

J-PARC E07
Systematic study of Double Strangeness System
with an Emulsion-Counter Hybrid Method

準備状況報告

実験責任者

今井 憲一 京都大学大学院理学研究科
田村 裕和 東北大学大学院理学研究科
仲澤 和馬*) 岐阜大学教育学部

1 . 実験の概要	1
2 . 散乱粒子スペクトロメータとYield	2
2 - 1 . - 粒子静止事象数の推定	2
2 - 2 . スペクトロメータ (KURAMAとSKS)	3
3 . 測定器および実験技術	6
3 - 1 . 大量エマルションのライン生産と性能テスト	6
3 - 2 . 大面積原子核乾板の製作方法の確立	7
3 - 2 - 1 . 大面積支持体の下処理	8
3 - 2 - 2 . 大面積乾板の製作	8
3 - 3 . 両面シリコンストリップ検出器 (DSSD)	9
3 - 4 . 高屈折率エアロジェルチェレンコフカウンター	12
3 - 5 . 照射済み乾板の現像	13
3 - 6 . エマルション駆動装置の大型化	13
3 - 7 . エマルション解析装置の大型高速化・高効率化	14
3 - 8 . エマルション中の粒子識別	15
4 . 実験設備・施設等と経費見積	16
5 . 実験組織	17
6 . 安全について	17

*) 報告者 : nakazawa@gifu-u.ac.jp

1. 実験の概要

J-PARCで高純度・高強度のK中間子ビームが要求された重要な理由の一つは、これまで数例が限界であったダブルストレンジネス($S=-2$)の物理を飛躍的に発展させることである。

これまでKEK-PSにおいて我々は、1988年のKEK-E176実験を皮切りに、E224、E373、およびE522、またBNLにおいてはE813、E885と、(K^- , K^+)反応に着目し、ダブル ハイパー核やH-dibaryonの検出を行ってきた。特にE176実験では、連続的に弱崩壊するダブルハイパー核が確かに存在することを示し、またE373実験では、かつて坂東らの命名したラムファ(${}^6\text{He}_{\Lambda\Lambda}$)を単一に同定(“NAGARA Event”)し、それまでに信じられていた 相互作用エネルギーを大きく修正し、

間は引力的であるが弱い相互作用であることを示した。しかし、核構造の影響による不定性を除いて 相互作用を決定するには、更にいくつかの種類のダブルハイパー核の質量測定が必要である。

また、粒子的なH-dibaryonの存在の可能性は否定されたが、 の閾値近傍で共鳴状態的な $S=-2$ 系生成の可能性を示唆した(E224, E522)。もしそのような状態が存在すれば、ダブルハイパー核の基底状態は、 粒子2個が核内S軌道に落ち着いた状態というよりも、H核となっている可能性もある。その点で、最近E373実験で検出した、 Λ^- 粒子候補吸収点から Λ^- 粒子が放出されて事象は、非常に特徴的である。これは、ストレンジネス-2が核内に留まったと考えられる約数十例の中でのわずか1つの事象であるが、 Λ^- 粒子を伴う崩壊は ${}^6\text{He}_{\Lambda\Lambda}$ の生成に対して理論的にはわずか0.1%でしかない。現在、確かに Λ^- 候補が起こした事象であること(K^- 粒子ではないこと)の確認のための解析を行なっているが、確認されても1例ではデータ不足である。

上記は、(K^- , K^+)反応からの数百個の Λ^- 粒子をエマルジョン中に静止させて、発見されたものであり、これの数十倍の Λ^- 粒子静止事象を蓄積したBNL-E885カウンター実験では、検出されていない。本E07実験では、10倍以上の Λ^- 粒子をエマルジョン中に静止させ、解析することが可能となった。

一方、 Λ^- 粒子吸収点からシングル ハイパー核(twin hypernuclei)が二つ放出される事象において、運動学的解析により Λ^- 粒子の核内エネルギー準位を調べることができた。しかし、娘核などが励起状態で生成した可能性を排除できなかった。付随する 線をエマルジョンで測定するのは困難であった。本E07実験では、E419を始めとするKEK実験や、BNL-E930実験でハイパー核の 線分光を切り開いてきたGe検出器で、 Λ^- 粒子がその原子軌道を遷移していく際に放出するX線のエネルギーを測定する。このエネルギーの強い相互作用によるシフトが測定できれば、 Λ^- -核子間相互作用をはじめ測定できることになる。理論予測によれば、検出器の精度で十分測定でき、エマルジョン中に静止したことをフィードバックすることで、バックグラウンドフリーの測定になる。また、ダブルハイパー核やtwin hypernucleiの励起状態からの 線も検出できる可能性がある。

K1.8ビームラインの K^- ビームは、ダブルステージの静電セパレータを使用することで、従来の数倍の“質”が可能である。本E07実験では、 K^-/π^- で600時間の照射ができれば、従来の3倍以下のエマルジョン量で10倍以上の統計が可能である(スペクトロメータとしてKURAMA使用時)。ビーム強度もFull強度の2割($3 \times 10^6 K^-/\text{spill}$)でよい。また、これまでのエマルジョン中の飛跡探索技術の開発や両面シリコンストリップ検出器(DSSD)による高精度飛跡再構成により、照射後1年以内で、新たな核種のダブルハイパー核に辿り着けるものと考えている。

以下に、本実験のための準備状況について述べるが、Ge検出器(“Hyperball-J”)の具体的な性能についてはE13実験の報告を参照されたい。また、ビームライン検出器についても、E05実験と共通であり、そちらを参照されたい。

2 . 散乱粒子スペクトロメータとYield

2 - 1 . π^- 粒子静止事象数の推定(proposalの補足 : KURAMAを用いた場合)

2 - 1 - 1 . スタックあたりの最大照射 K^- ビーム数

エマルションは、すべての荷電粒子を記録し、最小電離粒子は直径0.5~ 1ミクロン現像銀粒子の並び(~ 30個/100ミクロン)の飛跡となる。観察する面に対して水平あるいは垂直に照射した場合、またエマルションの厚みによっても、照射できるビーム量が異なる。支持体の両面に0.5mm厚に塗布したエマルションで、光学的に観察できる限界は、水平照射の場合 1×10^5 particles/cm²より少なく、垂直照射の場合では 1×10^6 particles/cm²までの実績がある。このような限界のもとに、一つのエマルションスタックに照射できる K^- ビーム数 n_{K^-} は、

$$y_{K^+} = (d\sigma/d\Omega_L) \cdot \Delta\Omega \cdot N_p \cdot \eta_{abs} \cdot \eta_{K^+} \cdot \eta_{eff} \cdot n_{K^-}$$

とあらわされ、それぞれは、

n_e は先の照射限界粒子数で 1×10^6 particles/cm²

r_s は上流の標的中で起こる反応の多重発生によるダメージで1/1.14

(Monte Carloによる)

s は、大きさ 35×34.5 cm²のエマルションの照射する断面積 33×32 cm²

r_{K^-} はビームの K^-/π^- 比で6を仮定した(H.Noumi:Monte Carloによる)

である。これによると、1スタックあたりの K^- ビーム照射量は、 8.34×10^8 となる。

2 - 1 - 2 . スタックあたりの π^- 粒子静止事象数

我々は、E176実験においてはUSHIWAKA磁石、E373実験においてはKURAMA磁石を用いてきた。アクセプタンスは、USHIWAKAとKURAMAにおいてそれぞれ0.15および0.20str.と推定する。スペクトロメータは、 π^- 、 K^- 、 p を識別できることが重要であり、運動量分解能はさほど重要ではない。再構成された K^+ 粒子の質量は、 ~ 30 MeV/c²であった。1スタックに記録される π^- 粒子静止事象数 y_{π^-stop} は、

$$y_{\pi^-stop} = y_{K^+} \cdot \eta_{\pi^-} \cdot R_{stop} \quad \dots \dots \dots (1)$$

であり、それぞれは、

η_{π^-} は(K^- , K^+)反応を起こした標的核¹²Cに π^- 粒子が吸収されない確率で、E176およびE224で測定され、0.8である。

R_{stop} はエマルションに突入した π^- 粒子が静止する確率で0.017と推定。

(Monte Carloによる)

また、 y_{K^+} はスペクトロメータでタグされる K^+ 粒子数であり、

$$y_{K^+} = (d\sigma/d\Omega_L) \cdot \Delta\Omega \cdot N_p \cdot \eta_{abs} \cdot \eta_{K^+} \cdot \eta_{eff} \cdot n_{K^-} \quad \dots \dots \dots (2)$$

となる。ここで、

$(d\sigma/d\Omega_L)$ は準自由' p' (K^- , K^+) π^- 反応断面積で 50×10^{-30} cm²/str.、

$\Delta\Omega$ はKURAMAのアクセプタンスで0.20str.、

N_p はダイヤモンド標的(3cm)の有効陽子数、

η_{abs} はダイヤモンド標的中の反応によるビーム吸収率0.947、

η_{K^+} は K^+ が崩壊せずにTOFにて検出される割合0.735、

η_{eff} はスペクトロメータで K^+ を再構成できる効率0.70、
 である。このようにして推定される1スタックあたりの π^- 粒子静止事象数 $y_{\Xi stop}$ は75.1となる。

2-1-3. エマルション量とビームタイムの推定

以上から、 10^4 個の π^- 粒子静止事象を検出するためには、1スタックあたり1430cc、総量 $1430 \times 10^4 / 75.1 = 190 \text{ liters}$ の乾燥乳剤で133スタックが必要であり、ゲル状態で2.6tを処理することになる。この量は、E373の70litersの3倍弱、またニュートリノ振動実験CHORUSの2/3程度である。 $3 \times 10^5 K^-/\text{spill}(2.0 \text{ sec.})$ のビーム強度で、1スタックあたりの照射時間は4時間、スタック取替え時間30分を要する。 K/π^- 比が6であれば、このようにして 1.1×10^{11} の K^- の照射を行なうのに、約600時間のビームタイムが必要となる。また、検出器などの調整に150時間程度必要と考えられる。

2-2. スペクトロメータ(KURAMAとSKS)

2-2-1. KURAMAを用いたセットアップ

K1.8ビームラインにKURAMAを含めた配置したセットアップを図1に示す。この図では、ビームに乗ってSKSと反対側に K^+ などの正電荷粒子を曲げるようにKURAMAの磁場を作れば、E05で検討されているSKS本体は移動させずに配置できる可能性がある。標的近傍のより詳細な検出器配置は、申請書(proposal)を参照されたい。また、Hyperball-Jの配置にも全く問題ない。

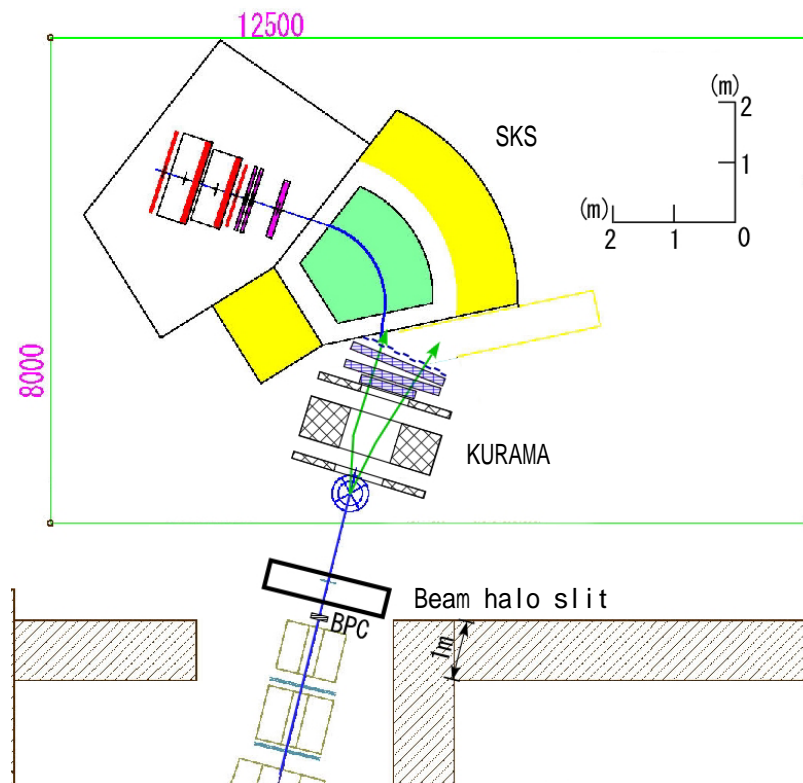


図1：KURAMAをK1.8ビームラインに配置した場合

2 - 2 - 2 . SKSを用いた場合のYieldの比較

スペクトロメータとしてSKSを利用した場合について検討する。SKS本体から40cm上流に標的があるとし、TOFをできるだけSKSに近づけて、磁場が3.0Tと1.5Tの二通りの場合にアクセプタンスが最良の位置をシミュレーションで探した。その結果を図2に示す。

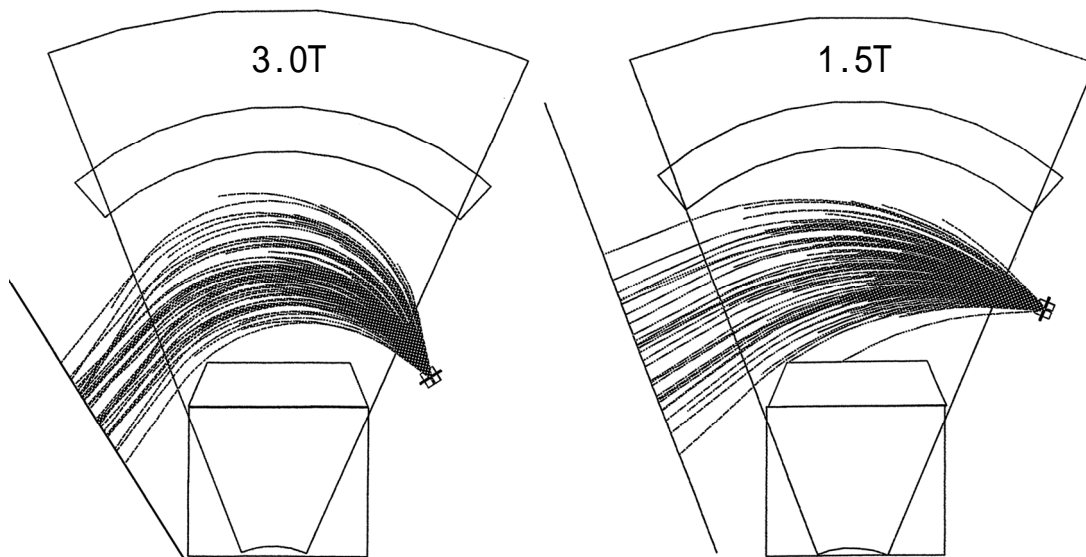


図2：SKSからビーム上流40cmの位置・それぞれの磁場で最良のアクセプタンスを得る場合。

KURAMAの場合に比して、 K^+ の飛行距離が長くなるため、崩壊せずにTOFまで達する確率(非崩壊確率)は若干悪くなり、アクセプタンスは約半分になる。これらをまとめたのが表1である。

	KURAMA	SKS(3.0T)	SKS(1.5T)
K^+ 非崩壊確率	0.735	0.63	0.64
R_{stop}	0.017	0.020	0.017
$\Delta\Omega$ (str.)	0.20	0.098	0.108
Yield ratio	1	0.49	0.47

表1 . KURAMAとSKSとのYieldに対する影響をシミュレーションで調べた結果。2ページの(1)および(2)式の、 η_{K^+} 、 R_{stop} 、および $\Delta\Omega$ に対応する数値をまとめた。KURAMAの場合のこれらの積を1として、SKSの場合を求めると約半分である。

一方KURAMAと異なりSKSは、強磁場による破壊に対する安全上の問題から、エンドガードを取り付けることができない。KURAMAの場合には、エンドガードの上流側にファイバブロックデータ読み出しのIITを固定したり、上流30cmの位置にダイヤモンド標的を置き、その直下のエマルジョンを直流モーター式の駆動装置でインタレースに動かしながら、ビーム照射を行った。KURAMAの磁場を1Tにセットしたとき、この付近の磁場は0.01～0.02Tであった。そこで、SKSの“漏れ磁場”を求めたところ、図3のようになった。ただし、SKSの中央磁場が1.8Tの場合である。

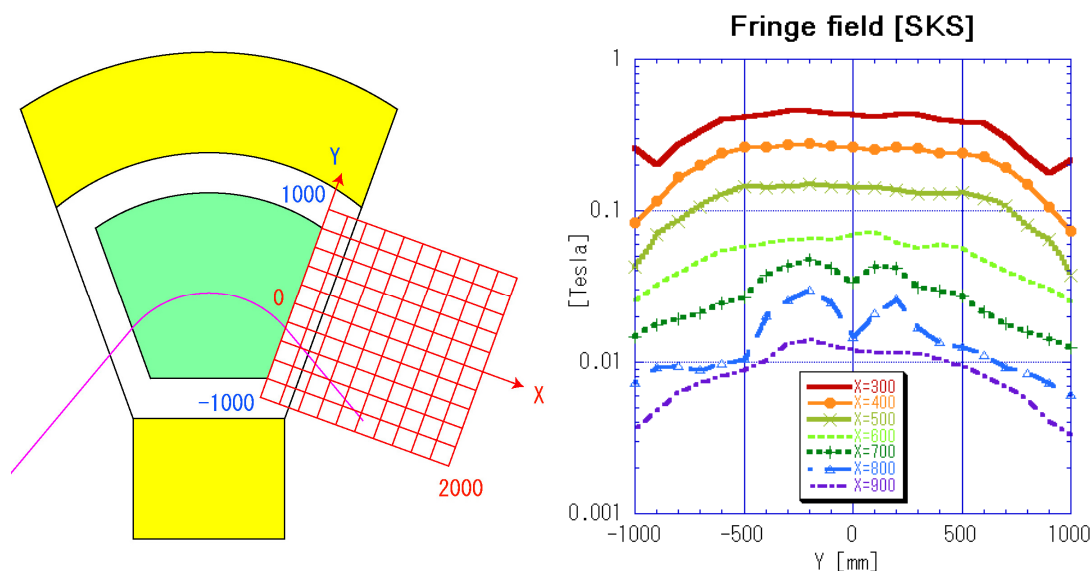


図3：SKSの中央磁場を1.8T(210A)のときの磁場計算値。左図のように(X,Y)を取ったとき(ただしZ=0;ビームの高さ)に、SKSからもれ出る磁場をX方向に100mm間隔で示した(右側)。

KURAMAを使う場合のエンドガード上流30cmの位置は図3のX=600mmに対応し、先の表1に示したシミュレーションの結果はX=700mmに対応すると考えられる。X=800mmくらいまでSKSから離れると漏れ磁場も0.01～0.02Tまで下がってくるが、標的より下流側のIITシステムの取り付けは非常に困難となる。したがって、表1で示したKURAMA使用に対するYield ratioは、標的からTOFまでの距離がより長くなり、更に悪化することになる。

いずれにしても、SKSを利用して、これまでの10倍の統計を得ようとするれば、2倍以上のエマルジョン量、ビームタイムが必要となる。また、後述するように、照射前の乾板製造期間は8ヶ月、照射後の乾板現像に要する期間として12ヶ月以上が必要である。したがって、照射後1年以内に何らかの結果を得るためには、ビームタイムを2年に分けるなどの措置をお願いしたい。

3 . 測定器および実験技術開発

3 - 1 . 大量エマルジョンのライン生産と性能テスト

本研究で用いるエマルジョンは、乾板中にできるだけたくさんの「粒子を静止させる必要がある。そのため、飛跡の記録されない支持体部を可能な限り薄くする一方で、記録する乾膜部を厚くし、密度の大きな（静止能の大きい）エマルジョンを用いてきた。40ミクロン厚のポリスチレンフィルムの両面に、乾膜0.5mm、密度 3.63g/cm^3 としてきた。この点は、名大グループがOPERA実験などで用いるエマルジョンとは異なる。彼らの用途には最小電離粒子が記録されていることが重要であり、約0.2mm厚のフィルム両面に乾膜40ミクロン、密度は 2.6g/cm^3 である。また、我々が使用するエマルジョン量は約2.5tと膨大であり、これまでのようにエマルジョン製造過程の主たる部分を人間が行うようでは、ビーム照射の時間と製造期間の相違が大きく、エマルジョンの感度低下が心配される。

そこで、通常販売されているフィルム用のエマルジョンを製造するラインで、原子核乾板用のエマルジョンを製造する可能性を検討した。そのようなエマルジョンは、富士写真フィルムからまず数種類が供給され、特に、阻止能（飛程）の点を、阪大核物理センターの運動エネルギー87.14MeVの線照射してチェックした。その結果を図4に示す。

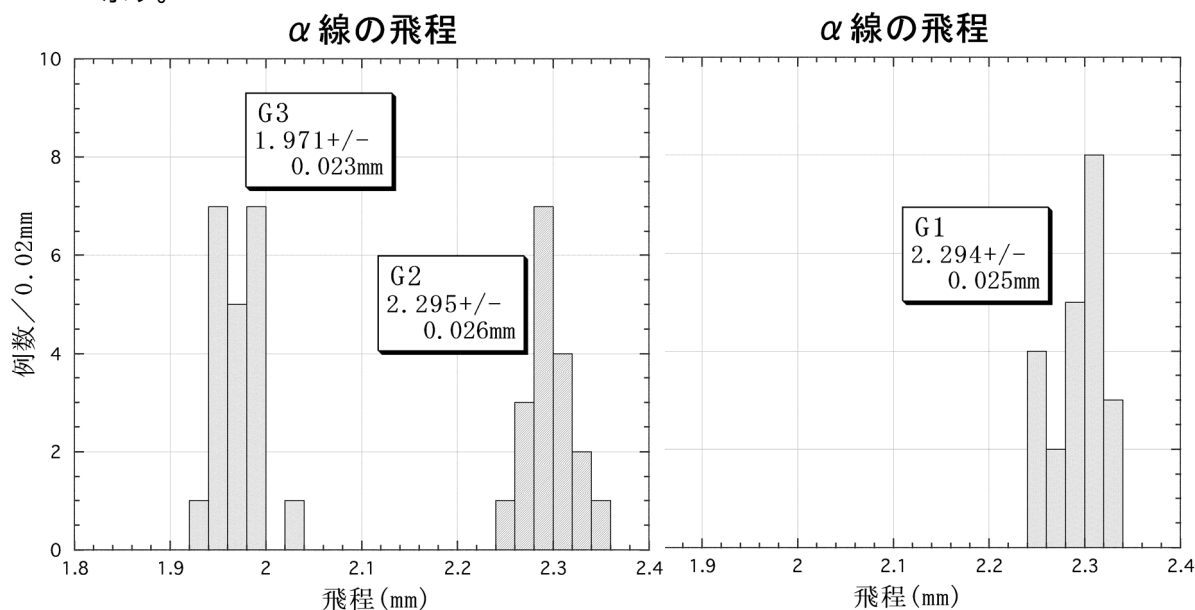


図4：富士写真フィルムの商品として流通しているフィルム製造のためのラインを用いて試作したエマルジョンを使って、乾板を製作した。その乾板に87.14MeVの線を照射し、現像後の飛程の分布を測定した結果である。。G1、G2というタイプは名大グループがOPERA実験に用いているエマルジョンで、それよりも密度を向上させたものがG3というタイプである。

照射したビームエネルギーは、加速器では87.14MeVであるが、ビームパイプ終端マイラー(50ミクロン厚)、ビームサイズ観察用のViewer(アルミ150ミクロン換算)、空気(約10mm)およびラミネート紙(アルミ70ミクロンに換算)の各所でエネルギー損失の結果、実際に乾板に照射される線のエネルギーは81.86MeVと見積られる。

飛程の測定では、G1およびG2は誤差内で同一、G3は明らかに短いため阻止能が高い。

G1~3とE373実験に用いたET7Dという4種類のタイプのエマルションの組成比をもとに、SRIM2000での計算と比較すると、表2に示すようになった。この表において、実測値と計算結果に幾分かのずれが生じているが、飛程の測定においてエッジと静止点の2点間距離で実測したために飛程が短めに測定されているものであり、このことを考えるとSRIM2000の結果は非常によく実験値を再現していると考えてよい。

乳剤	飛程実測値(mm)	SRIM2000計算値(mm)
G1	2.294±0.025	2.32
G2	2.295±0.026	
G3	1.971±0.023	2.05
ET-7D	—	1.97

表2 . 試作品[G1/G2/G3]およびこれまでのエマルション[ET-7D]における線の飛程の実測値とSRIM2000を用いた計算値

以上のように、ライン生産による3種類のエマルションをテストした結果をもとに、期待できる「粒子静止事象数をシミュレーションで求めたところ、これまでのET-7Dエマルションの場合を100%とすると、G3タイプで98%であった（G1/G2タイプでは87%）。たとえわずかながら阻止能は落ちてても、ライン生産が可能となることによるメリット（購入価格が約半額になる、これまでの少量仕込みでの製造の長期化によるエマルションの感度低下から開放される）を有効に生かすことができ、当初予定していた数の「粒子静止事象を得ることが可能となった。

一方、最近の感度テスト実験の結果によると、製造後約1年経過したエマルションを使用した乾板において、最小電離損失粒子に対する著しい感度低下（約30%）が見られた。実際の実験では、製造から乾板にするまでの期間を4ヶ月以下とするためさほど大きな影響はないと考えられるが、今後ビーム照射を行うまでに、以下の時間的な相違に着目した感度変化について明らかにする計画であり、本年9月より(株)富士写真フィルムの協力を得て開始した。

乳剤製造から乾板にするまでの期間
 乾板にしてからビーム照射までの期間
 ビーム照射から現像までの期間

3-2. 大面積原子核乾板の製作方法の確立

本研究では、E373実験の10倍の統計を目指している。そのため、照射するビーム量は、 K^- 粒子の質の高いビームを用いても数倍の量になり、単位時間に照射するビーム量（ビーム強度）を多くする必要がある。エマルションに照射できるビーム量は、 $1 \times 10^6 \text{ beam/cm}^2$ 程度が限界であるため、単位時間当たりのビーム量を多くすると、厚塗り13枚と薄塗り2枚を重ねた原子核乾板スタックの取り替え頻度が多くなる。E373実験においては、1つのパッケージのビーム照射に約10時間、取替えには約1時間を要していた。E373と同サイズのエマルションを用いるとすれば、ビーム強度が高くなる分、1つのパッケージのビーム照射時間は短くなる一方で、取り替え時間はそれほど変わらない。したがって、ビーム時間を有効に使えないことになる。

この問題を解決するために、スタックに入れるエマルションのサイズを、面積で約2倍 ($25 \times 24.5 \text{ cm}^2$ から $35 \times 34.5 \text{ cm}^2$) に大きくすることにした。この $35 \times 34.5 \text{ cm}^2$ というサイズは、現有の顕微鏡で観察できる極限である。このサイズを可能とするために以下の2点の開発を行ってきた。

3 - 2 - 1 . 大面積支持体の下処理

エマルションを乾板にする際には、 $35 \times 34.5 \text{ cm}^2$ の4枚分を一度に作る。約 $90 \times 90 \text{ cm}^2$ の支持体フィルム (ポリスチレン：厚み40ミクロン) の表面を放電処理して、ビーム照射・現像・顕微鏡観察のどの過程でも支持体からエマルションが剥がれ落ちないようにしなければならない。E373における放電処理は、約5cmの幅を持つ電極でコロナ放電処理を行うものであったが、 $65 \times 65 \text{ cm}^2$ の支持体フィルム1枚の処理に約1時間を要した。E373では、1回の処理で12枚の支持体を用意したので12時間かかり、これを30回繰り返した。

そこで、約40cmの幅の電極をテストした。図5に新旧双方の電極を示す。これまで、電圧降下による放電不足などにみまわれて、エマルションが剥がれ落ちないような処理は、なかなか達成できなかった。電源を替え、電極に巻きつけるテフロンチューブを変更するなどして、現像してもエマルションが剥がれ落ちなくなった。面積は大きくなったが、1枚あたりの処理時間は約 $1/4$ の15分、1回に36枚で9時間、これを12回繰り返すのみとなる。

この開発は、一企業の全面的な支援を得て行ってきた。この開発の結果、使用するエマルション量は約3倍になったにもかかわらず、支持体の下処理に要する時間は、 $1/3$ 以下に減少させることができた。

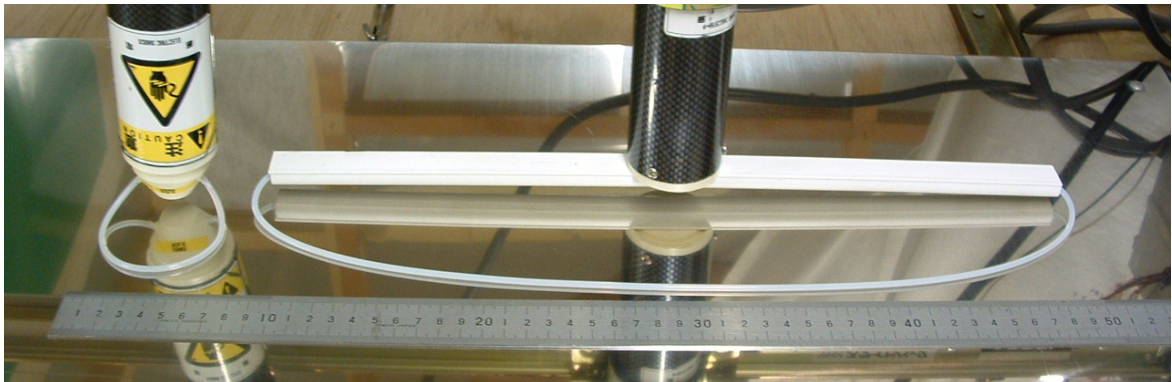


図5：コロナ放電により支持体フィルムの表面処理を行うための放電極。左がE373実験で用いたもので、右側が本実験用に開発したもの。

3 - 2 - 2 . 大面積乾板の製作

厚さが40ミクロンで $90 \times 90 \text{ cm}^2$ という面積のフィルム上に、乾燥後の厚みのパラツキ10%以内でエマルションが塗付されなければならない。そのためにこれまで行ってきた手法は、水平な定盤の上にアクリル板をセットし、真空引きで支持体フィルムをアクリル板にセットする方法である。このフィルム上に必要な大きさの枠として氷で冷やしたステンレス棒を置き、枠内に40℃の熱浴で溶かしたエマルション(ゲル)を流し込む。これに冷風を30分ほど当ててプリンのようなになったら、その回りに乾燥時の歪みを吸収させるための“ダミーエマルション”(成分はほとんどが単なるゼラチン)を同様に塗付する。このダミーエマルションがプリンのような硬度を持つ

ようになったら、アクリル板ごと乾燥棚に入れ、室温30℃、相対湿度75%で約2日かけて乾燥する。3日後、同様にして裏面にも塗付する。

本実験では、E373実験の小さいサイズの定盤や乾燥棚を利用するため、支持体フィルムを水平にセットするためのアクリル板を新たに設計して、大面積乾板の製作が可能となった。

このようなR&Dをもとに、岐阜大学においてすべての乾板を製作する。

製作は、初日・2日目に、それぞれ18枚の片面の塗布を行なう。4日・5日目にそれぞれの裏面の塗布を行なう。そして7日・8日目にそれぞれ18枚を低湿度(60%R.H.)で最終的に乾燥し、ビーム照射用の大きさ(35×34.5cm²)に切り出し保管する。このようにして、8日間で144枚の照射用乾板が出来上がる。約4ヵ月(14サイクル:16週間)で約2000枚の実験に用いる乾板を製作する。この製作の過程で宇宙線が記録されるのを極力抑えるため、製作されるたびに神岡鉱山などの深地下に保管して、照射を待つことになる。

3-3. 両面シリコンストリップ検出器(DSSD)

これからのハイブリッドエマルジョン法の鍵となる検出器がDSSDで、これは粒子のエマルジョンに突入する位置と角度を精密に測定する検出器である。DSSDはp-sideとn-sideの両方をstripにして、1枚でx-yの2次元の位置を精密に測定するものである。粒子の寿命が短いため、図6のように標的とエマルジョンとの間の4mmの間隔に2枚のDSSDをおき、粒子の位置と角度を測定する。そのため50μmのstrip pitchで64×32mm²の有効面積のDSSDを製作した。このstrip pitchで16μmの位置分解能が期待できる。読み出しにVAchipと呼ばれる増幅器を含む読み出し用ICを用いた基板を製作し、回路部品などを吟味して4mmの間隔に設置できるように設計した。製作したDSSDの写真を図7に示す。光って見えるのがDSSDのchipである。

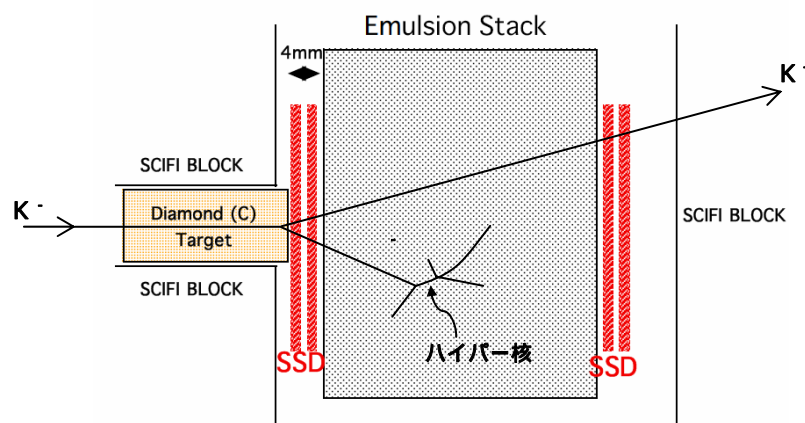


図6 : DSSDの配置図。エマルジョンと標的との間の4mmの間隔に配置する。さらにここでエマルジョンは、DSSDを“こすらない”ように、x-y方向に駆動される。

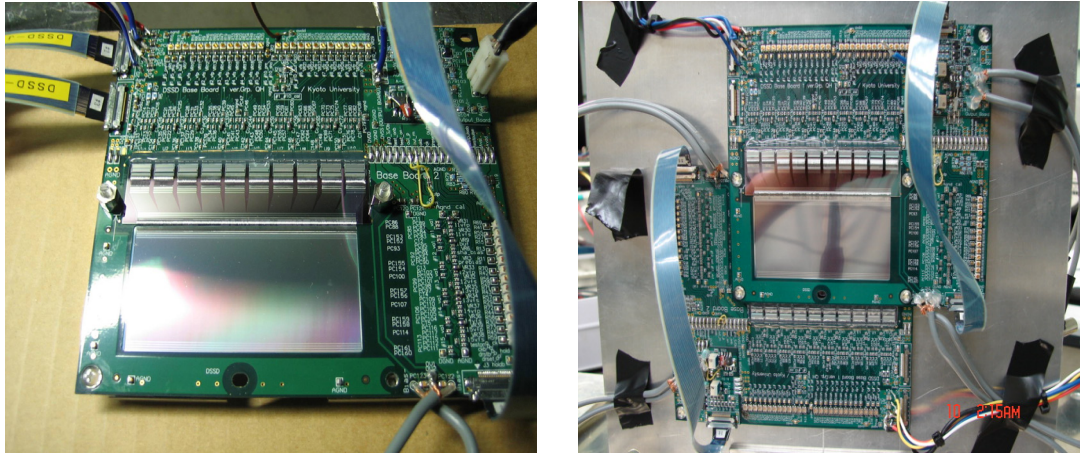


図7： 製作したDSSDと読み出し回路基盤の写真。光って見えるのがDSSDのchipである。左図はエマルジョンとのハイブリッドのテストのため2枚重ねたもの。

このDSSDについて 線源を用いた性能テストを行った。その結果は最小電離粒子に対して十分なS/Nを得た。得られたパルス波高の分布を図8に示す。最小電離粒子に対するS/Nはp-sideが34でn-sideが23であり、ノイズはそれぞれ600と1000 equivalent electronである。実際には 粒子の速度は光速よりかなり小さく、DSSD中のエネルギー損失が最小電離粒子に比べて何倍か大きいため、最小電離粒子でこのS/Nが得られていれば十分な性能といえる。

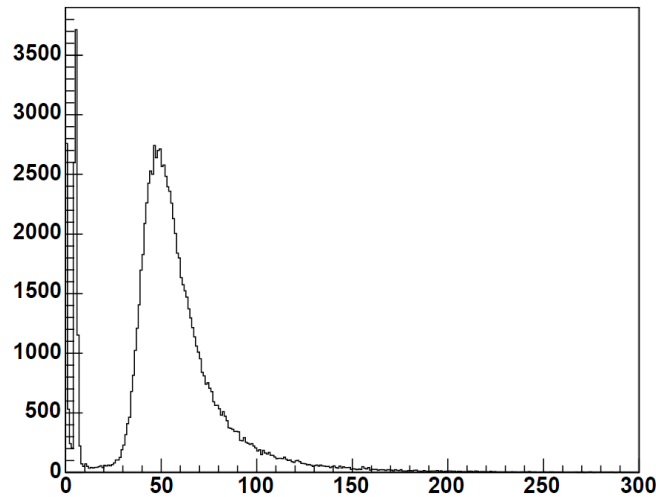


図8： DSSDで得られた 線の波高分布。ノイズと完全に分離できている。

KEKの陽子ビームを用いて、エマルジョンとDSSDを組み合わせたハイブリッドシステムのテスト実験(T594)をこの3月に行った。セットアップを図9に示す。

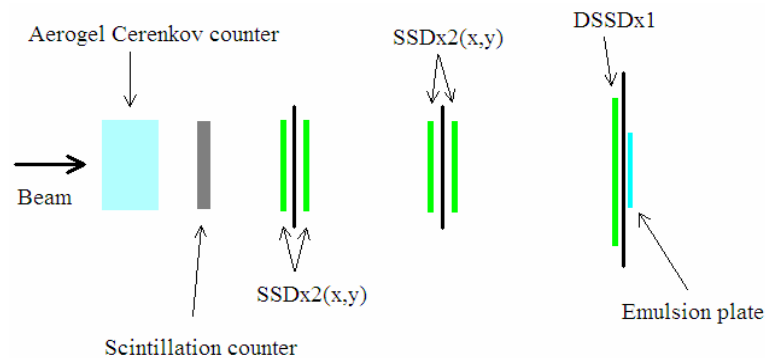


図9： 2 ビームラインで、DSSD-emulsion systemの角度を変えてながら、0.5GeV/c陽子を照射した。

後方2枚のSSD(x,y)とDSSDでトラックを引き、DSSDに隣接して設置したemulsionプレートに入射した粒子の入射位置、入射角度を予想した。この予想と、実際にemulsionを顕微鏡で観察し、得た粒子を比較した。図10にemulsion plateに20°で入射した陽子の予測点と発見した位置を示し、現状における結果を表3にまとめた。

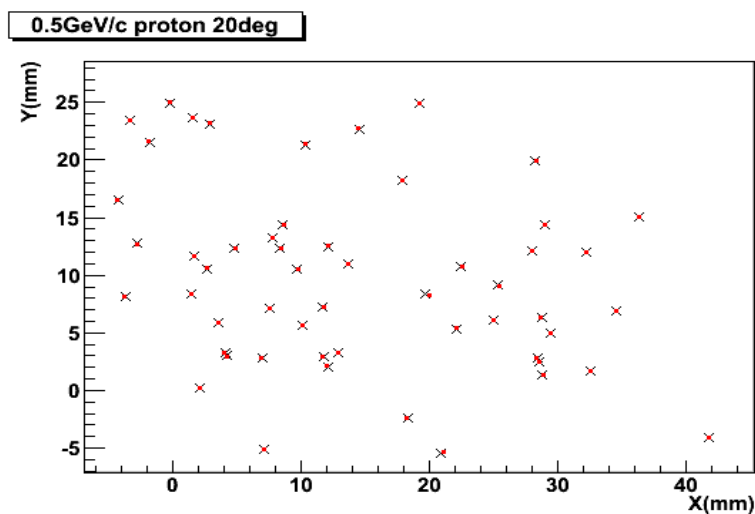


図10：x印が予想される位置で、●がエマルジョン中で発見した位置である。

	位置のずれ[μm](r.m.s)		角度のずれ[mrad](r.m.s)	
	T594	E373実績	T594	E373実績
x 方向	57	194	34	44
y 方向	27	113	23	25

表3：エマルジョン中の予測点と発見した場所とのずれ、および陽子の予測角度と発見した飛跡の角度とのズレを示す。

T594ではDSSDを1枚しか利用できなかったため、2セットの片面SSDを上流側に配置して陽子の再構成を行った。位置のずれが小さいのは、再構成に十分な距離を取ることができたためとも考えられる。そこで、E07実験と同様にDSSD2枚で再構成のテストを、RCNPで行うことになっている(2006年12月)。

3-4. 高屈折率エアロジェルチェレンコフカウンターの開発

E07実験においては、K⁻ビームの強度増強に伴って、トリガーの問題が生じる。KEK-PS E373においては、(K⁻, K⁺)トリガー(1st level)のレートは 1.1×10^4 個のK⁻に対し平均75であり、これをJ-PARC E07実験の予想ビーム強度 3×10^5 /spillにあてはめると、spillあたり2000トリガーが予想される。2nd level triggerは、これを1/2~1/3に減らすのが、これでもまだ多すぎる。

実際には、このトリガーのほとんどは(K⁻, p)反応によるものであり、これを落とすことができればこの問題は解決される。なお、E373の1st level triggerでは陽子を落とす工夫は全くなされていない。

1st level triggerで陽子を落とす方法であるが、1.1程度の屈折率を持つ物質が得られれば、それを用いたチェレンコフカウンターによって比較的容易に行うことができる。最近、そのような屈折率を持つシリカエアロジェルを製作する方法が千葉大(松下電工)

(http://www.ppl.phys.chiba-u.jp/~makoto/presentation_and_paper.html)を参照)

とロシアのJINRで開発された。製作時間が長い(通常より1,2ヶ月余計にかかる)、歩留まりが悪い(~20%)などの問題がある(さらに、実際には今のところ正確に狙った屈折率を持つものを作れないので、特定の屈折率を持つものの歩留まりはさらに下がる)が、 $6 \times 4 \times 1$ cm³程度の大きさを持つ板を数枚なら問題なく製作できる。サンプルを図11に示す。これだけの量があれば、ターゲット直後に置くチェレンコフカウンターを作ることができる。



図11：屈折率1.2のエアロジェルのサンプル。

E07では、板を4枚使って $8 \times 6 \times 2$ cm³程度の大きさを持つチェレンコフカウンターを作っている。千葉大のテスト結果によると、このテストで作られたシリカエアロジェルの透明度は15mm程度あり、十分な光量が期待できる。

現在、千葉大学とJINRの双方から屈折率1.2前後のシリカエアロジェルのサンプルを取り寄せてチェレンコフカウンターを作成している。これを11月13-17日に東北大学核物理研究所の電子ビームに当ててテストを行う予定である。

価格についてであるが、高屈折率シリカエアロジェルの価格はまだ確認を取っていないが、通常のシリカエアロジェルの価格(10×10×1 cm³の板一枚当たり1-2万円程度)に、追加工程の手間賃と歩留まり(必要量の10倍程度生産する必要あり)から考えて、100-200万円程度かかるかと思われる。これに光電子増倍管(3インチ、紫外光に感度を持つもの)の価格を加えても、全部で300万円以下で製作可能である。なお、千葉大の河合氏によると、高屈折率シリカエアロジェルを自作することも可能とのことであり、その場合はさらに安価に作ることができる。

3 - 5 . 照射済み乾板の現像

ビーム照射した乾板は、岐阜大学において現像する。

1200litersのタンクを3つ用意して、1週間に72枚の現像を行ない、28週間(約半年)で現像を終了させる。厚塗りの乾板の、表面付近と支持体表面付近での現像の進行があまりに異なっていると、観察に支障が生じるが、そのような点を克服した現像手法は、すでに前のE373実験の際に確立している。現像を待つ乾板は、やはり塗布の時と同様に鉱山などの新地下に保管する。当初、宇宙線研での現像も検討したが、タンクサイズの容量が400litersしかなく、約1年半も要してしまう。また、6万litersを超える廃液の処理費用が、宇宙線研の場合にはかなり高額(岐阜で処理する場合の2倍以上)になってしまう。さらに、現像に携わる学生を宇宙線研に常駐させることは、講義等の関係で以前にも増して非常に困難である。

3 - 6 . エマルジョン駆動装置の大型化

照射するビームサイズは、高々直径数cmである。一方、エマルジョンの大きさはビームに垂直に $35 \times 34.5\text{cm}^2$ である。したがってビーム照射の際には、エマルジョンをビームに対して移動させなければならない。このような装置は、すでに20年以上前から改良をかさねて、CERN、FNALやKEKで、用いてきた。しかし本実験では、装置の駆動幅が改良ではすまなくなり、新たに駆動装置の開発に取り組んだ。

図12に、おおよそ組み上がった駆動装置を示す。ビーム照射時には、中心の金属板の部分は、エマルジョンのパッケージとそのホルダーに置き換えられる。

駆動方法は、水平方向はACサーボモータとボールネジ、垂直方向はステッピングモータとスチールベルトによる駆動で、両軸とも直線案内リニアガイドで位置の情報を得る。これらは、パソコンに内蔵されたモーションコントロールボードを用いて制御される。水平軸のみ予定運転速度の 0.125mm/sec でテスト運転を行ったところ、図13のような結果を得た。若干の速度の変動は見られるものの、ビーム照射運転に要求される、 $10 \mu\text{m/sec}$ 以内の位置制御という仕様を満たすものとなっている。現在、京大・名大の技術者が精力的に取り組んでおり、平成18年度中に完成できる予定である。

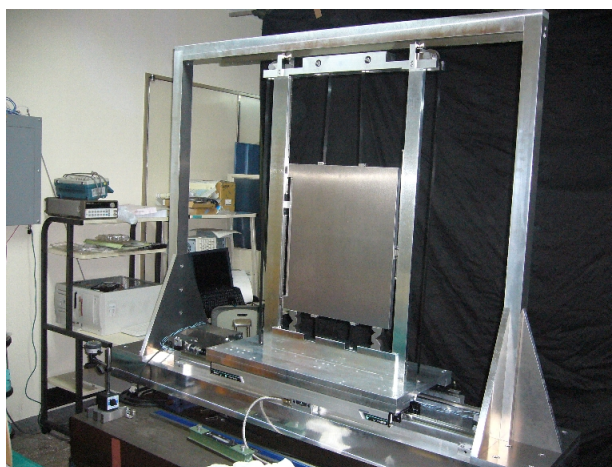


図12：エマルジョン駆動装置の大枠を組み立てたところ。中心の四角の金属板のところを、エマルジョンのパッケージに置き換えて駆動する。

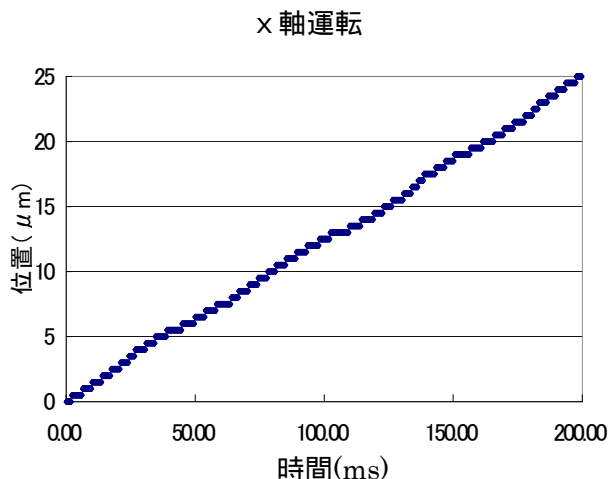


図13：エマルジョン駆動装置の水平方向駆動試験結果。

3-7. エマルジョン解析装置の大型高速化・高効率化

本実験では、大面積 ($35 \times 34.5 \text{ cm}^2$) の乾板を高速に観察するために、新たな顕微鏡システム (EXPERT_G1) を開発した。観察可能面積は $40 \times 40 \text{ cm}^2$ に拡大し、光源をハロゲンランプから超高輝度白色LEDに変更、カメラは30Hzから120HzのCCDへと4倍速化した。このシステムは、京都大に2台、岐阜大に3台(1台は旧システムを新光学系に変更)、また東邦大学・慶尚大学(韓国)に各1台配備され、従来システムも含め10台のシステムで γ 粒子の探索にあたるよう準備してきた。岐阜大のシステムの写真を図14に示す。

このシステムの従来システムに対する性能向上は次のとおりである。

1. 顕微鏡1視野の撮影・解析速度 : 約2倍
2. 探索すべき1イベントに対する探査・解析時間 : 約0.8倍
3. 飛跡として認識した数 : 約2.5倍
4. γ 粒子候補となる飛跡数 : 約1.5倍
5. 飛跡でないものを誤認識する割合 : 上記3.において20%から50%に増大



図14: 写真・左は、新システム3台、写真・右は恒温恒湿槽内の従来システム2台

このように、飛跡でないものを飛跡として認識してしまう割合は増加したが、約2倍のスピードで1.5倍の飛跡を検出しているため、全体の効率としては、約3倍が達成できた。

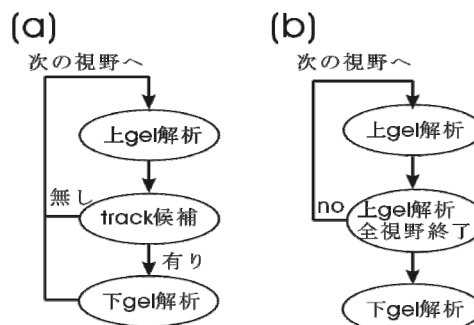
今後、以下の点をさらに改良することによって、従来システムの10倍以上の高速かつ効率化を達成し、実験に臨みたい。

1) アルゴリズムの改良

現在、エマルジョンの支持体フィルムの上側を探索し候補が見つかった場合には、その場で下側を探索するようになっている(右図(a))。まず上側のみを探索してから下側を探索すること(右図(b))によって、解析速度は約2倍になると推定している。

2) 探索する顕微鏡視野の拡大

本実験では、DSSDを利用することによって、 γ 粒子を探索する領域は従来の半分以下になると期待している。一方、探索すべき γ 粒子は、最小電離損失粒子より dE/dX が数倍大きいので、顕微鏡対物レンズの倍率を現行の50倍から20倍に下げて、一度に探索できる領域を約6倍大きくする。こうすると、一視野の画像処理に多少時間は要するが、探索する視野数の減少により、処理と同程度の時間を要する視野移動のためのステージ駆動時間を大幅に減少させることができる。



3 - 8 . エマルション中の粒子識別

ダブルハイパー核の崩壊に伴って放出される粒子などの粒子識別は、核種を単一に同定する上で重要である。また、ダブルハイパー核の Σ^- 粒子を伴う弱崩壊では、 Ξ^- 粒子ではなく K^- 粒子の静止吸収によって起こったのではないか、という可能性も完全には否定できず、そのような疑問に可能な限り答える必要がある。その解決方法は、①飛跡の濃さ(電離損失)と、②粒子の散乱、の双方から突き詰めることであると考えている。

飛跡の濃さについては、乾板毎また1枚の乾板の中でも場所によって現像状況が微妙に異なるので、運動量の分かっているビームと、 $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow e^+$ 崩壊を起こしている π^+ 粒子の電離損失とを指標に識別を試みる。この手法は、低運動エネルギーの軽い原子核(6MeVの $^1\text{H}^+$ 、 $^4\text{He}^{2+}$ および $^7\text{Li}^{3+}$)については、静止点から約60 μm 程度の飛跡の擬似的な体積を求めることにより、 3σ 以上で分離できることが試行済みである。また②の散乱による識別は、統計的にはではなく事象毎に行なうとなると困難を伴う。さまざまな指標(散乱角を決定する飛跡の距離など)を検討することが必要であろうが、実験実施までには見通しを得たいと考えている。

4. 実験設備・施設と経費見積

まず、スペクトロメータは未定であるが、K1.8ビームラインのエリア整備には、全面的に協力していく所存である。ケーブル設置作業、チェンバー・ガス配管、計測コンテナ整備など、今後の共通財産となるものと考えている。

その上で本実験特有の施設として、エマルジョンをハンドリングするコンテナが必要である。ここでは、照射する直前に乾板の厚み・重量を計量し、厚塗り13枚、薄塗り2枚を照射用カセットにセットしなければならない。照射直後には開梱し計量し、探索時の位置校正用のグリッドマークを焼き付ける。このための暗室状態を維持できるコンテナを要する。

また、乾板製作・現像の設備を要する。Proposalでは、KEKでの乾板製作を求めたが、その作業があまりに長期にわたるため、学生が受講すべき講義との関係もあり岐阜大学で実施すべく科研費を申請した。間接経費で設備を収納する施設の用意を大学側に依頼している。1200ℓのタンク3個は、その重量ゆえに2階より上階の一般的な実験室の耐加重では持たないため、配置できない。悩ましいところである。

その他、カウンター関係の取扱いは、J-PARCに用意されるであろう施設を利用できれば問題ないと考えている。

次に経費の見積を行なう。

まず、本実験特有のエマルジョンに関連する経費を、KURAMAとSKS利用の場合を比較しながら以下に示す。

単位：万円	KURAMA	SKS	備考
エマルジョン	7,000	14,000	3,500万円分は購入済み
塗布用消耗品	100	100	100万円分は科研費で申請中
現像用タンク等	700	700	科研費で申請中
冷却機	600	600	科研費で申請中
現像用薬品	1,000	2,000	1,000万円分は科研費で申請中
廃液処理費用	700	1,400	700万円分は科研費で申請中
乾板観察用 アクリル板	150	300	150万円分は科研費で申請中
学生への謝金	80	160	80万円分は科研費で申請中/塗布・現像を卒論や修論にしない学生には謝金を用意する必要あり
計	10,330	19,260	3500万円は購入済、3330万円分は科研費で申請中
科研費が採択された場合必要となる経費	3,500	12,430	

KURAMAを使用する場合には、KEKから電源等の関連物品とともに移設していただきたい。

乾板製造のためのエマルジョン塗布乾燥棚は、ニュートリノ実験(CHORUS:CERN)で使用したものの3セットを手に入れてあり、修繕を行って使用する。

探索用顕微鏡は、E373では、岐阜2台、京都2台、東邦大1台、慶尚大(韓国)1台の合計6台であった。E07実験には、特別推進研究(代表者：今井憲一)の経費と基盤研究B(代表者：仲澤和馬)の経費により、新しい高速システムを岐阜で3台、京都で2台をそろえ、また、東邦大学1台、慶尚大1台を追加した。さらに、新たな共同研究者として、Aligarh Muslim大学(インド)、山西師範大学(中国)を迎え、それぞれ1台の顕微鏡を用意して、E07実験に臨むことになっている。

DSSDは、6枚(3セット分)を特別推進研究で用意した。また、X線・γ線検出用のGe検出器は、東北大(責任者：田村裕和)において準備が進んでいる。

その他のカウンターやチェンバー等は、E373実験で使用したものを修復して使用することを基本的に考えている。

5．実験組織

研究上の役割は、エマルションに関連することは仲澤(岐阜大)が担当し、チェンバー・カウンター等は今井(京大)、Hyperball-Jは田村(東北大)が担当する。参加する大学・研究所を、あえて3つに分類すると、

- ・エマルション(塗布・現像)

岐阜・Aligarh Muslim・Chonnam・Dongshin・Gyeongsang・山西(Sanxi)・名古屋・放医研・東邦・KEK

- ・チェンバー・カウンター

京都・BNL・CIAE・福井・KEK・大阪市大・Pusan・Huston・New-Mexico

- ・Ge検出器

東北・CIAE・KEK

また、ダブルハイパー核の探索は、岐阜・京都・東邦・Gyeongsang・Aligarh Muslim・山西(Sanxi)で行い、特徴的な事象については、Univ. College Londonも加わり、全共同研究者で検討する。

6．安全について

毒物・劇物の使用はないが、チェンバーガスやビニールハウス内の排気・換気に気をつけたい。また、DSSDとエマルションとの位置関係を較正するために、X線照射を検討しているが、研究所の指導に則って実施したい。