

## ■研究紹介

# 強い相互作用のもたらす質量の謎を追って

## PS-E325 実験奮戦記

延与秀人(理化学研究所)  
PS-E325 共同実験グループ  
[enyo@riken.go.jp](mailto:enyo@riken.go.jp)  
2001年12月7日

### 1. はじめに

KEKのPSの北カウンターホールにEP1-Bという一次ビームラインがある。ここに1996年以来座りつづけ、実験を続けているのがE325(愛称は $\phi$ )である<sup>1</sup>。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、来る新年には360シフトのビームタイムを終え、めでたく実験を終了する。解析はいまだ半ばであるが、この実験から生まれつつある成果を紹介しよう。

ハドロン(陽子や中性子)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に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、そしてクォークの物性を調べてみようとい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状態を作るのがよからう。密度を上げるならJHF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。

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 $10^9$ /Spillのビームを突っ込んで360シフト走ろうという結構大仰な実験になった。以下、厳密性は程々にして、物理と実験の内容を述べる。

### 2. E325の物理

前述のように、質量をほとんど持たないカレントクォークは「カイラル対称性の自発的破れ」により有効質量を得てバレンスクォークになる。この破れの程度をあらわす量が真空のクォーク凝縮 $\langle \bar{q}q \rangle$ である。この値の温度と密度の依存性は理論的に予想されている(図1)。すなわち $\langle \bar{q}q \rangle$ は真空で、ある有限値をとっているが、高密度、高温状態ではその値が減少し、ある臨界値でゼロになる。すなわちカイラル対称性の破れが回復するわけである。残念ながらクォーク凝縮は観測量ではないため、実験的にこの現象を押さえるためにはもう一段の理論の助けが要る。

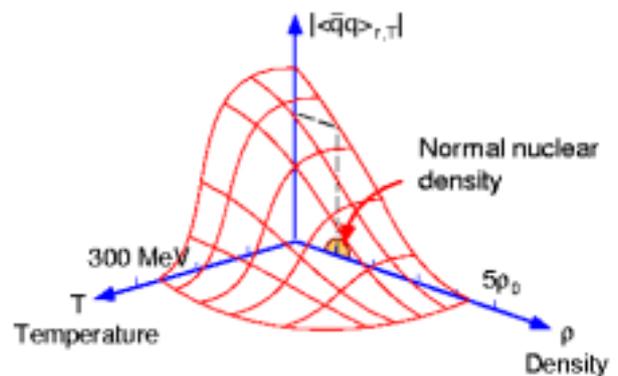


図1 密度と温度に対する $\langle \bar{q}q \rangle$ の依存性

図2に示したのは初田とLeeによる、有限密度下でのベクターメソンの質量変化に対するQCD Sum Ruleに基づいた理論予想である<sup>2</sup>。彼らの提案のポイントは、クォークの有効質量がもっとも都合よく現れる系としてベクターメソンを見なさい、ベクターメソンは温度や密度が変わるとクォーク凝縮の値の変化の影響を受け、その質量を

変えるであろう、その現象は原子核密度程度でも有意にあらわれるだろう、というものである(厳密にいうとスペクトラル関数が変化する)。

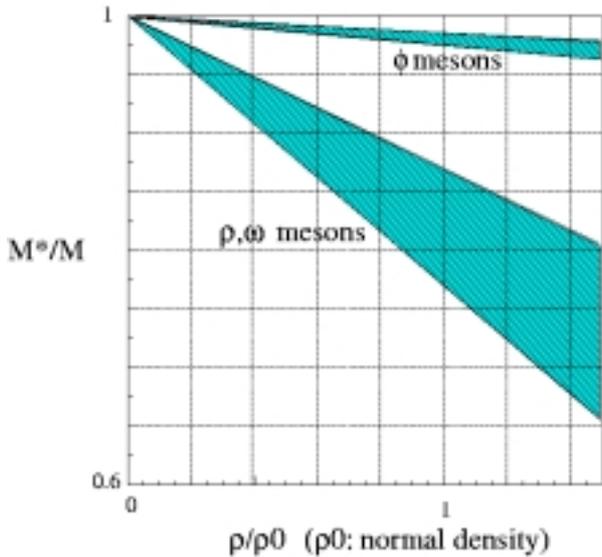


図2 有限密度下でのベクターメソンの質量変化。ハッチ部は理論的不定性をあらわす。

このような質量変化を実験的に見る実験的手法は2つある。1つには、核物質中で崩壊するメソンの不変質量分布を見ることである。このときには final state interaction を考慮するとレプトン・ペアの測定が望ましい。又、 $\phi$ メソンの場合の特殊な状況として、主たる崩壊モードである  $K^+K^-$ チャンネルへのQ値が小さいことがあり、 $\phi$ とKの質量変化の影響を受け、核内では崩壊比が変わる可能性もある。そこで実験としての狙いは、 $\rho/\omega/\phi \rightarrow e^+e^-$ と $\phi \rightarrow K^+K^-$ 両崩壊モードの測定においた。ここで注意すべき事は、核内で崩壊する場合、観測される不変質量は運動量の関数になる、すなわち分散関係を持つことであるが、この分散関係が真空と異なっている事を確認する為に不変質量分布がとてもよい指標となることは疑いがない。

もう一つの実験的手法はメソンが軽くなるならバウンドされるはずであるから、そのようなバウンド状態を探せばよからうというものである。これについては最近発見された鉛原子核での deeply bound pionic state の実験と同様な手法で探索を行うべく、GSIIにて東大、東工大グループが準備中である<sup>3</sup>。

本実験は前者の方法を取ったわけであるが、同様の不変質量の方法でマシフトの情報を与えている実験として、CERNの重イオン実験 CERESが高温状態での $\rho$ メ

ソンについて、核研ESのTAGXがヘリウム原子核中の $\rho$ メソンについて、それぞれ実験データを出しているのので、興味がある方は参照していただきたい<sup>4</sup>。

### 3. E325実験手法

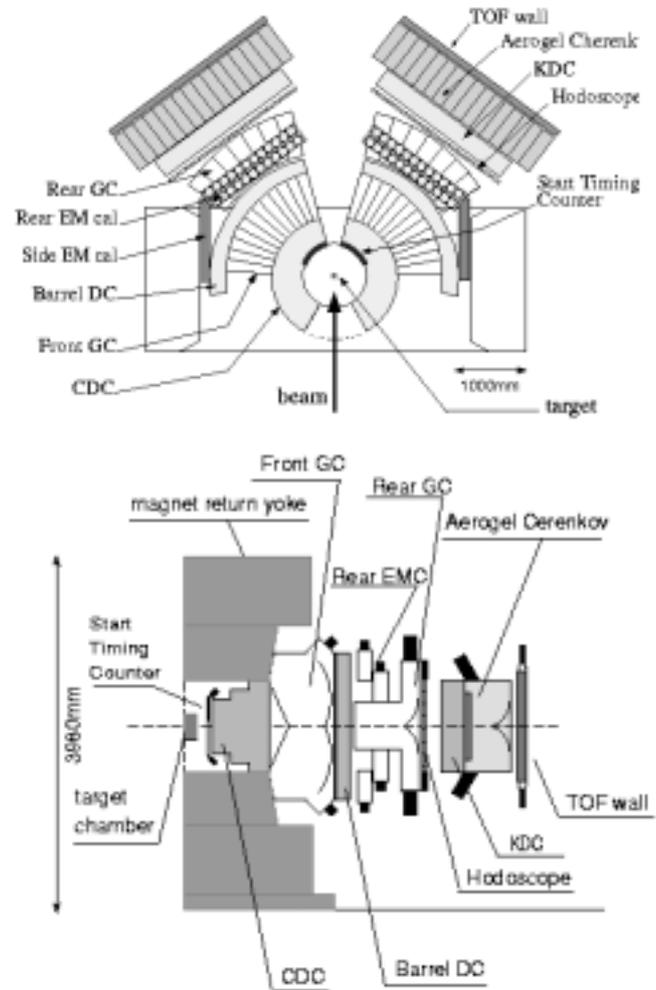


図3 E325 実験セットアップ。平面図(上)とKアーム部分の断面図(下)

図3に実験のセットアップを示す。基本的にダブル・アームタイプである。電子のアクセプタンスを稼ぐために水平方向は $6^\circ$ から $90^\circ$ 、垂直方向には $\pm 22^\circ$ をカバーしている。電子の同定は大気圧のイソブタンガスをつめた Segmented Gas Cherenkov と鉛ガラスの電磁カロリメーターで行っている。この鉛ガラスはトリスタンからのお下がりを加工して連結し、長手方向ではなく横から電子が入射するようにして用いた。これでも結構よい分解能(1 GeVで15%程度)ができるので、予算のない人にはお勧めである(四日市悟氏のアイデア)。

Kの同定は屈折率 1.03 のエアロジェルとTOFを組み合わせで行う。早いTDCを用いトリガー時にKをエンハン

スさせるのは今やPS実験の常套手段である。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ところの超臨界乾燥施設を用いて行った。こいつは普通は化粧品や缶コーヒーなどの香料を抽出している釜であった。ここに泊り込みで監督・指導にあたった石野雅也氏のおかげで、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。茂利製油ではその後、BESS や HERMES のエアロジェルを作っている。

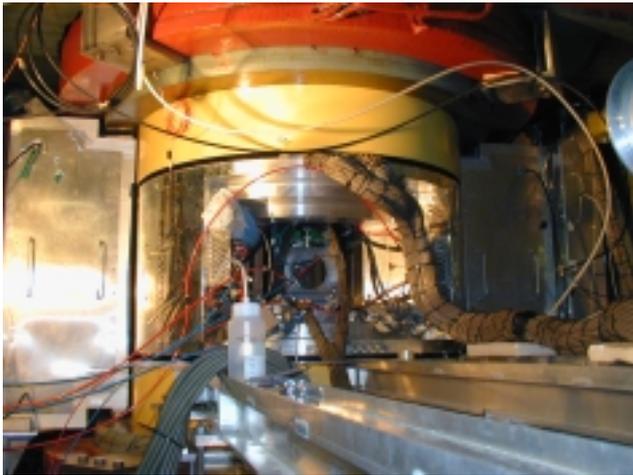


図4 実験セットアップ。上流から円筒型チャンバーと初段ガスチェレンコフカウンターを臨む。

トラッキングは両アーム共通で円筒型のドリフトチェンバーとバレル型のドリフトチェンバーで行っている。全部

で 14 層ある。最近、後述する面白い結果が出てきたので、トラッキング精度をより向上させるためパーテックスチャンパー3層を追加した。磁場は直径 2m ギャップ1m で、中心に原子核ターゲットを 3 枚串刺しで置く。中心から最後まで  $Bdl$  は 0.81Tm である。磁石は核研から移送された FM マグネットを改造して作った。塗りなおしていないので、昔のFMサイクロの関係者には一度ごらんになっていただきたい。当時をしのばせる落書きなどが楽しい。

#### 4. 実験結果

図5に最近 Physical Review Letter に掲載された本実験結果を示す<sup>5</sup>。これは電子陽電子対の不変質量分布を大小2種類(Cu と C)のターゲットで比較したものである。低いマスの部分がないのは左右のアームそれぞれに電子・陽電子を要求しているからである。

メソンは原子核反応で生成され崩壊する時、その寿命に従って、ある確率で核外および核内崩壊をする。見たいのは核内崩壊であるが、核外崩壊のピークが実験データの基準点として役に立つ。実験セットアップは重心系バックワードのアクセプタンスを広げて、原子核内部で崩壊するベクターメソンを効率よく収集する。

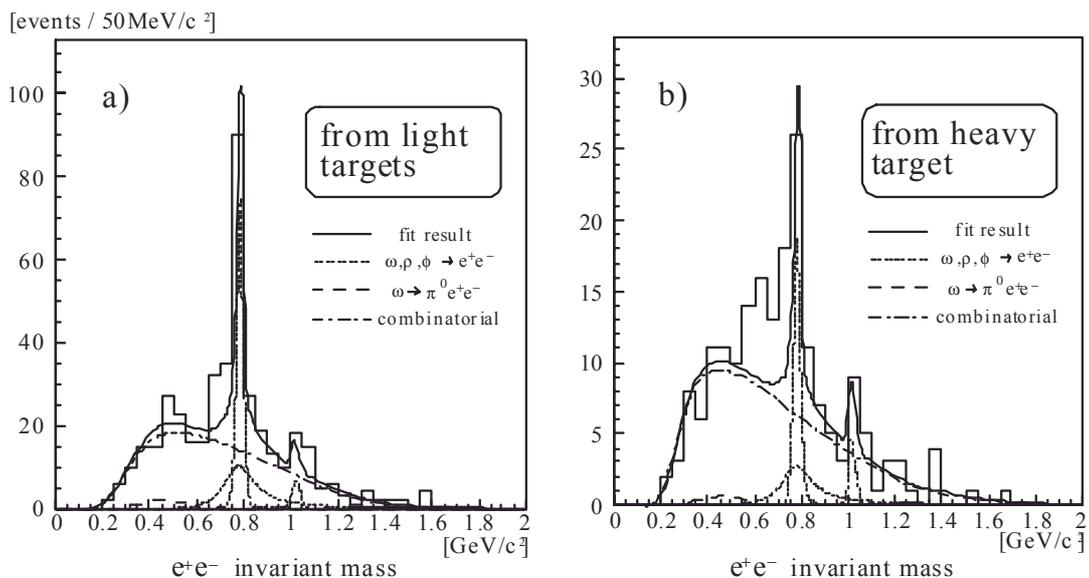


図5 KEK-E325 で測定された電子対不変質量分布。得られたスペクトラムを、combinatorial background と既知の電子対のソース、 $\rho$ 、 $\omega$ 、 $\phi$  およびそれらのダリッツ崩壊、でフィットしたもの。重い原子核の場合、 $\omega$ メソンのピークの下側に顕著なエクセスが見える。

図5をみると銅原子核の場合に $\omega$ メソンのピーク(核外崩壊によるもの)の下側に顕著なエクセスが見える(3 $\sigma$ 効果)。しかし炭素ターゲットの場合にはそのようなエクセスは見えない。このエクセスが核内で崩壊したメソンによってもたらされた事は確かである。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る。これはとても重大なことである。このエクセスをもたらし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。

現状での問題点として、これが $\omega$ によるものか $\rho$ によるものなのかが特定できないことがある。そのために解釈にはどうしても不定性が残ってしまう。別の批判として、メソンが核内で散乱をするため等価的に質量が下がって見える可能性も上げられているが、実際の理論計算ではこの実験で見えたような効果を生み出すほどの影響はない事が示されている。

このような状況を打ち破るには、 $\phi$ の電子対チャネルでの不変質量分布がキーポイントになるが、これにはもっと統計が要るので、収集したデータの解析が終わるまでおあずけである。現状でお見せできるのは $K^+K^-$ の不変質量分布である。実際スペクトラムをよくみると $\phi$ のピークの下にバックグラウンドでは説明しがたいエクセスが

みえた。しかし、 $a_0/f_0$ メソンの生成率とその $K^+K^-$ への崩壊比がよく分かっていないために、目指すシグナルがそれからの染み出しと区別できていない。現時点では $\phi$ が核内では $K^+K^-$ に崩壊できなくなっている可能性も残されている。ここでも電子対測定との比較が重要になっている。

他にもベクターメソンの生成確率の原子核質量数(A)依存性のデータを得た。 $\phi$ の生成レートを $A^\alpha$ で書くと $\alpha$ は $1.01 \pm 0.09$ と予想外に大きくなったが、JAM<sup>8</sup>と呼ばれる核内カスケード計算をやってみると、絶対値も質量依存性もよく再現された。アクセプタンスは限られているが、そこでの分布もよく再現された。コードの中の生成過程を追っかけてみると、 $\phi$ は原子核の表面で起こる最初の12GeV陽子の散乱ではなく、そこで生成されたメソンの二次散乱で生成されているため、原子核の厚みが効いて $\alpha$ が大きくなっていることが分かった。また、ポリエチレンと炭素ターゲットの差っぴきでもとめた水素原子核での $\omega$ の生成レートは、過去の実験とよく一致していることが示されている。こういった確認は地味であるが、実験をやっている当人にとっては非常に重要である。

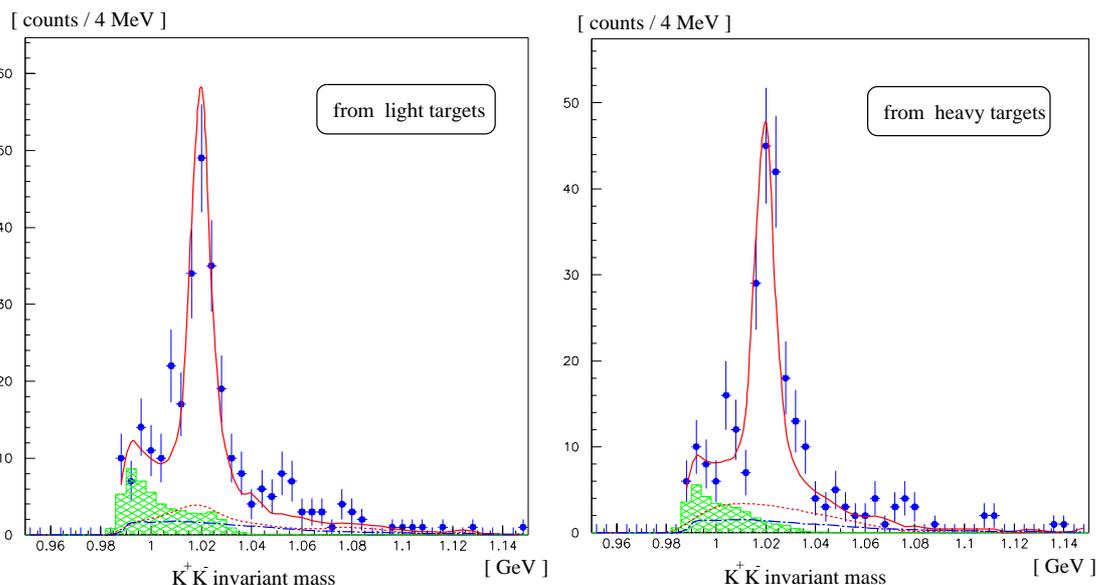


図6  $K^+K^-$ の不変質量分布。combinatorial backgroundと既知の $K^+K^-$ 対のソースでフィットしたもの。ハッチ部は $a_0/f_0 \rightarrow K^+K^-$ の寄与。

## 5. 終わりに

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、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ようである。ある意味、この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。どっちだったかは  $\phi \rightarrow e^+e^-$  のデータがものになったところで明らかになるであろうが、少なくとも現時点で言えることは、ベクターメソンは原子核内でマスシフトを起こしているという事実である。

こういった物理は理論的にも実験的にも未だ勃興期であるが、すくなくとも理論的には日本の物理屋の寄与がとて大きい分野である。実験側の一層の奮起が待たれている。

この実験はプロポーザルから数えると、すでに足掛け8年になり、学生中心で進めるプロジェクトとしてはとても長い。にもかかわらず、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。特に、三原智(現東大素粒子センター)、四日市悟(現理研)、石野雅也(現東大素粒子センター)、小沢恭一郎(現東大 CNS)、田原司睦(現理研)、成木恵(京大在学中)、武藤亮太郎(京大在学中)、佐久間史典(京大在学中)の諸氏にはこの紙上でその努力に感謝するとともに今後の奮闘も大いに期待したい。

トータル360シフトというビームタイムは原子核屋が提案した単体のPS実験としては(もうすぐシャットダウンするだろうから)空前絶後である。この実験をサポートしてくれたPACを含むPS実験関係者、特に一次ビームの調整やトラブルのたびに夜中まで付き合ってくださいるビームチャンネルの皆様に感謝したい。

## 参考文献

1. 実験の詳細は E325 homepage を参照:  
<http://www-nh.scphys.kyoto-u.ac.jp/phi/>
2. QCD sum rules for vector mesons in the nuclear medium. T.Hatusda and S.H.Lee, Phys. Rev. C46 (1992) R34
3. GSI/SIS proposal S214, Search for bound  $\eta^-$  and  $\omega^-$  nuclear states using the recoilless  $(d, {}^3\text{He})$  reaction.
4. Low Mass  $e^+e^-$  Pair Production in 158/A-GeV Pb - Au Collisions at the CERN SPS, its Dependence on Multiplicity and Transverse Momentum. G. Agakichiev et al. (CERES collaboration), Phys. Lett. B422 (1998) 405. Evidence for  $\rho^0$  Mass Modification in the  $3\text{He}(\gamma, \rho^0)\text{ppn}$  Reaction.. G.J. Lolos et al. (TAGX Collaboration), Phys. Rev. Lett. 80 (1998) 241-244.
5. Observation of  $\rho/\omega$  Meson Modification in Nuclear Matter, K. Ozawa *et al.*, (PS-E325 collaboration) Phys. Rev. Lett. 86 (2001) 5019-5022.
6. Study of Relativistic Nuclear Collisions at AGS Energies from p + Be to Au + Au with Hadronic Cascade Model. Y. Nara *et al.*, Phys. Rev. C61:024901 (1999)