

杉本健三の孫弟子達の彷徨記

延與秀人・関本美知子

理化学研究所仁科センター・高エネルギー加速器研究機構

1. はじめに

日本物理学会の原子核談話会でつるしあげを食う核研所長という姿が、はじめて出会った杉本健三さんであった。杉本さんが1978年から1983年まで東京大学原子核研究所の5代目所長を務めた当時は、ニューマトロン計画がのるかそるかの時期であり土地問題などで厳しい追及を受けていた。原子核談話会があんなに白熱したことはあれ以来無いように思う。ニューマトロン計画は実現しなかったが、時を経てGSIのFAIRの青写真を見た時、これはニューマトロンだと思った人は多いだろう。それほどまでに先進的計画であったのである。中井浩二さんは、杉本弟子としてニューマトロンの提灯持ちの役割を担ったと言っていたが、その後、中井さんからいろいろな教えを受けるなかで、教えの裏にだんだんと杉本さんが透けて見えてきた。私たちは、杉本先生の不肖の孫弟子と自称したい。

中井さんはある時、「自分がもっとも誇らしく思っているのは(Nuclei, The Playing Field of Physics第一巻の表紙を飾った) ^{17}F の実験である。でもあの物理はもうやめたんや」と言って私達をKEKへ連れて行った。そこは私達にとってのまさに『playing field』であった。そこで私達は測定器や回路、データ収集システム、そしてデータ解析について、まさにイロハから教わりつつ、実験屋として育っていった。中井さんを通して垣間見た杉本健三先生とその弟子たる中井浩二先生から学んできたことをここで振り返ってみたい。

2. だんだんよくなる法華の太鼓 (KEK-PS $\pi\mu$ 実験時代)

KEKへ連れて行かれた最初の頃(1980年頃)は、中井さんに率いられKEK-PS 東カウンターホール(まだ北カウンターホールは無かったので単にカウンターホールとよばれていて、まだ奥行き50mの実験棟であった)に新設された $\pi\mu$ ビームラインで実験していた。当時は、食事と言えばKEKの前の東大通りを南に行った「大番」(今は無くなってしまったが安いなぎが食べられ、学生達には貴重な鰻屋であった)あるいは和食の「一の矢」くらいしかなく、もちろん常磐高速も無かった。東京に車で戻るときは、水戸街道を走っていくと利根川の橋の前後が必ず渋滞していて、アイスキャンディーを売りに来ていた。何度か食べたが、えらく不味い物であった。

$\pi\mu$ ビームラインの下流にはK2ビームラインがあり、K2のビームの調子が悪くなると2階にあったカウンティングハット(2階建てになっていて、1階を $\pi\mu$ グループが使用していた)から高崎史彦さんが必ず降りてきて、「なにか(悪いことを)やっていないか」と聞かれたものであった。その頃の高崎さん達はK2ビームラインでKN散乱実験をやって

いる高エネルギー実験屋である。一方私達は、高エネルギー物理研究者の play ground に侵入してきた原子核屋という異邦人に見られていたわけである。

当時、中井さんから重要な事を学んだ。実験あるいはその準備中、なにか工夫が必要になると「ナイトショッピングに行こか」と誘われ、カウンターホールを歩き回る。すると魔法のように必要な物あるいは代用できる物が見つかるのである。これは成熟した実験室の持つ重要な機能だと思う。工作機械の使い方も中井さん直伝である。中井さんの腕はかなり確かで、思い返せば阪大杉本研の(旧き)良き伝統だったのだろう。

$\pi\mu$ ビームラインは、12GeV陽子を入射粒子として、実験室系で 87° 方向に生成する π 中間子や μ 粒子を QCD Q Q という磁石系で取り出せるように設計されていた(図1)。取り出せる粒子の運動量の上限は 500 MeV/c であった。生成ターゲットは一度に 4 種類までとりつけられて遠隔操作で変えられるようになっていた。私達はこの $\pi\mu$ ビームラインをスペクトロメーターとして利用した複合核の生成断面積を測定する実験や π 原子核吸収の実験を行った。日本初の μ SR実験E72 (μ SR) もここで行われている¹。

その頃の高エネルギー実験屋は TRISTAN の衝突点に置く大型の円筒形ドリフトチェンバーを計画していた。私達もビーム軸方向から現象を眺めて、粒子放出の機構を調べることを目標とし、まずは習作として円筒形マルチワイヤーチェンバーの製作を行った。磁場無しで使う単層のものではあるが、アノード線は荷電分割で読み出すので二次元情報を得ることができる。文献を調べ、九大の的場さんや東大核研の藤田さんに教えを乞い、CAD 等無い時代、製図版に向かって図面を書き、なんとかそれらしい検出器が出来上がった。初めての製作ながら、ちゃんとワイヤーが切れた場合の保守等も考慮した結構自慢の検出器である。[H. Enyo, M. Sekimoto and K. Nakai, Nucl. Instr. 196 (1982) 29]

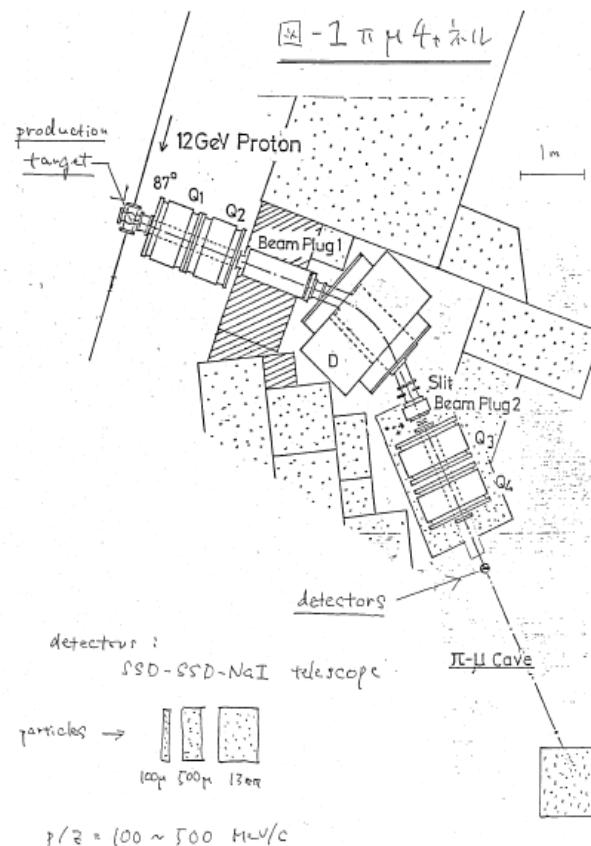


図 1. $\pi\mu$ ビームライン見取図。

¹ 昔、東大小柴研の学部生用夏休み実験では、宇宙線ミューオンを止め、磁場中で回転させてミューオンの偏極度を測る実験をやっていたから、ここでの記述は日本で初めてのビームを用いた μ SRと記述するのが正しいだろう。

東大医科研のサイクロトロンからKEKのシンクロトロンに「出世」してきた我々にとつて難しいのはノイズ環境の違いである。ゲルマニューム検出器や荷電分割読み出しの性能を出すためにはノイズレベルを下げることが必須で、ブラックマジックが横行する。最たるもののは中井さんの唱える呪文で・・・・だんだんよくなる法華の太鼓・・・・²、これを聞きながら頑張ると嘘のようにノイズ源が見つかるのである。どうも中井さんはノイズ取りの巧拙で学生達の実験能力の必要条件を測っていたようであったが、きっと杉本さんもそうだったのであろう。

3. 寺田寅彦の原理

(KEK-PS π AC 実験時代)

杉本研にいた中井さんは、沢山の図面を書かされたという。書いた図面を持っていくと、「あれがいかん」「これもいかん」といわれ、何度も何度も書き直しさせられたそうだ。やがて指摘することが無くなると杉本さんは「なんとなく気に入らん」と言う。中井さんが困惑していると、「君は寺田寅彦の原理を知らんか。うつくしいものはうまく動き、みっともないものはうまく動かんのや」という。いわゆる機能美を語った言葉であろう。孫弟子達は、KEK-PS π 2 ビームラインの実験 E90 (π AC) で、この言葉の重みを思い知った。[K. Nakai, Nucl. Phys. A418 (1984) 163c]

$\pi \mu$ ビームラインは 250MeV/cまでだが、 π 2 ビームラインは 4GeV/cまで出る。大した出世である。この実験では私たちは、トリスタンに先駆け日本初の円筒型ドリフトチェンバーを作ることになった。博士課程に進んだばかりの学生にこんな物の設計・製作を任せるのだから中井さんも無鉄砲である。最初の図面を当時、総主幹だった尾崎敏先生に見せたら「ポンチ絵にもなっていない」と酷評された。確かに、戻って考え直してみると、電磁気学のイロハも分かっていないことがバレバレの図面であった。一念発起して猛勉強し、合格点をもらえた図面をもとに完成したものがこれ(写真2)である(美しく見えるものはうまく動くという寺田寅彦の原理を守ったつもりではあるが、読者の方々の合格点はもらえるだろうか)。ちなみに、外側の赤いソレノイド電磁石も図面から当時学生であった永江知文さんが作ったものである。我々は、このスペクトロメーターにFANCYという名前をつけた。これは



写真 2. 円筒形 MWPC と延興

² 中井さんの話では「これは高橋嘉右さんが言っていたのだ」とのことである。真の出典はよくわからない。

Forward And CYlindricalの略で、標的領域測定用のソレノイド磁石「王将」と前方粒子用ダ
イポール磁石「常盤」の組み合わせが特徴の、当時としては先進的なセットアップである（図
2）。

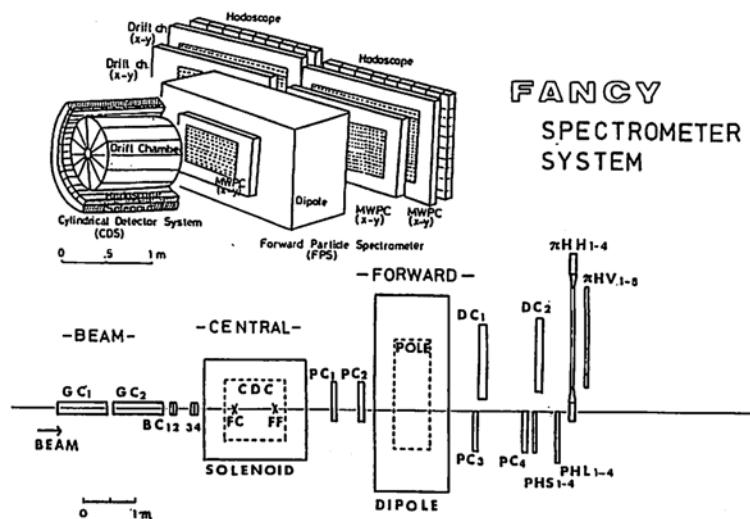


図 2. The FANCY spectrometer



写真2：1982年頃、 π 2ラインにて（ソレノイドとCDCの前で）

右から中井、佐々木、延興、町田、徳宿、佐野、関本、永江

このドリフトチェンバー作りは私達に実験屋としての基礎を与えてくれた。当時はネジ一本に至るまで、全ての部品の材質とサイズをそらんじていたと思う。覚えているから偉いわけではないが、当時は製図板に向かって一本一本線を描いていくのであるから、覚えてしまうぐらい真剣に設計したことだ（当然、何度も書き直させられた）。材料力学の本を買い込んで首っ引きで強度計算した円盤に鉛ブロックを置いて、ワイヤーの張力による変形を確かめた。材料力学の計算とは意外なほど精度のあるものだと知った。その後、図面を見ただけで勘が働くようになったのも、この時期の集中した時間の賜物だと思っている。

ワイヤー張りは、東大本郷の物理教室中庭のプレハブでやった。林栄精器から若い女子職員を4名派遣してもらい、一緒に9時～17時でワイヤーを張る。彼女らの作業が終わると、2人で張力検査を行い、張力が基準値を外れたワイヤーを張り替える。その後、本郷3丁目のパチンコ屋に行って、その日のストレスを解消する。私達がいない時、中井さんが進み具合を見に来ると佐々木茂樹さんが「二人は今食事中です」とかわしてくれていたことは公然の秘密であった。女の子たちは高校出たてで、ともすれば喧嘩をして互いに口をきかなくなったりする。労務管理とはかく大変な物なのであると初めて知ったのもこの時であった。また、このチェンバー製作時に、フィードスルーを使うことや、ワイヤーを張るのに重力を利用して縦に張る様子などを実際に見るために、KEKの近藤敬彦さん等が見学にきていた。この後、KEK トリスタン ビーナスで計画された更に大きなドリフトチェンバーの製作を経て、林栄精器はチェンバー製作なら殆ど任せられるまで成長し現在に至っている。

頑張っただけでは偉くないということも、このチェンバーは教えてくれた。完成後、実験に投入し200時間ぐらい運転した頃からノイズが増えだし、メチャメチャになるまで悪化した。しうがなく開けてみると高圧側のデルリン製のフィードスルーすべてに小さな黒点がある。小さなスパークが長時間の間に絶縁体をだんだん削り、最後には表面に達したわけである。実はフィードスルーを試作したころ、一分に1回ぐらい妙な放電があることに気づいていたのだが、「大した問題では無いだろう」と見逃したことのしっぺ返しを食らったわけである。長期耐圧試験をやらなかつた私達が馬鹿なのだが、すでに後の祭りである。同じ設計のフィードスルーは同時期に行われていた中村健蔵さんと谷森達さんたちの反陽子・陽子反応の実験にも使われたのだが、使用電圧が全然違っていたため、そちらは無事だった。我々のようなピクトリアル情報を与えるジェット型チェンバーでは最大高電圧は8kVに達するので、耐圧に対する考え方方が全然異なるわけである。我々のような場合では

フィードスルーの中に導体の鞘を入れ、ワイヤー径を等価的に大きくすることによって最大

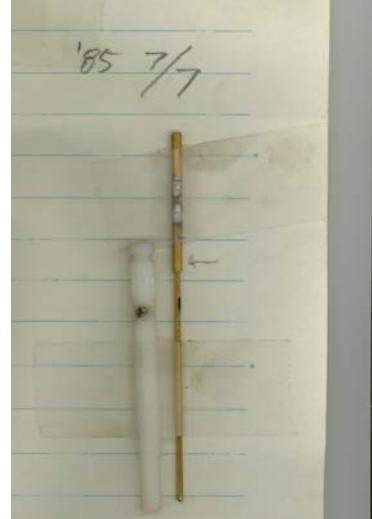


写真3:絶縁破壊がおきたフィードスルー。左側の白いスリーブに直径1mm位のきれいな穴があいているのが解る。右側の真鍮ピンも同じあたりに黒い煤が付着している。

電圧勾配を下げるというのがフィードスルー設計の常識だったらしいが、博士課程の学生程度ではこんなものである。試行錯誤の末に日本で始めて作ったデルリン製のフィードスルーは、見た目は美しかったが、美しいだけではだめだということだ。

結局、次のビームタイムに間に合わせるべく、博士課程3年の夏休み中に高圧側のワイヤーのフィードスルーを導体の鞘入りの物に交換する作業をやった。もちろんワイヤー張り替えも必要だ。カウンターホール内の作業になるため、応援は頼めず、徳宿克夫さんと私達とでひたすら張り替えをやった。しかし、どう頑張ってもビームタイムに間に合わない。作業時間を伸ばすと効率が落ちる。そこで徳宿さんが迷案をだした。曰く「1日が22時間だと思いましょう」。すなわち、作業時間を継続可能な長さでやめて寝る。次の日は2時間早く作業を始め、その次の日は更に2時間早く、となるわけである。こうすると作業日数を10%稼ぐことが出来る。非人間的な計画ではあったが、藁をも掴みたい気持ちで実行され、ビームタイムにはちゃんと間に合った。DESYでのHERA実験が成功したのは、徳宿さんのこういった奇想天外な発想によっていたのかもしれない。

当時、KEK-PSで実験をやっていた学生はみんな解析を共通大型計算機でやっていた。同じ部屋で同じ計算機を使い、KEK計算機室の番野善明さんが入れてくれたNewLibというエディターを使っていた。今振り返ると、その部屋に居た連中はみんな偉くなっている。名犬KEKを一輪車に乗って率いていた中山卓さん（現大阪大学教授）、今も昔も騒がしい谷森達さん（現京都大学教授）、トリスタンの建設用地で車をひっくり返した岩崎雅彦さん（現理化学研究所主任研究員）等々、皆戦友の気分がある。誰もがそれなりに賢く、それなりに馬鹿で、その頃唯一だった筑波大そばの夜中でもテイクアウトできる弁当屋から夜食を買ってきて徹夜しつつ、データの統計処理が分からなくなっては教えあう日々であった。ネットワークと計算機の進歩で、このようなごった煮の環境がなくなってしまったのはちょっと悲しい。

さて、KEK-PSの π^2 ビームラインから得られる $2\sim4\text{GeV}/c$ の π^+ および陽子ビームをAl核とPb核の標的に入射し、放出される反応粒子のスペクトルや多重度を系統的に測ることから、私達の実験は始まった。反応の様相を大局的に理解するために、実験室系において $35^\circ\sim90^\circ$ の範囲で測定した反応粒子の分布を解析した結果、実験データを再現するには、二つのsourceを考える必要があり、“two moving-source model”で粒子分布が書けることが明らかになり、このモデルを基礎にハドロン-原子核反応の時間空間的構造について次のような描像がうまれた。即ち、ハドロンが原子核に入射されると、原子核反応は4つのステージに亘って進行し粒子を放出する。ステージ1では、入射されたハドロンが標的核内の核子と準自由散乱（quasi-free emission）過程によって粒子を放出する。ステージ2では、準自由散乱過程の後、入射粒子が通った道に沿って励起して遺された部分spectator fireballが生成されここからも粒子が放出される。ステージ2の後、原子核はまだ前平衡状態の高い励起状態にあり、この状態がステージ3である。このステージ3から放出される粒子が前平衡放出（pre-equilibrium emission）粒子である。Two moving-source というのは2と3のステ

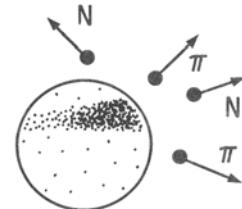
ージにおいて放出される粒子に対応している。そして、前平衡放出が終わった後も、なお残された励起エネルギーは原子核全体に伝わって熱平衡になり、その後中性子を“蒸発(evaporation)”する。この状態がステージ4である(図3)。

Stage 1

$$E_0^f = 120 \sim 140 \text{ MeV}$$

$$\beta_s^f = 0.4 \sim 0.5$$

“Quasifree Emission”

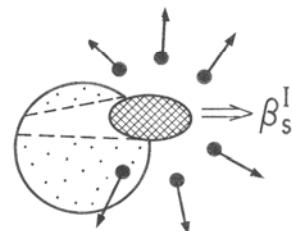


Stage 2

$$E_0^s = 60 \sim 70 \text{ MeV}$$

$$\beta_s^s = 0.1 \sim 0.2$$

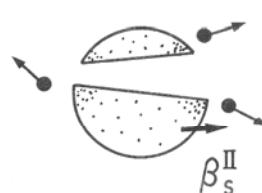
“Spectator Fireball”



Stage 3

$$E_0^p = 6 \sim 8 \text{ MeV}$$

“Pre-equilibrium Emission”



Stage 4

$$E_0^e = 1 \sim 2 \text{ MeV}$$

“Evaporation”

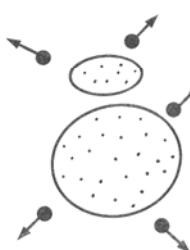


図3: ハドロン原子核反応の時間空間的構造

FANCY スペクトロメーターで観測した生成粒子のスペクトル “two-moving-source” 模型によって解析した結果、ハドロン原子核反応を考えると時間空間的構造について図のような描像が得られた。

このモデルに立つと、実験データから標的核に与えられたエネルギーがどれだけであつ

たか知ることができる。アルミニウムを標的として $4\text{GeV}/c$ と $3\text{GeV}/c$ の π 及び陽子ビームを入射した場合でも入射エネルギーの少なくとも 70~80% が標的核に付与され放出粒子のエネルギーとなっていることが分かった。即ち、標的核がアルミニウムのような軽い核である場合でも十分大きい阻止能 (stopping power) を持っているわけである。高エネルギー原子核反応の詳細な研究が始まったころ、入射粒子が高エネルギーになると原子核は透明になるのではないかと考えられていたのは、多核子の励起や π 中間子の生成という過程を見過ごしていたためであるということが FANCY の実験結果からよく理解された。つまり、原子核衝突における関与部一傍観部モデルに定量的な描像を得た。[H. En'yo, S. Sasaki, T. Nagae, K. Tokushuku, M. Sano, M. Sekimoto, J. Chiba, K. Ichimaru, T. Mori, T. Katsumi, H. Yokota, R. Chiba, K. Nakai, Phys. Letters 158B (1985) 681]

4. こんな実験、他の誰にもできん！ (KEK-PS E325[ϕ]実験時代)

中井さんの ^{17}F の実験は 6 衡の精度で磁気能率を決めていた [Phys. Letters 18 (1965) 38]。ここに至る苦労は並大抵ではなく、世界で初めて測られた世界記録の測定なので値が出ればそれだけで素晴らしい、精度をさぼっても論文としては充分に立派なのである。しかし、杉本さんは決して許してはくれなかつたそうである。「こんな実験、今後他の誰にも出来んから、出来ることはすべてやってベストの精度を出せ」という厳しい指導である。昨今、博士論文を期日に間に合わせるための指導が散見するが、原則は杉本さんの言うとおりである。中井さんから言われた言葉で「博士論文の為に実験をやるわけではないのだ」というものもある。聞いた時は学生だったので「えっ」と思ったが、今ではその言葉の重みがよくわかる。そんな教えを胸に行つた「他に誰にも出来ない実験」について述べたい。

KEK-PS では 1992 年に、杉本研の直系孫弟子ともいべき田中万博さんが中心となり北カウンターホールという新しい実験棟を増築した。そこにある EP1-B という一次ビームラインに 1996 年から座りつづけ、立ち上がり当初は笹尾 CP 実験の影で、その後は西川ニュートリノ実験の影で、ゆっくりではあるが着実にビームタイムを消化し、400 シフトのビームタイムをこなしたのが E325 実験（愛称は ϕ ）である。

ハドロンの質量の 99% は強い相互作用の自発的対称性の破れによって作られるわけで、これはそもそも有効質量なのだから、周りの状況が変われば変わるのはある意味あたりまえである。温度を上げたり、密度を変えたりしてハドロンの、そしてクォークの物性を調べてみようとい

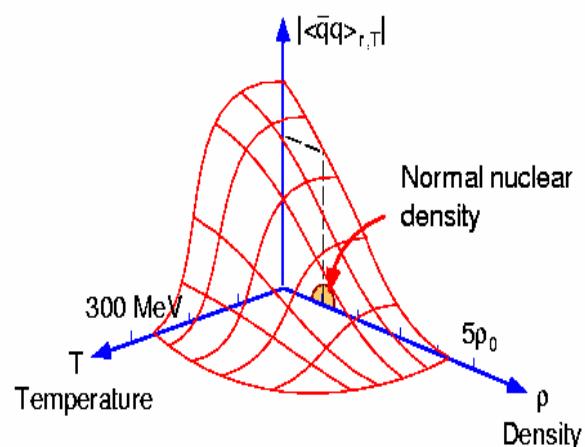


図 4： 密度と温度に対する $\langle \bar{q}q \rangle$ の依存性

うのがこの実験の基本的動機である。温度を上げるなら RHIC へ行って、高エネルギー原子核衝突で高温度状態を作るのがよからう。密度を上げるなら JHF (現 J - PARC のその頃の呼び名) に行って重イオンを加速し高密度状態を作ればよからう。こういった重イオン物理は面白いが、温度も密度も時間とともにめまぐるしく変化してしまう。ならば、天然の高密度状態、原子核を実験室にしてみたらよいのではないか。なにしろ密度が「飽和」して核内で一定の値をとっていることは既知の事実であるのだから。(図 4)

このような考えに基づいてE325 実験は企画された。基本的には原子核の中で崩壊するベクターメソンを電子陽電子対で測ろうというものである。電子を測ろうとするとターゲットは厚くできないので、薄くする。電子対崩壊は頻度が低いので反応レートを稼ぐために $10^9/\text{Spill}$ のビームを突っ込んで長期に走る、という大仰な実験になった。この実験では、幾つかの新しい技術をつぎ込んである。一つは、ドリフトチャンバーの読み出しのための配線の省力化と誤配線をなくすことを考え、プリントパターン付セラミックプレートを導入したことであり、もう一つは疎水性エアロジェル検出器である。このエアロジェルの開発には BELLE の PID グループに大変お世話になった。製作は BELLE と同時期になったため茂利製油という会社の超臨界乾燥施設を借りて行った。この施設には普通、化粧品や缶コーヒーなどの香料を抽出している釜があった。ここに泊り込みで監督・指導にあたった石野雅也さんのおかげで、今やエアロジェル生産は外注できるようになったわけである。プリントパターン付セラミックプレートはまだまだ高価なため根付かなかったが、疎水性エアロジェルは、それまで一般的であった親水性と比べるとはるかに扱いやすいため、現在では検出器の一つとして広く使われるようになった。

こうしていくつかの新技術を導入しながら、実験は始まり、そして得られたいいくつかの結果のうちの最も重要なものが図 5 に示す ρ メソンと ϕ メソンの電子陽電子対で求めた不変質量分布である。

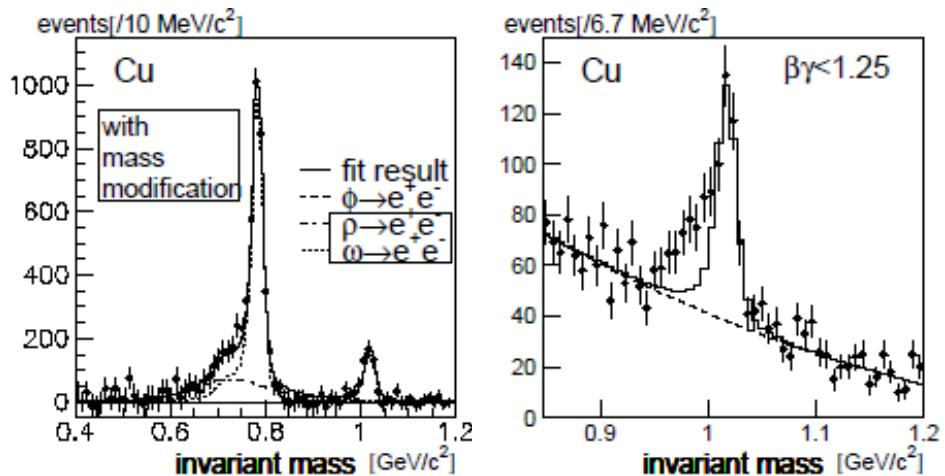


図 5 : 左図、 ρ メソンの質量変化を示すデータ。[M. Naruki *et al.* Phys. Rev. Lett. 96 (2006) 092301]
右図、 ϕ メソンの質量変化を示すデータ。[R. Muto *et al.* Phys. Rev. Lett. 98 (2007) 042501]

図5をみると銅原子核の場合に ω メソンのピークにも ϕ メソンのピーク（両方核外崩壊による自然幅を持つ）にも低質量側に顕著なエクセスが見える。ベクターメソンは有限密度下ではその質量が下がるということが実験的に確認されたわけであり、これはとても重大なことである。このエクセスをもたらす機構がカイラル対象性の部分的回復に結びついているのか否かが今後の研究の焦点となる³。

海外で、同様な目的を掲げた実験はいくつか行われたが、 ϕ メソンの質量変化を議論出来るだけの統計を貯められた実験は未だに存在しない。まさに「他に誰も出来ない実験」である。残された疑問を解決するのも自分たちでやるしかなく、J-PARC E16 実験として四日市悟さんが責任者となり着々と準備を進めている。

カイラル対称性の回復現象という言葉は、この実験をはじめたころにはまだあまり耳慣れないものであったが、南部陽一郎さんのノーベル賞もあったお蔭で、いまや原子核屋が解決すべき重大問題だという認識になって来た。即ちある意味、この E325 実験はドンキホーテ役を引き受けたわけで、“先見の明がある”とも“無鉄砲である”とも言える（スケールは違うがニューマトロンとよく似ている）。学生中心で進めたプロジェクトとしてはとても長かったが、この実験に取り組んでくれた京都の学生諸君には本当に頭が下がる。学位取得者は 7 名、取得時を博士課程に換算するとは D6 が 3 名、D8 が 3 名、D11 が 1 名である。まさに博士論文が後からついてきた実験だといえる。学生諸君はそれぞれ立派に成長し、巣立っていき、現在は CERN の ATLAS 実験や J-PARC で計画中のコメット実験、そして進化した新しい ϕ 実験等でそれぞれ中心的研究者として活躍している。

やはり杉本健三の教えは正しい。

³ 正確にいようと核物質と相互作用を行いながら飛行する粒子の質量は不变ではない。崩壊後の娘粒子から不变質量分布 ($\Sigma E^2 - \Sigma p^2$) を求めると、真空中より軽くなっていることが実験で示された事実となる。 ϕ 粒子が核内で引力を感じていると考えてもよい。