡散 UHE ガンマ線の分布。中心が銀河系中心方向。黄色い丸が観測されたそれぞれのガンマ線の到来方向を表す。銀河面に集中していることがわかる。銀河系中心方向を含む灰色部分はチベットからの視野外である。

本節で述べた 3 つの成果を含む 2019 年から 2021 年の Tibet AS γ グループのガンマ線観測にかかる 4 つの成果が認められ、「サブ PeV ガンマ線天文学の創始と銀河宇宙線の起源の解明」の業績で、2021 年度 (第 67 回) 仁科記念賞が Tibet AS γ グループ日本側代表者の瀧田正人に授与された。

(<https://www.nishina-mf.or.jp/wp/wp-content/uploads/2021/11/2021KishaHapyo119.pdf>)

1980 年代初めに計画され、1990 年から観測を開始した羊八井における日中共同研究 Tibet AS γ 実験は、UHE ガンマ線天文学という新しい扉を開けたとともに、最も大きな目的である宇宙線起源の解明に大きな前進を果たした。今後はさらに高い統計の観測と、銀河系中心方向を見ることが出来る南半球での観測が鍵となろう。

付記：

Tibet AS γ グループの日本側参加者の所属機関は、

弘前大学
宇都宮大学
日本原子力研究開発機構
東京大学宇宙線研究所 (*)
日本大学
東京都立産業技術高等専門学校
早稲田大学
国立情報学研究所
情報・システム研究機構
情報通信研究機構
神奈川大学
横浜国立大学
湘南工科大学
信州大学
甲南大学

中国側参加者の所属機関は、

中国科学院 国家天文台 (*)
中国科学院 高能物理研究所
中国科学院大学
清華大学
中国石油大学
河北師範大学
中国気象局
山東大学
山東農業大学
山東管理学院
南京大学
西南交通大学
西藏大学

である。(*) は日中の代表機関。

(2021年12月現在)

Tibet AS γ 共同研究は中国科学技術部と日本外務省の後援のもとで実施されている。日本側は文部省特別事業「国際共同研究」経費及び科学研究費補助金、文部省科学研究費補助金特定領域研究B（研究領域名「チベットにおける高エネルギー宇宙線放射天体の研究」）および日本学術振興会科学研究費補助金の一部により、中国側は中国国家自然科学基金（助成番号 11533007、11673041、11873065、11773019、11773014、11633007、11803011、11851305）、中国科学院高能物理研究所粒子宇宙物理重点实验室の支援により行われている。

Ⅲ－6．ヤンパーチン太陽中性子観測実験

名古屋大学名誉教授 村木 綏

1. 研究背景

宇宙線研究の主要な研究目的の一つに電子・陽子・原子核の加速過程の研究というテーマがある。太陽もフレア時に高エネルギーに加速した電子・陽子・原子核を放出する。(これらの高エネルギー粒子は太陽宇宙線と呼ばれている。英語で Solar Cosmic Rays (SCR) または Solar Energetic Particles (SEP) と呼ばれている。太陽表面の熱的プラズマがどのような過程を経て高エネルギー粒子まで加速されていくのか、太陽宇宙線の生成過程を理解するためには、紫外線、X線、電波、ガンマ線による“光学的観測”との比較が必須である。太陽分野では、最近話題に上っている多波長観測 (multi messenger astronomy) が以前から実施されていた。

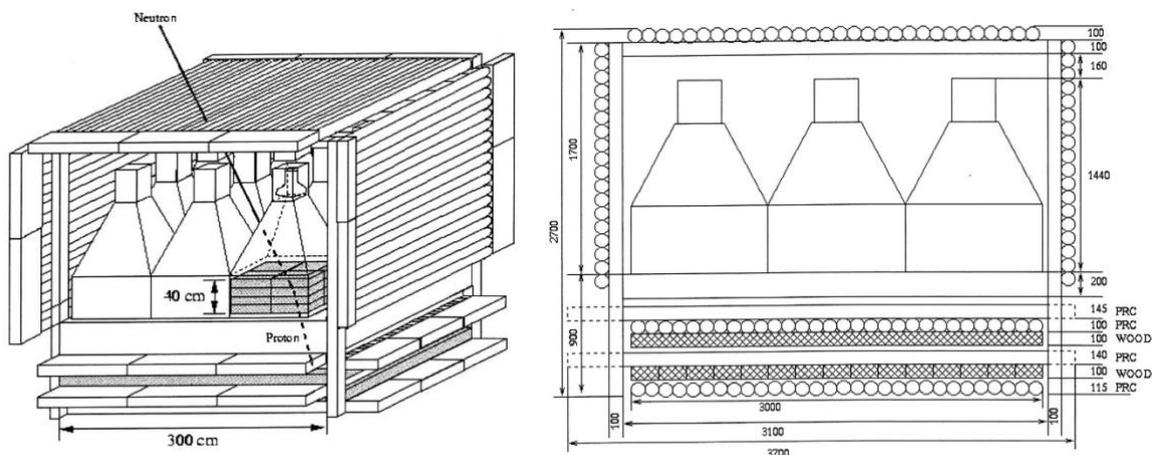
太陽の光学的観測結果を地球近傍で観測された高エネルギー粒子を比較する時、電子・陽子・原子核のような荷電粒子強度の時間分布と比較するのではなく、高エネルギーガンマ線や中性子といった中性粒子の時間分布と比較した方が有効である。その理由は電子・陽子・原子核といった荷電粒子は、惑星間磁場にそって地球近傍まで輸送されてくるため、発生時間情報がその時々々の磁力線の構造によって異なり、一義的に太陽表面における太陽宇宙線の加速時刻を決められないからである。それに対して、中性のガンマ線や中性子は太陽・地球間を直進するから光学観測と比較が可能となる。

しかし高エネルギーガンマ線は電子の制動放射によっても作られるので、電子の作ったガンマ線か陽子や原子核が中性の π 中間子(π^0)を経由して作ったガンマ線か区別できない例が出現する。一方中性子は、陽子や原子核によって作り出されるので、太陽宇宙線(イオン)の生成過程を知る有益な情報源である。しかし中性子を使う方法は一つだけ注意する必要がある。それは中性子が質量を有するため、光速度で太陽・地球間を走行できないことに起因する。そのため光学観測と比較する際、中性子(すなわちイオン)が瞬間的に太陽表面で加速されたのか長時間にわたり加速されたのか、中性子のエネルギーを測定しないと断定できない場合が発生する。従って中性子のエネルギーを計測できる観測装置を用いて観測することが望まれる。

2. 太陽中性子観測網の構想

上記の研究課題を達成するために用意された観測装置が、太陽中性子望遠鏡である。これは Solar Neutron Telescope の頭文字をとって、SNT とか SONTEL と呼ばれている。SNT を用いて、太陽からの中性子を地球上の高山で受信する観測網を整備しようという構想が1991年ころ日本の研究者から持ち上がった。その一環として、チベット高原の4,300mの羊八井(ヤンパーチン)観測所に、面積9m²の観測装置 SNT を設置するという計画が1,998年

頃提案された (図)。



太陽中性子は地球大気に侵入すると、大気の原子核と衝突して入射エネルギーを失い地球大気に吸収される。地球大気通過時の吸収量を減らし感度を上げるためには、観測装置は大気の薄い高山に設置することが望まれる。太陽中性子に対する大気の厚みは南中時が一番薄く、南中時刻を過ぎると太陽からの中性子信号は観測装置までより厚い大気を透過するため、吸収量が増え信号が衰弱する。

この問題を回避するためには、地球上で経度が 60 度ずつ異なる赤道近傍の高山に、観測装置を設置するのが理想的である。その地点には観測装置を運転するための電力が供給されているかどうか重要な設置条件となる。これらの条件を勘案して以下の各観測所に太陽中性子望遠鏡が設置され、国際太陽中性子観測ネットワークが形成された。チベットの観測装置はその一つである。

観測装置 SNT はボリビアのチャカルタヤ山 (5, 250m)、メキシコ、シエラネグラ山 (4, 800m)、ハワイ島・スバル望遠鏡内部 (4, 200m)、東大宇宙線研究所乗鞍観測所 (2, 770m)、チベット羊八井観測所 (4, 300m)、アルメニア・アラガツ観測所 (3, 200m)、スイス・ゴルングラート (3, 135m) に設置された。しかし 2020 年現在稼働している観測装置 SNT は羊八井観測所、乗鞍観測所、メキシコ・シエラネグラ山、ボリビア・チャカルタヤ山に設置されている観測装置のみである。

観測サイトを選択する際、赤道直下のアフリカのケニヤ山 (5, 200m) が理想的な位置にあるので、候補地としてケニヤの研究者と連絡をとったが、電気が来ていない等の理由で断念した。将来はインドネシアの高山やエチオピアの高地もよい観測候補地になるだろう。またチベットのより高い高度 (Ali, 5, 800m) で新しい宇宙線研究施設を構築する準備がされているので、そこに太陽中性子望遠鏡を設置するのも一つの可能性として考えておくべきであろう。

3. 羊八井観測所の太陽中性子望遠鏡

上記のような背景のもとに、中国チベット自治区の羊八井に太陽中性子望遠鏡を設置することになった。上記の構想は『高エネルギー宇宙線の系統的研究』というメインテーマの下で実施された。すなわち科学研究費補助金の特定領域（代表者：湯田利典・東大宇宙線研教授）のなかのサブテーマ、『太陽フレア中性子による粒子加速の研究』として科研費で実施された。この研究テーマは特定領域研究のサブテーマとして実施するが、実験の遂行と研究交流及び成果の発表を勘案し、2001年名古屋大学太陽地球環境研究所（現宇宙地球環境研究所）と中国科学院高能物理研究所との間の学術交流に関する協定を締結した。

具体的には1998年9月に土屋晴文・星田貴志（当時名大・大学院生）、大西宗博（現・東大宇宙線研）・小沢俊介（現・通信情報研）・片寄祐作（現・横浜国大）の各若手によって実際の建設が実施された（写真左）。大気の薄いチベット高地でのチェンバー組み上げ作業は大変な労力を要するものであった。そして2000年秋にはサブテーマの代表者の村木 綏が現地を訪れ、観測装置が正常に稼働しているか、装置の点検と調整を実施した（写真右）。



1999年度の科研費を用いて、太陽中性子望遠鏡の機能強化を図り、データ解析を推進した。具体的には9平方メートル太陽中性子望遠鏡に、気圧計を設置した。また今まで東西・南北合わせて25方向しか到来方向を区別できなかった装置を、81方向まで分類できるように拡張した。これにより大天頂角で入射してくる太陽中性子の方向も記録できるようになった。

ソフト面ではモンテカルロ計算を精力的に実施し、今までの中性子の地球大気伝播過程に使用される柴田モデルに含まれていなかったパイ中間子発生機能を含んだ、モンテカルロコードを作成した。これは陽子まで含んだ、低エネルギー陽子・中性子の地球大気中での伝播追跡を可能にした。1998年11月28日、設置されたばかりのチベット高原のSNTで観測された $X=3.3$ のフレアに伴った事象（後述）は、この新しいモンテカルロコードにより、中性子によるものと信頼性をもって言えるようになった。

ほぼ同じころ理研板橋に設置されていた中性子モニターも羊八井に移設された(写真)。
写真右側の建物に設置されている。



なお特定領域の代表者とメンバーは次の各氏である。

4. 研究実施体制

研究課題：太陽フレア中性子による粒子加速の研究

実施年月日 (1999-2004 年度) 予算総額 (1,060 万円)

代表者

柴田 祥一 (2002-2004) 中部大学, 工学部, 助教授 (20267909)

村木 綏 (1999-2001) 名古屋大学, 太陽地球環境研究所, 教授 (70013430)

分担研究者

宗像 義教 中部大学, 工学部, 助教授 (90131169)

龍岡 亮二 中部大学, 経営情報学部, 教授 (60227098)

松原 豊 名古屋大学, 太陽地球環境研究所, 助教授 (80202323)

増田 智 名古屋大学, 太陽地球環境研究所, 助教授 (10262916)

塚 隆志 名古屋大学, 太陽地球環境研究所, 助手 (90324368)

阿部 文雄 名古屋大学, 太陽地球環境研究所, 助教授 (80184224)

増田 公明 名古屋大学, 太陽地球環境研究所, 助教授 (40173744)

境 孝祐 日本大学, 生産工学部, 教授 (90059501)

柴田 祥一 中部大学, 工学部, 助教授 (20267909)

藤本 和彦 名古屋大学, 太陽地球環境研究所, 助教授 (10022617)

研究課題：高エネルギー宇宙線源の系統的研究

実施年月日（1999-2004 年度） 予算総額（4,860 万円）

代表者

湯田 利典 神奈川大学(2005) 特任教授 (60092368)

東京大学 宇宙線研究所、教授(1999, 2003-2004)

名古屋大学 太陽地球環境研究所、教授(2000-2002)

研究分担者

大西 宗博 東京大学, 宇宙線研究所, 助手 (10260514)

堀田 直己 宇都宮大学, 教育学部, 教授 (60157039)

山本 嘉昭 甲南大学, 理工学部, 教授 (70068112)

柴田 祥一 中部大学, 工学部, 助教授 (20267909)

荒船 次郎 大学評価学位授与機構, 教授 (80013415)

村木 綏 名古屋大学, 太陽地球環境研究所, 教授 (70013430)

5. 研究実績

ここでは研究実績として 2 例のイベントの論文内容について紹介する。

発表論文表題：A solar neutron telescope in Tibet and its capability examined by the 1998 November 28th event

発表雑誌：Astroparticle Physics 28 (2007) 119-131.

著書名：Y. Muraki, H. Tsuchiya, K. Fujiki, S. Masuda, Y. Matsubara, H. Menjyo, T. Sako, K. Watanabe, M. Ohnishi, A. Shiomi, M. Takita, T. Yuda, K. Katayose, N. Hotta, S. Ozawa, T. Sakurai, Y.H. Tan, and J.L. Zhang

発表内容:

太陽中性子望遠鏡 SNT 建設直後の 1998 年 11 月 28 日に X3.3 の巨大フレアが太陽で発生した。それに伴って羊八井観測所に設置されたばかりの SNT に、硬 X 線が最大値を示した時刻 05:40UT に同期して、太陽方向からのチャンネル(南方向)に統計的に有意な増加が認められた。本論文はこの増加について解析したものである。

このイベントの解析により太陽中性子観測装置 SNT の性能・感度の理解が具体的な事例に基づいて一段と進んだこと。さらにモンテカルロ計算が進められた結果、新たな知見が得られた。モンテカルロシミュレーションは土屋晴文（現、東海村原子力機構）によってなされた。（彼の学位論文となった。）

計算の結果はイベントがガンマ線によって作られた場合と、中性子によって作られた場合が、ほぼ等価で発生しうること、およびミュオンによっても増加信号が作られる可能性があることを示すものであった。（観測装置は中心部の装置を 100% anti-counter でカバーして

いないため、すり抜けが 20%程度あるからである。)

この問題の決着は、太陽衛星 Yohkoh に搭載されていた硬 X 線の peak 値、05:40UT を参考に区別することが現在では可能である。この論文では 3 つの可能性を示し、イオンの高エネルギーへの加速は、Yohkoh の軟 X 線望遠鏡の画像解析から、3 分以内に $\sim 100\text{GeV}$ まで短時間にイオンが加速されたと結論づけた。

今日的観点(2020 年現在)からは、このイベントはガンマ線によって作れたと考えるのが最適であると考えられる。その理由は次のとおりである。もし中性子ならば、最下段の装置まで透過できるエネルギーとして 270MeV 以上のエネルギーを有している必要がある。270MeV の中性子は光より約 4 分遅れて地球に到達する。ガンマ線なら、72MeV 以上あれば透過が可能である。観測データは明らかに 05:40UT に peak があり、05:43UT にはすでに信号の減衰がみられる。当時はガンマ線が地上の観測装置で受信できるということは半信半疑であった。最近の論文(以下に示す)で、その可能性があることが見つかったのも大きな理由である。ただし衝撃波によって 3 分以内に 100GeV まで加速された観測的証拠までは得られなかった。それは太陽 X 線望遠鏡の角度分解能が悪く、衝撃波を見分けられないからである。しかし将来 X 線望遠鏡の感度の上昇とともに、観測的に見える可能性がある。

発表論文表題 : Possible Detection of Solar Gamma Rays by Ground Level Detectors in Solar Flares on March 7th, 2011

掲載雑誌 : Proceeding of the Astronomical Society of Japan, 72-2 (2020) 1-17.

著書名 : Y. Muraki, J. F. Valdés-Galicia, L. X. González, K. Kamiya, Y. Katayose, K. Koga, H. Matsumoto, S. Masuda, Y. Matsubara, Y. Nagai, M. Ohnishi, S. Ozawa, T. Sako, S. Shibata, M. Takita, Y. Tanaka, H. Tsuchiya, K. Watanabe, and J. L. Zhang

発表内容:

2011 年 3 月 7 日の太陽フレアに伴って、メキシコ高山の設置されている太陽中性子望遠鏡にそれまでの太陽中性子の示す信号と異なる信号が受信された。計測器の信号に対する反応を simulation によって詳細に検討した結果、これは太陽フレアに伴って作られた高エネルギーガンマ線による信号であると解釈するのが最適であることが分かった。太陽からの高エネルギーガンマ線の受信が地上(高山)で受信できることを示した最初の論文となった。また同じような傾向を示すイベントが 2011 年 9 月 25 日にチベットに設置されている太陽中性子望遠鏡でも受信された。

追記 :

本節を執筆された名古屋大学名誉教授 村木 綏 氏は、2022 年 3 月、CRC から第 4 回宇宙線物理学功労賞を受賞されました。授賞理由は、「宇宙線物理学分野から宇宙物理学、太陽地球物理学など関連する広範な分野の研究における主導的な貢献により、宇宙線分野の拡大と活性化に寄与された功労に対して」とされています。(文責 太田周)

〈飛翔体による宇宙線研究交流－1〉

Ⅲ－7. 観測用気球の開発と東シナ海横断気球

東京大学名誉教授・JAXA 宇宙科学研究所名誉教授 西村 純

中国で大気球による宇宙科学観測を始めることを最初に提唱したのは、1977 年における日本の訪中団であった。(Ⅱ－1. 日本宇宙線研究者の訪中 参照)

日本では、既に大気球の計画は宇宙科学研究所で本格的に発足し、ほぼ 10 年の時を経て、恒久的な気球基地として三陸気球観測所が設置され、年間 10 数機の気球観測がほぼ定期的に行われて居た時期であった。

Ⅲ－7－1) プラスチック気球の開発と整備

このような経験を踏まえて、中国において気球による宇宙科学観測の活動を始めれば、中国での宇宙科学観測研究の基盤を築き、中国国内で其れまであまり交流のなかった他の分野での研究者の交わり、人材養成を促すであろうと考えたからである。

具体的には日本の宇宙研と同じように、中国においてプラスチック気球を製作し、放球し観測を行うシステムを構築する部門を作ることにあった。

日本側の提案を受けて、中国側としては (IHEP (高能研)) が中心となって、所長の張文裕、及び所員の願逸東、李惕碚氏らが検討したようである。

また具体的には中国の研究者による三陸気球観測所の見学が行われ、実際の国内の放球実験には願逸東を責任者として宇宙科学気球観測の計画がすすめられるようになった。

最初の気球の放球基地は北京と天津の中間の「香河」に設けられ、テストフライトがいくつか行われた。Fig.1.に示すようにこの基地は北京から南東 70 km の地点にあり、交通の便は極めてよい利点があった。1977 年から 1988 年までのことである。「香河」は昔北京から中国の南部杭州に向けての大運河に沿った地域であり、付近には多くの小沼地が存在している。気球放球に不具合があったときに、地上での被害を最小限にとどめるためによい地区だということで選択されたのではないかと思われる。

日本でも宇宙研で最初の放球場として、北浦と霞ヶ浦に囲まれた大洋村で始められたが、似たような理由で選択されたと推測される。

この緯度では夏季には高度 10 km 付近の上空では東風が卓越するので、上昇した気球は北京上空に向けて戻ってくる、北京で重要な集会があるときにはまずいということで、次の気球基地を探すことになった模様である。

「香河」で放球が難しい時には気球放球基地として北京の南西部 200 km 程度の位置にある「石家荘」空港の一部を一時的に借りることにしていた。

「石家荘」は私も一度訪れる機会をえたが、北京からは約 200km の高速道路でつながっており交通の便も良い場所であった、しかし「石家荘」空港は後に中国での空路の要衝となったため、気球の放球は行う事ができなくなった。

日本と同じく中国においても、アクセスの良いところは気球基地としては不適當である。



Fig.1 中国の気球放球場

- 1977- 1988 年 香河基地、石家荘基地
- 1988 年以降 四子王旗基地、有人宇宙船神船 XX 号の着陸点と共存

註：香河基地:北京から約 70 km の地点で交通の便はよいが、北京上空に気球が飛来する可能性が高く、その点望ましくない

私が「石家荘」空港を訪問した 1980 年代後期の中国では既に国際共同実験もおこなわれ、気球を用いた微小重力の実験を西ドイツと準備中と伺った。また国内の観測では、北京天文

台の観測器での太陽面磁場の大変精密な観測の計画が進行中とうかがった。

このような経験を経て、数年後には内蒙古の東側の Siziwangi (四子王旗) に気球基地を設けることになり、北京からのアクセスは不便に成った。この基地は、中国の有人宇宙船の神船 xx 号の着地点として使用されている一部を借りているのであろう。夏の季節には気球が水平浮遊高度 25 km 以上に達すると、偏東風に乗り西側に流されるが、これは広大な砂漠の上空に当たり、安全性からも最適な場所といえる。

北京オリンピックは 2008 年に開かれたが、終了後にこの施設跡地の一部に宇宙開発関係の施設が作られた。西村は訪中の際にこの施設に訪問する機会を得、その広大な施設に驚かされたが、気球製作工場など、満足すべき施設が整えられていた。プラスチック気球については最大級の数十万立方メートルの気球が製作可能な施設を整えていた。ただし、当時中国では大型気球より飛行船に興味に移ったようで、飛行船の試作を行っているところであった。

気球工学の工学的研究については我々が訪中した際の討論や彼らが訪日した際の議論や視察、日本からの文献としては宇宙研の大気球シンポジウム報告(日本語)が参考になっていたらしく、彼らが詳しく読み込で議論していることもわかった。

私は 1992 年に宇宙研を退官したときに、宇宙研で私が関係した気球の邦文の研究報告は宇宙科学研究所報告の論文として纏めて気球工学論文資料集として一冊の本に纏めた。気球工学についてまだ発展していない 1960 年代から 1990 年に到る我が国における気球開発の経緯を知ることが出来る。

約 50 項目の論文と 700 頁の内容である。

中国の願逸東(Gu Yi Dong)さんに、これは中国の気球の発展の参考になるのではないかと話した所、すべて中国語に訳して中国での教科書にしたいとの申し出があり、数年前に全訳を完成したとのことであった。

日本での開発の細かい成果が中国において活用される事を期待してやまない。

なお G u さんは気球開発の責任者として成果を上げてきたが、その成果により、次第により大型のプロジェクトの責任者となり、現在は中国のスペースステーションの責任者のひとりと成っている。

将来構想としては蒙古での日中共同研究の長時間観測、等の実現を期待しているところである。

Ⅲ-7-2) 東シナ海横断気球 (日中共同研究)

中国におけるこのような気球施設の整備が行われて居る一方、中国の天文学研究者、上海天文台、南京の紫金山天文台の中心とするグループに、宇宙空間中心(SSTC)の一部の研究者も加わって、日本の気球をもちいて、宇宙科学観測に取りかかりたいと言う希望が伝えられてきた。

また、日本においては日本から放球して東シナ海を横断し、中国大陸で回収する長時間フライトの計画も検討されていた。ロケット打ち上げ場のある鹿児島内之浦地区から放球して東シナ海を横断、中国の上海地区で回収しようという計画である。

日本と中国大陸との間の東シナ海は巾がほぼ 1000km あるので、気球高度で秒速 20m の東風で横断すれば、ほぼ 15 時間の長時間観測が可能になる

但しこの場合は地球の曲率のため日本の受信点から中国上空の気球は地平線野下になるので中間受信点が必要になる。(高度 30 km の気球では距離 500 km 以上では水平線の下になる)

この計画を実現するためには、どの時期に鹿児島地区から放球した気球が東シナ海を横断しどのような経路をたどりに上海付近にたどり着くかの推定が必要である。

1982 年には日本では其れまで高層風のデータを元に解析を行い、夏の季節には気球高度 25 km か 35km で 100%に近い確率で上海付近に到達できることを確かめた。(文献 1)。

気球は鹿児島の内之浦に有る宇宙研の宇宙空間観測所から放球すると想定したが、ロケット打ち上げの台地は山の上にあるため風がやや強く、放球にやや難があるので、風の弱い台地の入り口の付近の駐車場から放球することにした。

内之浦の西側は大隅半島の小山が繋がっているので、気球が西に進行すると、視野から外れることになる。大隅半島の西にある「大根占」(図, 2) に中継の受信点をおくことにした、

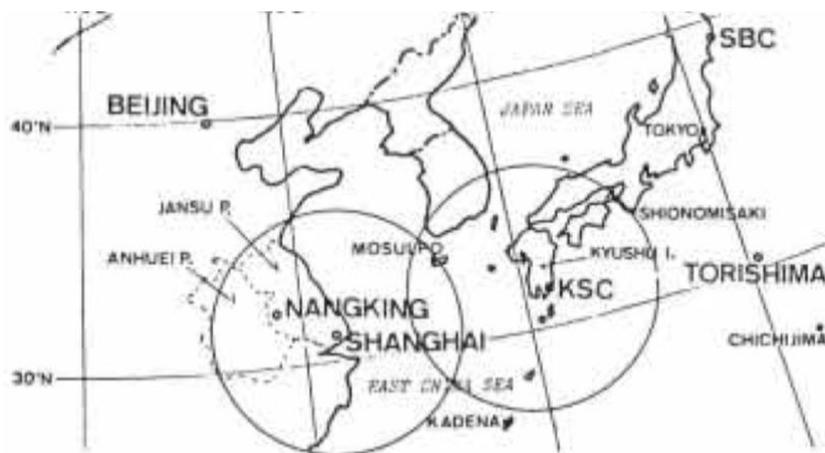


Fig.2. 東シナ海横断気球関連地図。

図中の円は鹿児島及び上海を中心とする半径 500 km の円である。

註: 高度 30 km の気球では地上からの受信範囲は約 500 km である。

中国側は、上海天文台の屋上(121° 25'38" E, 31° 11'25" N)と上海の東南東にある南犯(121° 54' E, 30° 57'54"N)に移動観測車を置き、また「大根占」の移動受信車から上海までの東シナ海の上空の追跡では、日本と中国のほぼ中間点で、中国側と受信の引き継ぎを行い、以後の追跡観測を行うこととした。



Fig.3.中継受信点大根占受信点（大隅半島の西側）

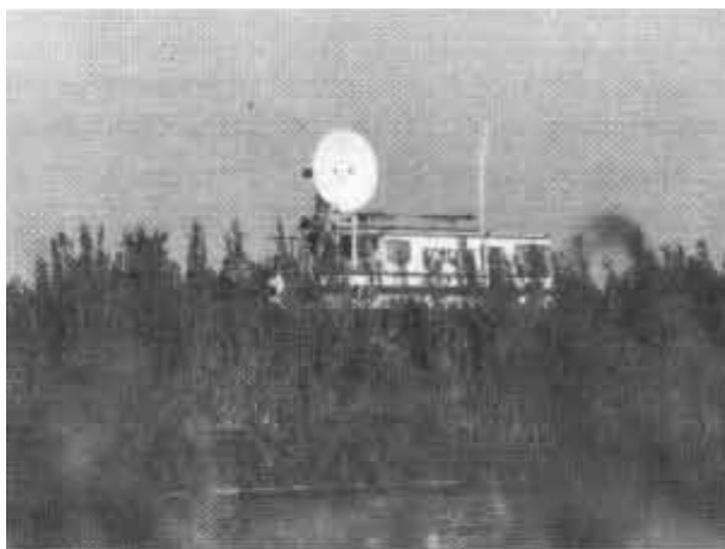


Fig.4.中国側受信点は上海天文台の屋上と、同市付近の南犯市に新設した移動観測車を置いた。写真は南犯市におかれた中国製移動観測車である。

以上の準備は 1984 年頃すでに完成していたので、1985 年には日中政府間の第 3 回日中交流委員会が北京で開かれた時に、東シナ海横断共同研究として政府間の計画として認められる事となった。

●東シナ海日中横断気球観測の詳細について

1. 実行期間：1986 年、1987 年、1988 年の 3 年間

2 計画に関与した機関：

日本側：宇宙科学研究所、東京天文台、名古屋大学、大阪市立大学、
神奈川大学、

中国側：上海天文台、南京紫金山天文台。空間科学技術センター(SSTC)

3. 放球地点

鹿児島宇宙空間観測所

4, 回収地点； 中国上海市付近

5, 気球観測状況

3 年間に 7 機成功、中国まで飛翔し回収、平均飛翔時間： 10 時間-1 8 時間

3 機は気球上昇中破壊

各年度における詳細は以下の通り

1) 1986 年： 気球飛翔、追尾、回収の試験、2 機 全機成功

7 月 25 日 B5-C1 試験飛行 18 時間 浮遊回収 (宇宙研)

7 月 30 日 B30-C3 試験飛行 12 時間 浮遊回収 [中国]

予定した 2 機とも放球と追跡回収のテストフライに成功し、1987 年及び 1988 年の気球観測に進むこととなった。観測へ進むこととなった。



Fig.5.内之浦宇宙空間観測所での気球放球

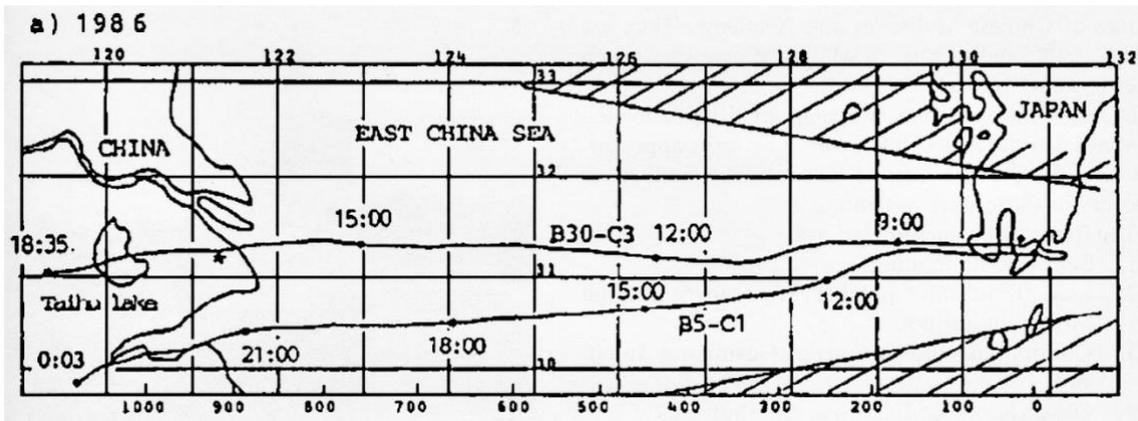


Fig.6. 1986 年の気球航跡



Fig.7. 上海近郊は人口密度が高いせいか、パラシュート降下後 2, 3 時間ですべての観測器は目視で発見され回収された。

1988 年は山中に落ちたが、幸いその年からアルゴシステムを用いたので、観測器は比較的簡単に発見され、回収された。

2) 1987 年 : 4 機放球 内 成功 2 機 : 失敗 2 機

成功

7 月 29 日 B15-C2 NO 観測 17 時間 浮遊回収 名古屋大

8 月 3 日 B30-C5 銀河赤外線 10 時間 浮遊回収 上海天文台

失敗:

8 月 7 日 B50-C6 X 線星 Xe カウンター紫金山天文台+ 地上 BB

8 月 10 日 B30-C8 恒星赤外スペクトル 東京天文台

上昇中気球破壊、志布志湾回収

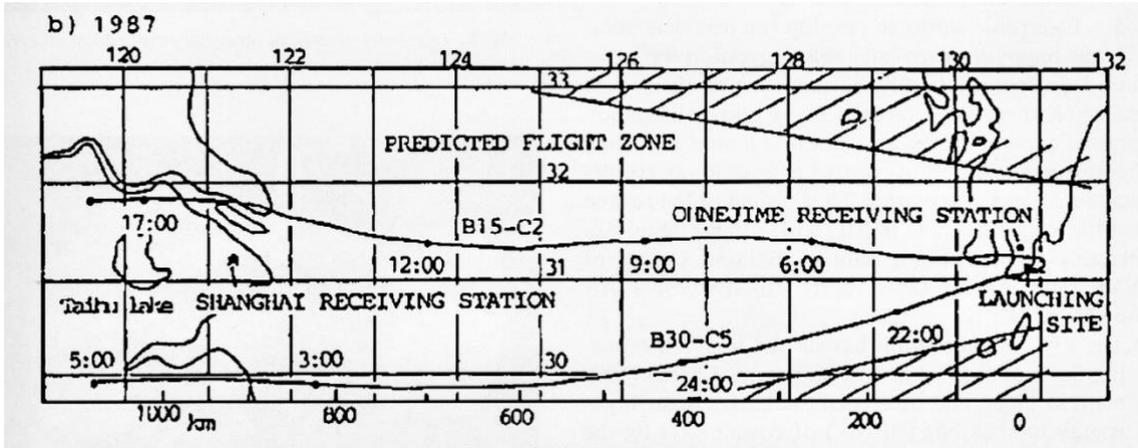


Fig.8. 1987年の気球航跡

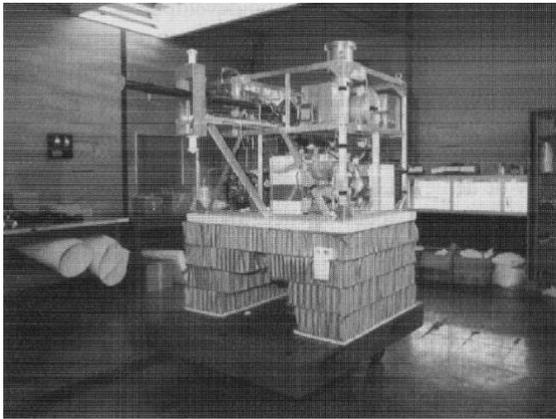


Fig.9. 大気中のNO成分観測器
名古屋大学

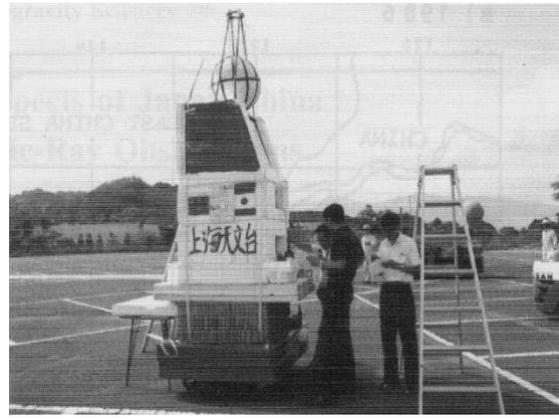


Fig.10. 銀河赤外観測器
上海天文台

3) 1988年： 気球飛翔予定：4機 内成功3機、失敗1機

1988には回収にアルゴス回収システムを採用

成功

8月16日	B50-C6	X線星	15時間	紫金山天文台+大阪市大
8月20日	B30-C7	銀河赤外線	13時間	上海天文台
8月23日	B30-C9	一次電子	16時間	宇宙研、神奈川大学

失敗

8月25日	B30-C8	恒星赤外線スペクトル	東京天文台
-------	--------	------------	-------

上昇中気球破壊

実験の詳細は文献2及び3に詳しいが、何れも可成りレベルの高い観測で、2,3気球の破

壊があったが、最初の日中の国際共同観測としては、良い成果が得られたと考えている。

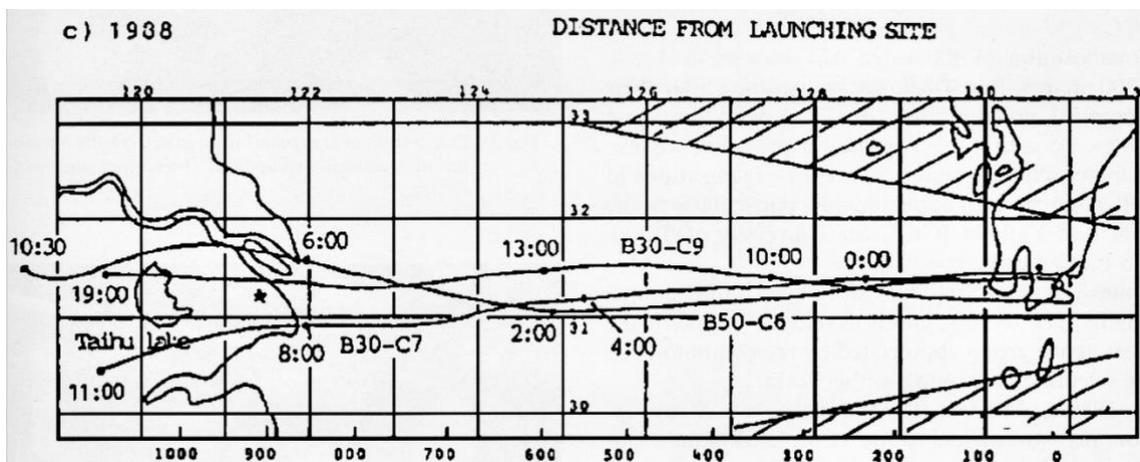


Fig.11.東シナ海横断気球の飛翔経路 1988 年



Fig.12. 一次電子観測器 宇宙研、神奈川大、宇宙線研; 1988 年

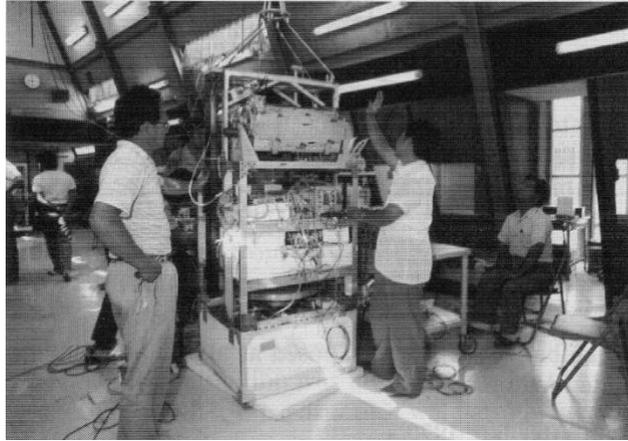


Fig.13. X線星観測高圧Xeカウンター；紫金山天文台,大阪市大
1988年

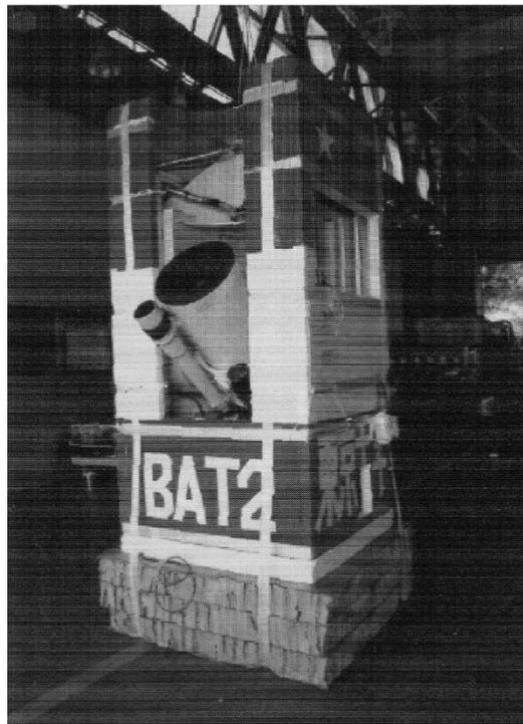


Fig.14. 恒星赤外スペクトル観測器 東京天文台; 1988年
#気球破壊のため観測は出来ず。海上で回収した

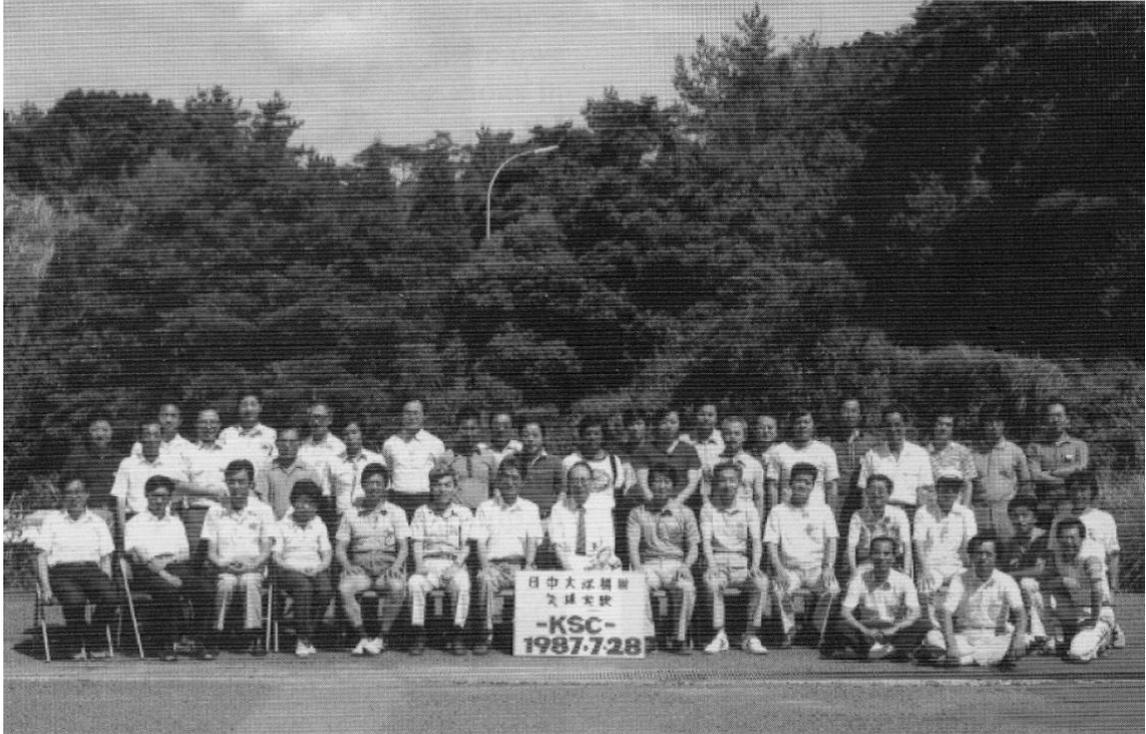


Fig.15. Collaborative team in 1987. 日中大洋横断気球実験 1987.7.28
日本マイクログラビティ応用学会誌 Vol.24, No.1,2007
第6回日中微小重力ワークショップ特集 (佐賀県武雄市)

日中参加機関の詳細

日中共同研究に参加機関の詳細は、中国の文字が日本と違う物もあり、書きにくいので、改めて詳細を高能研の願逸東(Gu Yidong)さんに知らせていただいた、以下に Gu さんからの手紙を一部転載する。

注1. 願逸東(GU Yidong)からの中国側参加者のメモ

- 1) The first Chinese balloon base in Xiang He (香河) County, He Bei (河北) Province (1977-1988), located about 70 km southeast of Beijing. The Shijiazhuang (石家庄) airport was later served as a temporary distribution (3 times). The current permanent balloon base of China is located in Inner-Mongolia's Siziwangqi (四子王旗), a small town.
- 2) The sponsors to developing scientific balloons was Gu Yidong (願逸東), Li

Tiabei (李惕碚) and Lu Zhuguo (陸柱国), the Institute of High Energy Physics (IHEP). Since 1977, the main members of the Chinese balloon Project were Gu Yidong ((願逸東, IHEP) and Jing Yi (荆其一, IAP) and Zhang Yachen (張垂臣, Center for Space Science). It received support from Professor Zhang Wenyu (張文裕), Director of the Institute of High Energy Physics (IHEP), Professor He Zehui (何洋慧), Deputy Director of IHEP, Professor Huo Anxiang (霍安祥), Director of the Cosmic-ray division. Professor Zhou Xiuji (周秀冀), Deputy Director of the Institute of Atmospheric Physics (IAP),

3) The China-Japan trans-ocean balloon flying cooperation: in china side leaded by Professor Ye Shuhua (叶叔華), Director of Shanghai Observatory (SO). The main participants: space science center Zhang Yachen (張垂臣), Zou Huicheng (当惠成 SO), Wu Zhongqi (吴沉奇 SO), Hang Hengrong (杭恒荣, PMO).

4) In 1976 (or 1977), a cosmos ray delegation from Japan visited the Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences. Professor Nishimura suggested that China could develop scientific balloon and conduct research on cosmic rays and high-energy astrophysics by balloons, which would play an important role in promoting China's determination to develop scientific balloons. A scientific balloon delegation of China visited ISAS, Japan in 1986. They are warmly received and established close relations in ballooning. Also Professor Nishimura supported and received Chinese visitors (姜樞華、願逸東) to carry out research in ISAS, further strengthening the exchange and cooperation between the two sides.

文献

文献 1. 東シナ海横断気球の実現性に関する気象学的考察

宇宙科学研究所報告. 特集 8 号 P 15、1983,

山中大学、西村 純、秋山弘光

文献 2. 日中大洋横断気球、

宇宙科学研究所報告. 第 20 号、P 3, 1987

西村 純、秋山弘光、太田茂雄、藤井正美、山上隆正、

狛 豊、並木道義、岡部選司、松坂幸彦、山中大学

高成 定好、渡会 実雄、広沢 春任、槇野文命

文献 3. 日中大洋横断気球

宇宙科学研究所報告. 第 24 号、P 3, 1989

-----第二第3年度の実験及び3年間のまとめ-----

西村 純、奥田治之、広沢 春任、槇野文命、
矢島信行、秋山弘光、太田茂雄、藤井正美、山上隆正、
並木道義、岡部選司、松坂幸彦、小松 錦司
高成 定好、白坂友三、池田光之、 山中大学

- 文献4. 日本マイクログラビティ応用学会誌
JASAMA vol. 24, No. 1, 2007 、
URL: <http://www.jasama.infp/>
第6回日中微小重力ワークショップ特集
佐賀県武雄市

〈飛翔体による宇宙線研究交流－2〉

Ⅲ－8．CALET実験

—飛翔体による宇宙線観測に関する日中交流の歴史—

早稲田大学名誉教授、招聘研究教授 神奈川大学特任教授 鳥居祥二

はじめに（前史）

中国との宇宙線共同研究の歴史は、東京大学宇宙線研究所やその前身である東京大学原子核研究所宇宙線部を中心にして、チベット高原における大面積エマルジョンチェンバー実験や空気シャワー実験の長い歴史（本稿Ⅲ）があるが、筆者もその黎明期からチベットを含めて北京などに10回以上の中国訪問を行い、共同研究に携わってきた。改革開放が始まったばかりの1980年代の中国は、まだ日本からの一方的な支援が必要で、共同研究の初期段階では観測装置やデータ解析のすべてにおいて、日本人研究者が大きな貢献を行なっている。

飛翔体観測における、日中の共同研究としては、日本側が1960年代から実施してきた気球実験を中心に提案が行われ、宇宙科学研究所の西村純教授（当時）らによる東シナ海を横断する気球実験が1996～1988年に実施されている。その後はしばらく、日中間の共同研究としての飛翔体による宇宙線観測は行われていなかった。一方、2000年に入ってから中国の科学技術の発展は目を見張るばかりであり、ロケットや衛星技術においても、回収衛星を用いた科学実験などにおいて日中交流が開始されている。我々も衛星観測による日中の宇宙線共同研究を開始するために、まずは回収衛星実験に関する共同研究を開始することになり、その後の本格的な宇宙空間での宇宙線観測に備えることになった。

以上のような状況の中で、中国側の文革以降の新たな世代の研究者との日中間の研究交流が盛んになり、中国側から多くの優秀な若手研究者が日本に滞在して宇宙線研究に参加し、帰国後に中国を代表する研究者として活躍している。本稿では、その一つとして、日本と中国双方で世界をリードする宇宙空間における宇宙線観測を実現するに至った、筆者と中国科学院紫金山天文台の常進(Chang Jin)教授との日中交流の歴史を中心に解説する。

Ⅲ－8－1）日中における飛翔体観測の概要

日中共同研究の経緯を紹介する前に、その前提となる日中双方における研究の概要についてまず説明する。

日本では、筆者を中心として気球による高エネルギー宇宙線電子成分の観測にブレークスルーをもたらすため、シャワーイメージ解像型カロリメータ(BETS: Balloon Borne Electron Telescope with Scintillating Fibers)を開発して、1993年頃から国内における気

球実験を開始した。そして、国内では不可能な長期間観測を目指して、南極周回気球実験 (PPB: Polar Patrol Balloon) を 2004 年に実施して、2 週間の気球飛翔により TeV 領域に迫る観測を達成した。さらに、この成果をもとに国際宇宙ステーション日本実験棟「きぼう」に搭載するカロリメータ型電子線望遠鏡 (CALET: CALorimetric Electron Telescope) の研究開発 (R&D) を行っていた。CALET は、その後 JAXA によって国際宇宙ステーション日本実験棟「きぼう」の船外実験プラットフォームにおけるポート占有実験として承認されて、2015 年 8 月に種子島宇宙センターから打ち上げられ、現在まで観測を継続している。CALET は宇宙空間での本格的な宇宙線観測装置としては日本で最初の観測プロジェクトであり、国際的にも大きな成果が期待されている。

中国では、先にも述べたように、2000 年以降のロケットや衛星技術の進歩は目覚しく、技術的には宇宙空間での科学観測実験が可能なレベルに達する状態であった。しかし、自前の観測装置の開発はまだ難しく、X 線観測に関する提案などが行われていたが、長らく実現しなかった。中国科学院が初めて科学衛星観測を実現したのは、後ほど紹介する暗黒物質探査衛星 (DAMPE: DArk Matter Particle Explorer) である。この装置は、暗黒物質を宇宙線観測により探査するという実質的には宇宙線観測装置で、2015 年 12 月に打ち上げられた。DAMPE の研究代表者は常進教授であるが、彼は日本学術振興会の外国人特別研究員として、2002 年に私が神奈川大学在職中に招聘し、PPB-BETS の気球実験や CALET の開発に関して共同研究を行った研究者である。このように、日中学術交流により双方の国の研究者の刺激と協力で世界をリードする宇宙空間での宇宙線観測が実現したことの意義は大きいと考えている。

以下に、年代を追って現在までの経緯を解説する。

Ⅲ-8-2) 日中共同研究の歴史

2-1. 電子観測における交流の始まり (2001 年-2005 年)

中国が宇宙空間での宇宙線観測を始めるに至った経緯は、偶然とも思われる出来事が始まりである。西村氏が日中二国間の宇宙線共同研究に大きな貢献をされたことは別稿にも詳しいが、そのため中国からの招待による講演を何回も行われていた。西村先生が紫金山天文台で宇宙線電子観測の話を、1990 年代の後半にされたことがある。その時、常進教授はまだ研究員であったが、先生の話に大変感銘をうけて、ぜひ日本で電子観測の研究に参加したい、との強い希望を先生に伝えられた。そのため、西村氏 (当時、神奈川大学教授) から私に常進氏 (当時、紫金山天文台准教授) を日本学術振興会の外国人特別研究員として神奈川大学へ招聘できないかの依頼があり、2001 年 8 月のハンブルグでの第 27 回宇宙線国際会議 (ICRC) の時に、直接話をする機会を持つことになった。当時、常進氏はマックスプランクに滞在していたが、その後に日本での研究に強い情熱を持っていることを感じた。

そのため、日本学術振興会に外国人特別研究員の申請を行い、研究課題「高エネルギー宇宙電子、ガンマ線の観測的研究」として、2002年8月1日から2004年2月29日にかけて神奈川大学で研究を行った。当時は丁度、PPB-BETSの観測(2004年1月4日-17日)やCALETの開発研究を実施している時期であり、これらのテーマを中心に共同研究を推進した。CALETには大変興味を持っており、中国を含む米伊との国際共同研究として初期の提案書には参加したが、国際宇宙ステーションに参加していない中国の研究者の参加は簡単でないことが判明して、常進教授は同時に中国におけるCALETと同規模の衛星実験を提案する準備をしていた。この時期に彼が得た装置開発やデータ解析に関する経験が、DAMPEによる観測の実現には大きく貢献していることは間違いないと思われる。

2-2. 日本学術振興会二国間交流事業 I (2006年4月-2008年12月)

「高エネルギー電子、ガンマ線の衛星観測」

筆者は、2005年に宇宙線研究で長い歴史を持つ早稲田大学に転職したが、日中の宇宙空間での宇宙線共同観測を早期に実現する方法として、中国側から提案のあった中国回収衛星を用いたエマルジョンチェンバー実験を、日本学術振興会の二国間交流事業(日中共同研究)により実施した。日本側では西村氏の発案により、衛星軌道でのバックグラウンド測定も兼ねて電子観測用エマルジョンチェンバーの製作を行うことになった。そして、Fig.1にあるような、衛星の搭載条件を満たす性能を持つ装置として完成し、2006年9月9日から24日に実践8号回収衛星による約15日間の観測が実施された(Fig.1.)。

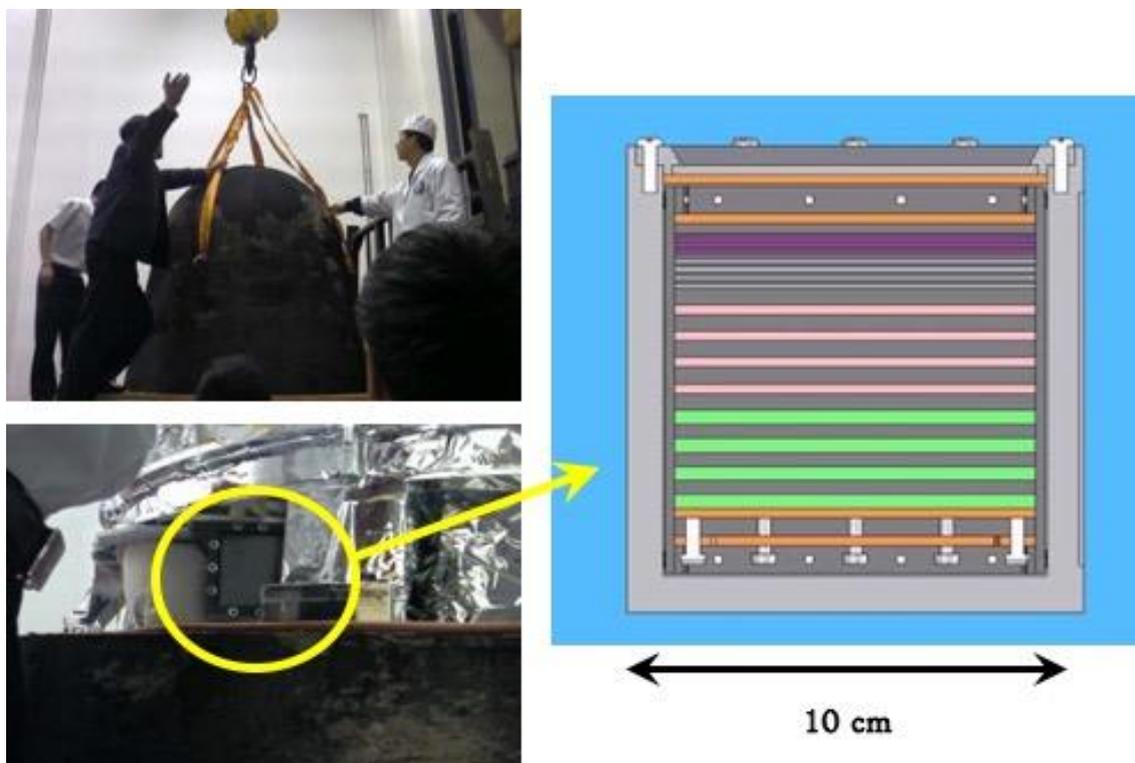


Fig. 1. 中国回収衛星に搭載されてエマルジョンチェンバー。

左上図は、衛星搭載の様子で、右下図は搭載されたエマルジョンチェンバー。右図は、日本側で製作したエマルジョンチェンバーの側面からみた模式図。高感度の X 線フィルムと原子核乾板を鉛板と交互に重ねて構成されている。

回収後は、税関の検査も中国側の要請でフリーパスして即時に日本に送られて、直ちに原子核乾板、X 線フィルムの現像を、東京大学宇宙線研究所の施設を利用して行った。装置サイズは、 $7.8 \times 7.8 \text{cm}^2$ の面積で厚さが 6.86cm (約 8 r.l.) で重量は 3.55kg と小型の装置であったが、TeV 領域のシャワーイベントを観測することができた。一方、衛星軌道でのバックグラウンドにより検出限界が 4TeV 以上となり、エマルジョンチェンバーによる衛星実験では、電子観測において十分な成果を得ることが困難であることが検証された。しかしながら、この観測により日中共同による宇宙科学分野での初めての観測が実施することができた意義は大変大きいといえる。

なお、この観測の実現には中国における回収衛星実験の中心人物の一人であった願逸東 (Gu Yidong) 氏 (当時、中国科学院光電研究所所長) の助力によるところが大きかった。Fig.2. には、西村先生と筆者が光電研究所を訪問した際に願逸東氏、常進氏と撮った写真を示してある。



Fig. 2. 2011 年 1 月に中国科学院光電研究所を訪問した時の記念写真。
左から、常進、願逸東、筆者、西村純、各氏。

2-3. 日中微小重力科学の国際ワークショップ参加 (2005年-2008年)

少し話が前後するが、実は中国回収衛星を用いた実験は、すでに微小重力科学の分野で進められており、2005年に佐賀県の武雄温泉において第6回の日中微小重力科学の国際ワークショップが開催されて宇宙線観測に関する発表を日中双方で行っている。続いて、2008年に中国の杭州において開催された第7回の会議にも、日本側から西村先生と筆者等が参加して、宇宙空間における宇宙線の日中共同研究の議論を行なった。

微小重力科学の共同研究では、中国側から中国科学院宇宙空間研究所、日本からは JAXA が主幹事として参加しており、その当時としては唯一の宇宙科学分野における日中交流事業であった。宇宙線観測は JAXA 宇宙科学研究所には関連部門がないため、研究総主幹であった小杉健郎教授（当時）のご尽力により、宇宙線分野もこの日中交流事業の一環として参加することになり、この国際ワークショップで交流を重ねた成果が、先に述べた回収衛星実験の実現につながっている。

2-4. 日中における宇宙空間における宇宙線観測の実施 (2009年-現在)

2-4-1. 宇宙線観測計画の日中における承認 (2009年)

我々は気球実験では不可能な高精度な TeV 領域での電子観測を実現するため、日中双方で提案を行った結果、日本側では 2009年9月に CALET が承認された。それまでの提案書では、2トンクラスの大型ペイロードの提案であったが、このような大型装置の搭載には、多額の予算と長期にわたる検討が必要であるため、装置を 650kg に軽量小型化して承認されている。この提案では、単に装置を小型化するのではなく、装置設計の高度化により観測性能を最大化するとともに、当初の3年間の観測を5年間（以上）にすることにより、観測量を維持することに成功している。

一方、中国側でも中国科学院による科学観測衛星の実現が図られており、2009年11月に行われた、Xiangshan Science Conferences（香山科学会議）of No.361 において、常進教授提案の DAMPE について議論され、私が招待されて日本の計画を紹介した。この時点では、双方がお互いの計画に参加していずれも日中の共同研究として提案していたが、その後 DAMPE が承認されるに至って、それぞれ独立した国際共同研究として、装置開発を実施することになった。ちなみに、DAMPE は我々が初期に提案した大型観測装置とほぼ同規模であり、中国側では日本では実現が困難であった装置が実現したことになる。

2-4-2. 日本学術振興会二国間交流事業 II (2011 年 4 月-2013 年 12 月)

「高エネルギー宇宙電子線観測による近傍加速源・暗黒物質の探索」

日中双方での観測計画の承認を受けて、相互の観測計画に関する内容検討のための議論を行った。その主なものとして、PAMELA, AMS-02 の観測による陽電子過剰の起源として提案された暗黒物質の探索と、TeV 領域における宇宙線の近傍加速源の検出が大きな目標となっている。そのため、観測装置性能について情報交換を行うとともに、CERN でのビーム実験などにより相互の装置の性能実証を実施した。

2-4-3. 観測装置開発と打ち上げ (2010 年-2015 年)

日中双方における観測ミッションの承認後は、観測装置の開発においてお互いに次のような協力関係を持ち、日本と中国におけるメーカーの特性を活かした共同作業を実施した。

- CALET に用いる酸化タンゲステン鉛 (PbWO_4) の中国科学院珪酸塩研究所での製造
 - DAMPE に用いる光電子増倍管とダイノード読み出し回路の浜松ホトニクスでの製作
- 装置開発は順調に進行して、CALET は 2015 年 8 月 19 日に種子島宇宙センターより、HII-B ロケットにより「こうのとり」5 号機に搭載されて打ち上げられ、国際宇宙ステーション日本実験棟「きぼう」船外実験プラットフォームの 9 番ポートに設置された。DAMPE は少し遅れて 2015 年 12 月 17 日に酒泉打上場から長征 2D ロケットにより、中国科学院の最初の科学衛星として打ち上げられた。いずれのミッションもすでに約 5 年間の観測を順調に実施しており、当初目的通り電子や陽子の観測成果が国際的に著名な雑誌に発表され、宇宙線観測にブレークスルーをもたらす成果として、全世界的に注目されている。

なお、常教授はこの成果により、中国科学院国家天文台台長に就任しており、中国科学院の院士に身分を授与されている。このことは、日本での研究生活が大いに貢献しており、人事交流による研究事業の成果として特筆されるべきものと考えている。