

高エネルギー重イオン衝突と見果てぬ夢

浜垣 秀樹

東京大学大学院理学系研究科附属原子核科学研究中心

杉本先生との出会いは北大の四年生時に遡ります。その後、山崎・中井研究室に入りましたが、博士論文は阪大杉本研究室のバンデグラーフで行なった実験をもとに書きました。その後、核研に入り、杉本先生らが推進されたニューマトロンの先兵としてバークレイに派遣されて以来、ずっと高エネルギー重イオン衝突実験をやってきました。その間のことをスケッチします。

1. 杉本先生との最初の出会い

最初に杉本先生とお会いしたのは、北大理学部物理学科4年に在学中のことで、1973年2月頃、北大に特別講義に来られたときでした。既に4月から山崎・中井研究室へ入ることは決まっており、田中一先生のご好意で研究室のゼミ（G.E. Brown: Unified Theory of Nuclear Models and Forcesの輪講）に参加させて頂いておりましたが、自ら志望していながら、現実には原子核実験とはどういうものなのか皆目見当もつかない状態でしたので、杉本先生の講義は興味津々でした。

田中先生に紹介された杉本先生の第一印象は、その当時の私には何とも奇妙な感じだった大阪弁を話される快活なおじさんという感じでした。大阪弁に関しては、その後親しくお付き合い頂く人達に関西出身の方々が多い為、今では何の違和感もありませんが、その当時は未だ免疫が出来ていませんでした。北海道の冬は夏靴では到底太刀打ち出来ませんが、杉本先生も札幌に着いてさっそく鉢付きの靴を買ったと話しておられました。

C.J. Gorter（オランダの物理学者：1907 – 1980）についての話は印象的でした[1]。1954年、当時ライデン大学の教授であったGorterのもとを、有能な若い研究者が研究課題の相談に訪れました。Gorterは整列した原子核から放出される陽電子の非対称性の測定を提案します。若い研究者はその当時の常識（理論的予想）に基づいて非対称性測定に否定的な意見を述べました。Gorterは1896年に発見されたZeeman効果の例（H.A. Lorentzは期待される分離は小さいと予想）を引いて再考を促しましたが、若者は「そのような無駄な実験は私の時間の浪費である」と宣言しました。2年後、1956年のLee & Yangによるパリティ非保存についての提案に触発されて、数週間以内に非対称性を確認したときには既に後の祭りであった、という話でした。今に至る迄、研究を進める上での戒めとしています。

2. バンデグラーフでの研究

私が杉本先生と親しく接する機会を持つようになったのは、修士2年の春休み（1975年3月）に、中井先生に連れられてバンデグラーフに実験に出掛けたのがきっかけです。

私が入った当時の山崎・中井研究室ですが、それまでの原子核構造研究（主に磁気モーメント測定）が一段落し、色々な可能性を模索する時期だったように思われます。その一つが、原子核（やミューオン）を不純物プローブとした物性研究です。医科学研究所のサイクロトロンでも物性的研究が進められて、私も幾つか参加しました。杉本研究室で開発された偏極原子核ベータ線NMR法を用いてBとNのニッケル金属中で内部磁場を決めようという中井先生の発案で、初めてバンデグラーフを訪れました。最初の実験では谷畠さんに全面的に協力して頂き、首尾よくBとN両方についてNMR共鳴ピークが見つかり、上々の滑り出しました。

当初は実験の度に阪大に出向くというパターンでしたが、どうにも効率が悪いので、杉本先生の発案で常駐して研究することになりました。なんら制度的な裏付けもなく、謂わば居候でしたが、杉本研究室や江尻研究室の皆さんにも快く受入れて頂きました。

関西弁に囲まれて暮らすことには程なく慣れました。杉本研究室が持つピンと張りつめた緊張感は一種独特なもので、毎月曜朝のグループ打合せにはそれなりに心の準備をして望みました。実験が順調な時は良いのですが、あまりよい結果を持っていない時は最悪です。杉本先生は大体午前中は機嫌が悪い傾向がありましたが、出来るだけちゃんとした成果を見せようと努力したものでした。

杉本研究室で面白いと思ったのは、昼間は基本的に実験の準備等をやるのであって、机に向かっての勉強や論文読みは厳禁。それらは夜やるべしという不文律でした。私が研究に用いた実験セットアップを図1に示しますが、このセットアップで用いる β 線測定用にプラスティック検出器を新たに作る必要がありました。渡されたのは素材のみ。後は、プラスティックやライドガイドの切り出しから研磨まで全て手作業。フォトマルは、浜松の光電子増倍管本体、ミューメタル磁気シールド、ソケットと抵抗チェーン配線用の基板を頂いたきりで、外側のアルミケースも旋盤を用いて自ら加工するという徹底ぶり。暫くの間、朝から晩まで旋盤加工をやっていて、これでは昼間は論文を読む時間はないと納得した次第です。もっとも、何も杉本研究室だけのことではなかったと思いますが、非常に徹底していたことは確かです。

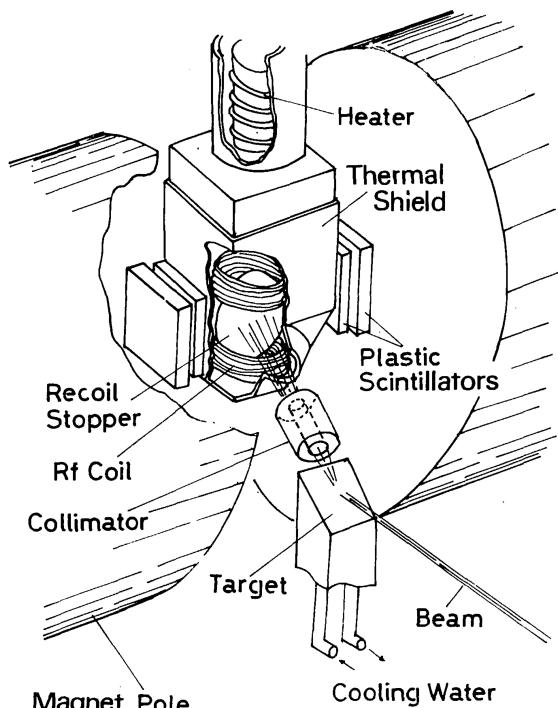


図1：ベータNMRを用いたBのNi金属中の超微細相互作用の実験研究に用いた装置の見取り図。

その後の研究ですが、収量の多い ^{12}B に絞って、まずは常温から転移点の上まで内部場の温度変化を測定しました。転移点近傍で内部磁場が小さくなつて来た辺りで、共鳴ピークが二つになりました。これは何の間違いだろうかと測定機器をチェックしても何の問題も見つかりません。温度を少しづつ下げながら、新たに見つかったピークの追跡を開始しました。常温に至る迄ピークは消えることなく、二つの内部場があることが確定しました[2]。最終的には He 温度での測定もおこない、内部場の温度変化を決めましたが、両方の内部場の温度変化は、ニッケル自身の内部場の温度変化とは異なり、ひとつは μ^+ のニッケル中での内部磁場の温度変化と良く似た傾向を示し、もう一方は、局所モーメントを持つ不純物についての場合のような面白い傾向を示しました。ニッケルは FCC (面心立方) 構造を持ちますが、杉本先生が金森先生に頼んでやってもらえた内部場の理論計算結果との比較で、ひとつは通常予想されるニッケル原子に囲まれた隙間、新たに発見されたのはニッケル原子に置き換わった場合と同定することが出来ました。

同じ FCC 金属である Al と Cu について同様に実験をおこなうと、四重極モーメントの違いから位置の決定が出来るのではないかと思いつき、山崎先生に頼んで Al と Cu の単結晶を購入し実験の準備を進めたのですが、マシンタイムの都合もあって (弱崩壊の second-class current の新しい実験が始まった)、自分の手で出来なかつたのは心残りです。心残りといえば、Fe についても同様の研究をしようということで、東北大金材研で Fe の単結晶を作つて頂いたのですが、中途半端に終わつてしましました。

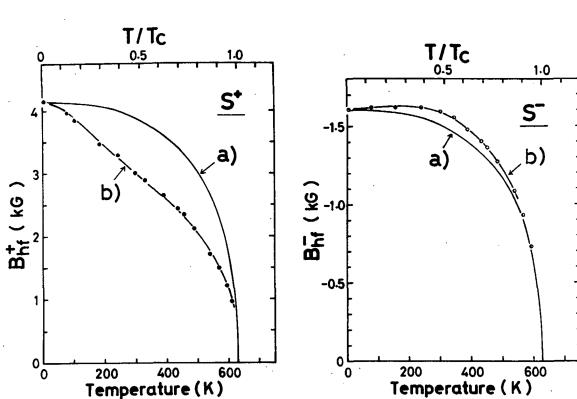


図 2: Ni 中の B の二つの内部の温度変化. a) は Ni の磁化、b) が B の内部場.

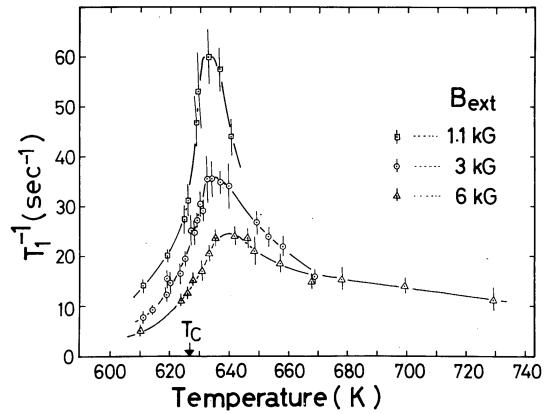


図 3: Ni 中での B 偏極の緩和時間の逆数の T_c 近傍での温度依存性.

内部磁場と同時に偏極の緩和時間も測定しました。全体的には緩和時間は絶対温度の逆数に比例する傾向が確認されましたが、強磁性・常磁性の臨界温度付近では緩和時間が極端に短くなつてゐること (所謂 critical slowing down) に気がつきました。泥棒を捕まえたあとで縄をなうように俄勉強し、その後の研究目標を臨界点近傍での内部場と緩和時間の測定に定め、ほぼ一月に亘る長期実験をおこないました。主な実験遂行者は私と野尻さん (当時助手)。野尻さんはクラシック好きの物静かな方でしたが、杉本先生に心酔されており、実験物理屋としての心構えややり方について随分と教えて頂きました。さすがに実験終了時には二人とも疲労困憊し、私は体重が

10 キロ程（ちょっと大袈裟か？）減っていました。

外場をゼロにしないと厳密な意味での相転移は実現しません。この実験ではそれは難しいことなので、外場を変えたデータを取ってそのゼロ磁場への外装という手段をとりました。緩和時間の温度変化の測定結果を図3に示します。相転移近傍での物理量の温度依存性から荒い精度でしたが臨界指数を導出し、緩和時間の臨界指数から、イオンに局在する電子が磁気モーメントを担う（Heisenberg 模型）よりも格子間電子の寄与が重要という描像に近いことを示すことが出来ました。以上の仕事をまとめて博士論文とし、フルペーパーは杉本研究室の仕来りに従ってJPSJに投稿しました[3]。この間、守屋先生（当時、物性研）には色々とご教唆頂き、Heisenberg 模型での臨界指数の計算までやって頂きました。

3. バークレイへ

1977年春に原子核研究所に助手として採用され、坂井光夫先生（当時、核研所長）のグループに配属になりました。その昔、山崎先生も所属されておられたグループで、山崎・中井グループの先輩、橋本さんが在籍していました。この頃から橋本さんにはお世話になりっぱなしで、何のお返しも出来ぬままになってしまったのが心残りです。

原子核構造を勉強し直し、核研のSFサイクロでの研究等にも参加し、実験を主催してみたりしたのですが、正直なところ余り強い興味を持てませんでした。理解不足が理由の大半だったと思いますが、立派な先達者が沢山居るところで競争するのは正直シンドそうに思いました。SFサイクロの非力さも気分を萎えさせる要因でした。話は少し前後しますが、核研に赴任された杉本先生からもらったアドバイスは、こういう状況では余り高望みしないで、コツコツと測れるものを測るのも悪くない。例えば、ベータ崩壊の寿命とか精度良く測られていないものもあるので、そういうものを考えてみたらどうかというものでした。少し気分が軽くなって、考え始めていた矢先、LBL BEVALACでの研究の可能性が急浮上し、それきりになってしまいました。

そういううちに、ニューマトロン計画推進の為、杉本先生が核研の所長として赴任されました。1973年の秋にμSR実験遂行のためバークレイに出かけた永宮さんが、その後もバークレイに留まりBEVALACで重イオン衝突の研究を始められたこと、1976年には、それまで阪大で公私ともにお世話になっていた谷畑さんが出かけられたこと等から、新しい風を感じていたのですが、ここに来て具体的な参加の道筋が見えてきました。

1979年に核研とLBLの共同研究が開始されましたが、先ず志田さんが核研側の代表に決まり、核研側の先兵として橋本さんが派遣されました。1980年の夏には私の番が回ってきました。私に取ってはこれが最初の海外出張でしたが、1984年の初め迄都合3年半長期滞在することとなりました。

バークレイで過ごした日々は本当に良い思い出です。日本では中々実行出来ないことが、家族ぐるみのお付き合いが日常的に行なわれ、グループの人達の家を訪れたり、ピクニックに出掛けたり。谷畑さんに誘われてゴルフも始めました。独身の頃は、永宮さんのところでしばしば夕食をご馳走になりました。

BEVALACでの研究を開始し暫くして、そもそも重イオン衝突で高いバリオン密度や高温を持

つ状態というものが生成出来るのだろうかという疑問に直面しました。自発的というよりは、谷畠さんが進めておられた陽子+原子核衝突における二粒子相関実験に関して色々と話を伺ったのが発端だったと思います。話が少しずれますが、この実験には三明さん（当時、阪大院生）が加わり、主戦力として活躍しておられました。お互い独身同士ということで、after five を一緒に楽しむ機会も多かったと記憶しています。さて、話を戻します。BEVALAC は衝突エネルギーが低いため、衝突の大半は核子同士の弾性散乱です。（特に軽い原子核同士の衝突では）系が熱化するに十分なだけの衝突回数を確保出来るのだろうかという問題設定ですが、実際、軽い系についてのモンテカルロ計算の結果を見ますと、放出陽子スペクトルの低運動量部分は数回以内の衝突からの寄与が大半であるように見えます。こういうことから、取り敢えずは、高運動量領域や重い原子核同士の衝突を見てみようと考えました。熱化の疑問は今に至るも基本的な問題として残っていますが、後に RHIC での状況を触れます。

ベバラックでは HISS と呼ばれる大型スペクトロメータの建設が進行中で、私は TOF システムの建設、動作確認等を手掛けました。その HISS を用いた実験として、800MeV/核子 C+C 衝突からの高運動量粒子生成実験をおこないました[4]。広い運動領域に亘って重陽子、三重陽子のスペクトルが陽子スペクトルのコアレッセンスで説明出来ることを示しました。また、図 4 に示すように、高運動量領域での陽子収量はカスケード計算結果より大きく、配位が位相空間一杯に広がっていると考える模型とよく合うことがわかりました。高運動量領域は多重散乱からの寄与が大きいことは予想されていたとおりでしたが、位相空間一杯を満たす機構を想像することは容易ではありません。重イオン衝突のような複雑な過程においては、こういった現象にしばしば出会います。

もうひとつの試みは、重い原子核同士の衝突です。橋本さんとの共同提案で La+La 衝突実験をおこないました。永江さんが書いておられるようなので詳細は省きますが、林茂広くんがキッチリとデータ解析を行ない、流体的振る舞いを示唆していると考えられる結果も得ました[5]。もっとも、流体的振る舞いの研究には、ドイツのグループが建設した大立体角を覆う Plastic Ball が絶対的に有利です。日本グループはこの後も立体角の限られたスペクトロメータを採用することが続きました。予算の貧しさが大きな理由ですが、どうもそれだけではない国民性みたいなものを感じます。

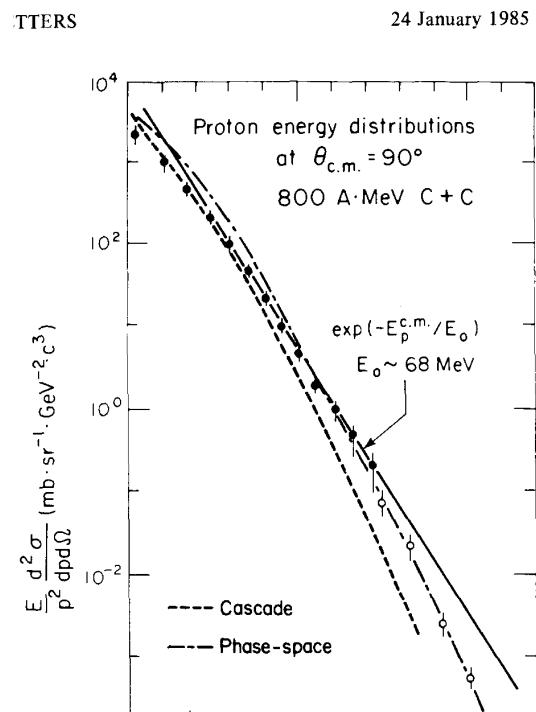


図 4: 800AMeV C;C 衝突における CM90 度での放出陽子のエネルギー分布。

4. ロングアイランドへ

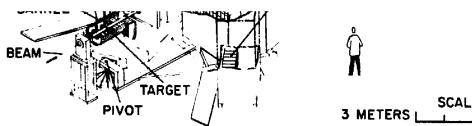
BNL は将来の RHIC 建設を見据えて、AGS での重イオン衝突実験計画の具体化に動き始め、E802 実験にむけての準備も始まりました。1983 年に米国 NUSAC が CEBAF 後の大型計画として、RANL が推す大強度ハドロン加速器ではなくて、高エネルギー原子核衝突型加速器に第一優先度を与えたこと、BNL が進めて来た高エネルギー分野の陽子衝突型加速器が超伝導磁石開発の遅れから中止になったことが背景にあります。

私は個人的には杉本先生から伺った Fermi 研究所 Tevatron での陽子-反陽子衝突による QGP 探索のアイデアに惹かれ、その主催者である R. Scharenberg 先生 (Purdue 大学) をセミナーがてら訪ねたりしました。Scharenberg 先生は杉本先生の昔からの知り合いで、今も STAR 実験でご活躍中ですが、国際会議等でお会いすると相変わらず「面白い結果／アイデアが有るんだけど」と議論を吹っかけて来られます。Tevatron での研究には強く惹かれるものがあり、参加することを真剣に考えましたが、具体化まで持っていくことは出来ませんでした。

BNL の第一印象は余り芳しいものではありませんでした。なんだか人が取っ付き難い感じで、周りにおいしいレストランが少ないのも大きな不満でした。食事や気候に関してはパークレイと比較するのは如何にも酷です。ニューヨークに行けば何でもある訳ですが、当時のニューヨークは非常に治安が悪く、それなりに心して行かねばという感じでした。その後、治安は随分と改善され、すれ違う黒人の目つきが大分穏やかになっていることに吃驚しました。

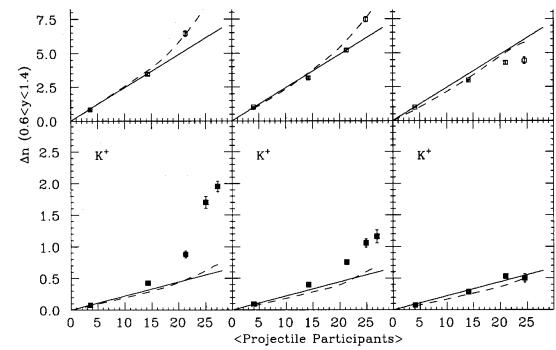
さて、この頃には QGP (クォーク・グルーオン・プラズマ) が重イオン衝突研究の標準的な探索目標となっていました。ベバラックでは、研究対象はパイオン凝縮や Lee-Wick 物質といったハドロン多体系だったのですが、「QCD の漸近自由性」(1973 年) に触発されて、クォークスープというアイデアが生まれたのは早くも 1974 年でした。この後、物理の焦点はハドロン物質からクォーク物質へと急速にシフトしたわけです。

当然のことながら、E802 実験の主題もストレンジネスをプローブとした QGP 探索でした。



etch of E-802 showing the relative location of the different components. See text for a detail that the two large lead-glass arrays, PBGL, are partially phantomed with dash-dot lines for the components.

$n \times 0.05$ cm scintillator for timing and π^+ detection, and 8 cm downstream of BTOF is a 0.3 cm veto counter (BVETO) with a 1 cm aperture that defines the final geometry to be one meter beyond BVETO. Eleven cm from the target one additional 7.6 cm 0.16 cm scintillator (BE) is placed in the timer and is used for a second charge signal by the calorimeter (ZCAL) measures the energy of any projectile-like fragment plus particles produced at angles close to zero



s observed in the rapidity range $0.6 < y < 1.4$ plotted versus the average number of projectile participants. The upper frames are for π^+ mesons, the lower for K^+ . The straight lines are fits to the data and the dashed lines are the predictions from the FRITIOF model. See text for explanation of normalization in table I and correspond to N_p^{part} values of 0-9.7 (W1), 9.7-18.8 (W2), 18.9-23.6 (W3), 23.6-28.5 (W4).

図 5: BNL AGS の E802 実験セットアップ。

BEVALAC 以来伝統（？）の磁気スペクトロメータ（図 5）が建設され[6]、三明さんが高性能の

図 6: π^+ と K^+ 収量の、Si+Au Si+Cu Si+Al における participant 数依存性。

TOF システムを開発しました。私は主スペクトロメータの後方におかれた高運動量粒子識別用のチエレンコフ複合システムを担当しました。

$p+A$, $Si+A$ 衝突について粒子生成の系統的なデータが取得されました。得られた結果の一例を図 6 に示します[7]。 $Si+A$ 衝突について、 π と K 収量を衝突関与数の関数としてプロットしたものですが、特に $Si+Au$ 衝突において、中心衝突度が上がるにつれて K 収量の顕著な増加が見られました。しかしながら、この増加傾向は基本的にはハドロンベースのシミュレーション模型によって再現されることが分かり、少しがっかりしました。

AGS での重いイオン加速計画に合わせて、E866 実験をプロポーズしました。目的は、予想される高バリオン密度状態実現の検証と性質研究ですが、中心 rapidity 付近の陽子測定用の前方磁気分析器を建設しました[8]。ここでは、志垣くん、佐甲くんが作った TPC と、三明グループが作った TOF が活躍しました。図 7 に結果の一つを示しますが、陽子の dN/dy を $Si+Al$ 衝突の場合と比較すると、中心 rapidity 付近に陽子が集まっていることが判ります[9]。

AGS ではひとつ心残りがあります。それは $Au+Au$ 衝突における電子対測定の計画です。1987 年頃にプロポーザルの準備を進め、私以外に H.G. Ritter (LBL)、G. Young (ORNL)、O. Hansen (BNL) が中心となり (Gang of Four), J. Carroll (UCLA)、G. Roche (Clermont-Ferrand U.)、T. Hallman (John Hopkins) らが集いました。ひとつ残念だったのは、この時期、ベクターメソンの媒質効果を調べることの重要性が未だ一般的には認識されていなかったことです。かなり高額な計画にも拘らず物理が貧弱ではないかと AGS の PAC で問題となり、PAC 委員だった

J.D. Bjorken 先生が低質量領域の電子対生成は理論的によく分からないなどと否定的な発言したことが致命傷となって、プロポーザルは却下されてしまいました。Bjorken 先生自身、低質量領域の電子対生成についての論文も書いているのに、何を血迷ったかと憤慨し詰め寄ったところで、PAC での発言が取り消されることは無く、後の祭りでした。恐らくあと一年遅ければ、十分な理論的バックアップを得て、プロポーザルは認められていたのではないかと思います。結局 AGS は最後まで電子やミューオンの測定装置を持たず、何処かの国際会議の研究総括の折に、AGS に欠けているもっとも重要な測定量と指摘され、悔しい思いをしました。

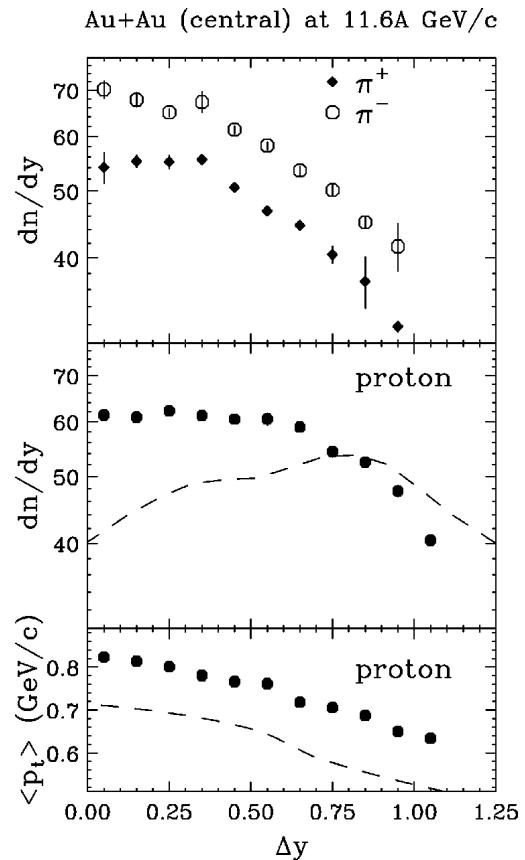


図 7: 11.6AGeV $Au+Au$ 衝突における π^+ , π^- の dn/dy , 陽子の dn/dy , 及び陽子の平均横運動量。破線は $Si+Al$ の場合の結果。

5. RHIC での研究にむけて

1991 年に RHIC の建設が開始されると、俄然、実験グループ編成に向けての動きが活発になりました。LBL が中心母体の TPC を主検出器とする STAR 実験、永宮さんを中心とする OASIS 実験、ORNL が提案した DiMuon 実験、が大型の提案でした。早野さん、秋葉さん、私たちはそれよりは小型の Tales という電子対測定に特化した検出器を提案しました。最終的に Tales は、Stony brook のグループ (P. BraunMunzinger 氏、J. Stachel 氏) が提案した良質な電磁カロリメータを売りにする SPARC と合体して、TALES/SPARC として PAC に臨むことになりました。物理観測量に関しては結構自信を持っていたのですが、STAR 実験のみが採択され、それ以外の提案は却下されました。BNL management からは、残った連中でグループ再編を試みよというお達しが下りました。このとき、Shotgun marriage という言葉を覚えました。1991 年の 9 月のことです。

この再編騒ぎを経て、OASIS と DiMuon と TALES/SPARC の物理的な狙いを併せ持った PHENIX (当初の名前は RE2 : RHIC experiment #2 という味気ない名称) が生まれました。当初、RE2 が出来上がるまでは BNL management の指名により Sam Aronson 氏が spokesperson を務めましたが、組織が安定したところで永宮さんが spokesperson、Sam Aronson 氏が project manager という安定した体制になりました。検出器建設スケジュール・予算の厳しいレビューを経て実際に建設開始の許可が出たのが、STAR 実験が 1993 年の 1 月、PHENIX 実験は 1994 年の 3 月でした。

日本グループは、東大核研 (後に東大 CNS+KEK) (+早大、長総大、ORNL、SUNY、FSU、BNL) が RICH、筑波大三明グループ (+Columbia 大) が TOF、広大杉立グループ (+Columbia 大) が BBC、それぞれの建設を受け持つこととなりました。また、新井さん (KEK) が TMC という DC 用の読み出しチップを開発しました。検出器建設は、主に日米協力 (高エネルギー物理学) のサポートを受けて行なわれましたが、建設開始前から建設期間中に日米を担当されておられた菊地健 KEK 副所長には随分とお世話になりました。

建設が開始されると、各検出器責任者は、ほぼ毎月一回 BNL 開催される進捗状況報告会に出ることが求められました。恐らく今だとインターネット会議で済ますことも可能でしょうが、その当時は皆が集まる会議が一般的でした。実際のところ、リモート会議は表面的な会議には十分ですが、腹を割って話さなければならない場合にはやはり face-to-face が一番です。当然のことながら、日米の往復は頻繁となり、疲労のあまり、JFK で飛行機に乗り込んだ直後に眠りに落ちて成田に着陸したときの衝撃で目が覚めたということもありました。ニューヨークとの往復には専ら United Airline を使いましたが、その頃の積算が効いて数年前に 1 Million Miler となり永年 Premier Gold の資格をもらいました。もっとも、私などよりずっと剛の者もおられますので、特筆すべきことでもありませんが。

2000 年の実験開始に向けて、検出器開発・建設は結構シンドイことも多かったのですが、遂行する上で多くの楽しみもありました。ひとつは良き仲間に恵まれたことです。秋葉さん、志垣さんは AGS 実験以来の仲間ですが、RICH 建設に新たに加わった T. Hemmick 氏 (SUNY) や T. Frawley 氏 (FSU) の貢献無しでは RICH 建設は大幅に遅れたことでしょう。また、読み出し回路系の開発は、G. Young 氏 (ORNL) 及び ORNL の回路開発グループの助力、田中義人氏 (長総大)、菊池順氏 (早稲田) の参与なしには到底完成しなかったと思います。勿論、CNS、早稲田大学、長

総大の学生諸君の頑張りについて mention 無しで済ますわけにはいきません.

5.1. CERN の動向

2000 年の RHIC の稼働を前にして, CERN は先手を打って SPS での実験研究は QGP 実現を示唆するという記者発表をおこないました[10]. CERN の次期計画は LHC での重イオン衝突実験ですが, LHC の建設が主として予算の関係で大分遅れがちであったため, 随分とヤキモキしていたことは容易に想像出来ます. そういうこともあって, ともあれ, これまでの成果を総括し, QGP に迫ったことをアピールする狙いがあったようです.

正直なところ, CERN SPS での研究は, AGS での研究と比較して, 質・量ともに遙かに充実したものでした. 一つにはやはり入射エネルギーの違いが大きく, SPS だとそろそろ QGP 相の境界辺りに届きそうな感じがありました. 特に, J/ψ 収量が $Pb+Pb$ 衝突の中心衝突付近で急激に抑制される振る舞いは, 通常の過程では説明出来そうもないもので, 今でも依然として QGP 生成の大きなヒントであると考えられています.

6. RHIC での研究成果

RHIC での研究成果について, 限られた紙面内でその全貌を説明するのは困難です. 興味のおありの方は, 例えば日本物理学会誌の解説記事 [11,12,13]を読んで見て下さい.

6.1. ジェットクエンチング効果

2000 年に衝突が始まる前の年くらいから, 先ずは何を測ろうか真剣に議論を始めました.

私は当時ハードプロセスの物理検討グループの取りまとめをしていましたが, パイ中間子 (実際は $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ 崩壊の 2 光子を測定する) を使ってジェットクエンチング効果を見るのが面白そうだと考えました. 衝突の初めの頃は未だルミノシティも上がらないだろうし, それならば収量の多いパイ中間子ならばある程度高い運動量領域までいけそうと見積もった上での現実的な解です. ジェットクエンチング効果というのは, 大角度散乱されたパートンが高密度媒質中を通過する際に強い相互作用により大きなエネルギーを失う現象で, 理論的な予想が注目されておりました.

ここで気になったのは, CERN SPS での結果で, そのようなエネルギー損失の兆候は見えていませんでした. ひとつの可能性は, 高エネルギー重イオン衝突において, 高密度状態は出来ないのではないかと言うことです. 高いエネルギーの衝突では, 実効的な結合定数 α_s の大きさは小さくなり, 出来る状態はより自由気体に近い状態で、従って, 系はどちらかというとスカスカで, 勿論平衡状態な

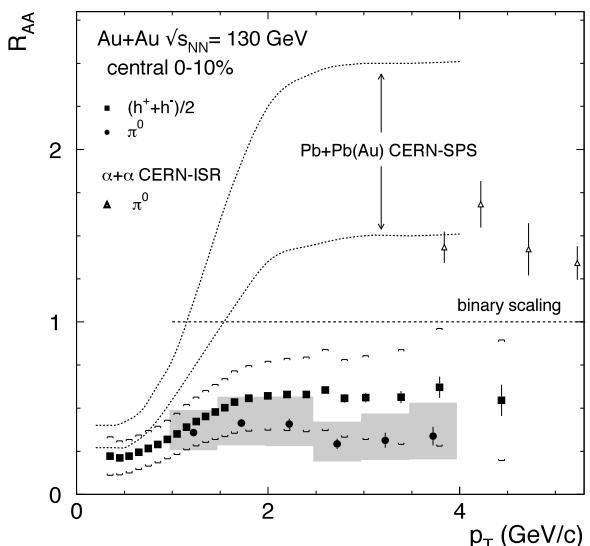


図 8: 核子対あたり 130GeV の Au+Au 衝突における π^0 と荷電粒子に対する R_{AA}

どは望むべくも無い、ということだったらどうしようと言う恐怖にも似た気持ちを味わいました。熱平衡云々は別として、少なくとも高い密度状態が出来ているかどうかを調べることは最重要課題であると再認識しました。

図8に、2000年の最初の Au+Au 衝突(衝突エネルギーは最高の 200GeV ではなくて, 130GeV)において得られた、 π^0 及び荷電粒子についての R_{AA} (Nuclear Modification Factor) を示します[14]。有意な収量抑制が見て取れます。更に、翌年に取得した 200GeV でのより高統計データにより、収量抑制はより確実なものとなります[15]。因に、130GeV での π^0 データの解析を担当したのは大山くんで、彼はこの結果を基に博士号を取得しました。

この収量の抑制がジェットクエンチングに依るものであるとの最終確認には、d+Au 衝突の結果[16]、及び単光子収量の測定結果[17]を待たねばなりませんでしたが、RHIC での実験開始早々に、衝突初期に高密度状態が出来ていることが直接的に確認されたことの意義は大きいと思います。

6.2. 楕円的方位角異方性

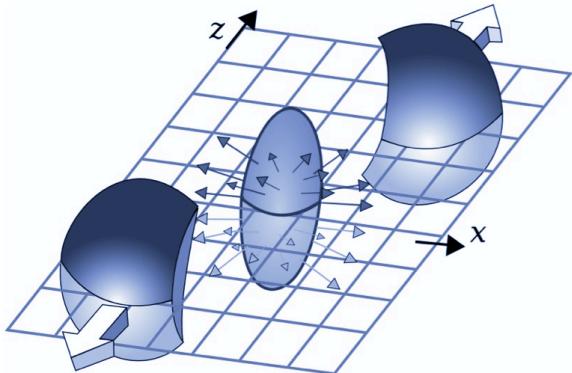


図9: 有限衝突径数での原子核衝突の様子。原子核の進行方向から見ると、二つの原子核が交わる領域「衝突領域」が近似的に楕円形状を持つ。

RHIC における楕円的方位角異方性について先鞭をつけたのは STAR 実験でしたが、PHENIX 実験においてもその重要性は直ちに認識され、研究が開始されました。大きな楕円的方位角異方性の発見は、RHIC での研究において最も重要な成果であると考えられます。

楕円的方位角異方性について簡単に説明します。図9に示すような有限の衝突径数を持つ衝突、即ち非正面衝突、を考えます。この時、衝突する原子核の重なりあう反応関与部 (participant region) の断面がラグビーボールのように非等方になります。この形状における非等方性がその領域で生成され放出される粒子の方位角分布の非等方性に転嫁されるわけですが、その度合いは

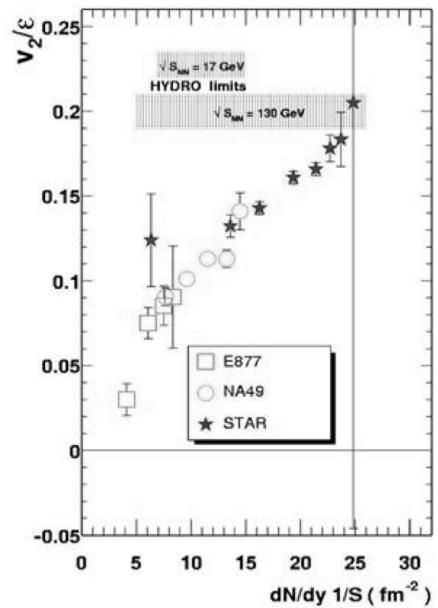


図10: 楕円的フローの大きさ v_2 を反応領域の離心率で割ったものを、粒子密度 dN/dy を反応領域の断面積 S で割った量の関数としてプロットしたもの。RHIC (★), SPS (○), AGS (□)。RHIC と SPS での、完全流体に対する流体模型計算結果を比較のため示す。

定性的にいようと関与部がスカスカでしているか、混み合っているかで決まります。スカスカしていると、粒子はどちらの方向にも自由に飛び出せますので、方位角異方性は小さくなります。混み合っていると、粒子は自由に動くことは出来ず、その周りの粒子と協調して集団的に運動する結果、大きな方位角異方性が生まれると予想されます。

RHIC で観測された橿円的方位角異方性の大きさは、そのもっとも極端な場合、即ち、比粘性 $\eta/s = 0$ の理想流体の場合に期待される値に近いものでした。STAR 実験がまとめた結果の一例を図 1.0 に示します[18]。

粒子的な描像に立って言うと、比粘性 η/s が小さい流体が成立する条件は、系の構成要素間の相互作用が強いというで、strongly interacting QGP、略して sQGP という概念が生まれました[19, 20]。因みに、比粘性 η/s が小さいということはその間のエントロピー生成が小さいことを意味し、系の発展が準断熱的（準可逆的）であることを意味しています。

流体模型は、今は、高エネルギー重イオン衝突における時空発展を記述する基礎模型として確固たる立場を築いていますが、その成功の大きな要因が幾つか挙げられます。一つは比粘性 η/s が小さい強結合流体であることそのものです。低いエネルギーでの衝突においては、流体模型（その頃は $\eta/s=0$ の理想流体を仮定）は実験データを全くと言って良い程説明出来なかった為、非現実的な模型と考えられていきました。それが RHIC や LHC では標準的な模型と看做される事になるというのは嬉しい想定外でした。

もう一つ成功の要因に挙げられるのは、どうやら衝突直後（~1 fm/c 以内）に系は熱化を完了するらしいということです。グズグズしていると衝突時に作られた形状がドンドン崩れてしまつて、実験結果を再現することが難しくなります。この熱化の過程は系のエントロピー生成の大部分を担っており、また、その結果が流体的発展の初期条件となっていますので、その理解は非常に重要であることは言うまでもありません。それにも拘らず、この衝突初期における熱化が何故にこんなに早く起こるのかについては、今のところ満足のゆく答えはありません。この過程はすこぶる非摂動的な非平衡過程である為、取り扱いがすこぶる難しいのです。この過程をどうやって理論的に記述するか、実験的にどうやってこの過程を理解するのに必要な情報を得るか、今後に残された大きな課題です。

6.3. ハドロン化過程と QGP 生成の証拠

QGP 生成の明確な証拠は何という問い合わせに答えることは、実は今でもそれほど容易くないよう思います。そういう中で、実は陽子とパイ中間子の収量比と異方性依存性という簡単な測定量を、少なくともクォーク自由度が明確に現れる現象として挙げることができます。

RHIC での研究のごく初期に、原子核衝突においてはバリオンとメソンの収量比の横運動量依存性が p+p 衝突と随分違うことが見出されました。図 1.1 は、Au+Au 衝突における陽子と π 中間子、及び反陽子と π 中間子の収量比を横運動量の関数としてプロットしたものですが、周辺衝突（衝突中心度 60-92%）では、ISR での陽子 + 陽子衝突時の結果（★印）と良く一致していますが、衝突が中心衝突に近づくとともに著しく増加することが見て取れます[21]。

このようなバリオンハドロンとメソンの振る舞いの違いを説明するために、再結合描像が提案されました。高エネルギー衝突でのハドロン生成は通常はストリングフラグメンテーションやペー

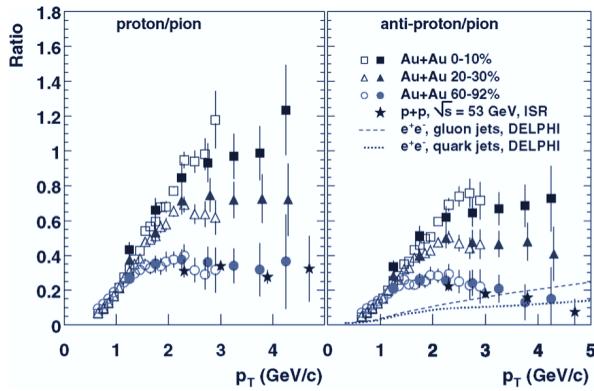


図 1.1: 核子対あたり 200GeV での Au+Au 衝突における収量比: (左)陽子／ π 中間子, (右)反陽子／ π 中間子. 図中 0-10% 等は中心衝突度を表わす. ★印は ISR での $\sqrt{s} = 53\text{GeV}$ での p+p の結果.

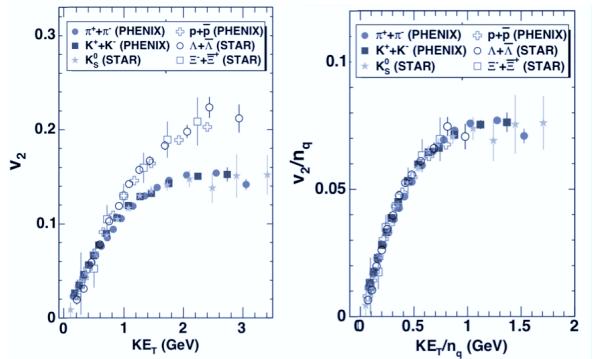


図 1.2: 核子対あたり 200GeV での Au+Au 衝突における数種類のバリオンとメソンの v_2 の (左) 横運動エネルギー依存性, 及び(右) X-Y 両軸とも構成クォーク数 n_q で割ったもの.

トンカスケードといった一つの源の分裂過程として記述されますが, 重イオン衝突においてはそれに加えて QGP スープから蒸発するクォークや反クォーク同士の再結合過程からの寄与が大きいと考えたわけです[22].

更に, この描像を用いると, ハドロンの収量だけでなく方位角異方性に見られる面白い傾向もうまく理解出来ます. 図 1.2 の (左) 図は, 数種類のバリオンとメソンについての v_2 を横運動エネルギー m_T の関数としてプロットしたもので[23]. バリオンとメソンできれいに二つの傾向に分かれています. ここで, $p_T \sim \text{数 GeV}/c$ 以下のハドロンは主に再結合過程が生成され, 更にハドロン化の後大きな擾乱を受けないとすると, ハドロンが持つ方位角異方性は元の構成要素が持つ異方性の和で表わすことが出来ます. 図 1.2 の (左) 図の X-Y 両軸を, ハドロンを構成するクォーク数, 即ちバリオンの場合は 3, メソンの場合は 2, で割ったものを図 1.2 (右) 図に示しますが, バリオンとメソンの違いはほぼ完全に解消され, 統一的に記述されています.

これらの結果は, ハドロンの生成に QGP 起源のクォークが役割を果たしていることを示唆しており, 更に踏み込んで QGP そのものの存在についての証拠と考えて良いと思います.

このシンプルな描像は大きな成功を収めましたが, 釈然としないものが残ります. それは, この模型の登場人物が大きな質量を持つ構成子クォーク (constituent quark) のみで, グルーオンの自由度はあらわにして来ないからです. これについて, 満足のゆく説明は未だありません. 相転移近傍での系の振る舞いやハドロン化過程について, 理論的な記述がちゃんと出来ていないからです. このあたりのことについて後で少し私見を述べたいと思います.

6.4. J/ψ 抑制について

J/ψ 粒子収量の抑制は, 松井と Satz による提案[24]以来, 閉じ込めの破れの有力な証拠として常に注目を集めて来ました. そのシナリオは概略以下のようなものです. J/ψ 粒子はチャームクォークと反チャームクォークからなるメソンですが, チャームクォークは質量が大きいために主に初期衝突時に生成され, それ以降に生成される確率は低いと考えられます. 予言当時の格子 QCD 計算では相転移温度付近で J/ψ 粒子は融解するが, チャームクォークの再結合により J/ψ が生成

される確率は小さいので、一旦溶けてしまったらほとんど再生されません。従って、 J/ψ 粒子の収量の減少は QGP 生成のよい指標になると考えられたわけです。先にも触れましたが、SPS において J/ψ 抑制が確認されたことで[25]、RHIC における J/ψ 粒子の測定結果が待たれました。

RHIC の運転が開始されしばらくたった頃、理論的に大きな進展があり、 J/ψ の融解についての描像が覆る事態が起きました。詳細は割愛しますが、浅川さんと初田さんが有限温度でのメソンスペクトル関数の格子ゲージ計算を行ない、相転移温度の 1.6 倍程度の高温まで J/ψ に相当するピークが残存する結果を得ました[26]。この結果は強結合 QGP 中におけるハドロンの自由度やハドロン的相関の重要性を示唆していると考えられますが、全く未開拓です。

RHIC では、衝突初期に生成されるチャーム・反チャーム数が SPS に比べて格段に多いため、再結合による J/ψ 収量増加も無視出来ないのが大きな修正点の一つです。先走って言いますと、RHIC では再結合の影響は顕著には見られていませんが、LHC の Pb+Pb 衝突においては、再結合効果による収量の増加（回復）が確認されています。

RHIC において、主に核子対あたり衝突エネルギー=200GeV での p+p, d+Au, Cu+Cu, Au+Au 衝突における J/ψ 収量の測定がおこなわれました[27, 28, 29]。図 1 3 に、衝突関与核子数 N_{part} の関数として Cu+Cu, Au+Au 衝突における J/ψ 収量の原子核因子 R_{AA} をプロットしたものを示します。カーブは d+Au データから得られた結果を予想されたものです。a)は中央 rapidity, b)は前方 rapidity で計測した結果です。また、c)は Cu+Cu 衝突について、cold nuclear matter (CNM) 効果との比を取ったものです。Cu+Cu 衝突の場合、CNM 効果でほぼ説明出来ますが、Au+Au 衝突では高い N_{part} において更なる収量抑制があります。 $y \sim 0$ での J/ψ 収量についての R_{AA} から、CNM 効果分を差し引いた J/ψ 生存率を N_{part} の関数としてプロットしたものを図 1 4 に示します。この収量の抑制を再現すべく、色々なモデル計算が試みられました。上で述べた臨界温度より高い温度で J/ψ が融解するとした格子ゲージ計算結果に触発されて私たちがおこなったモデル

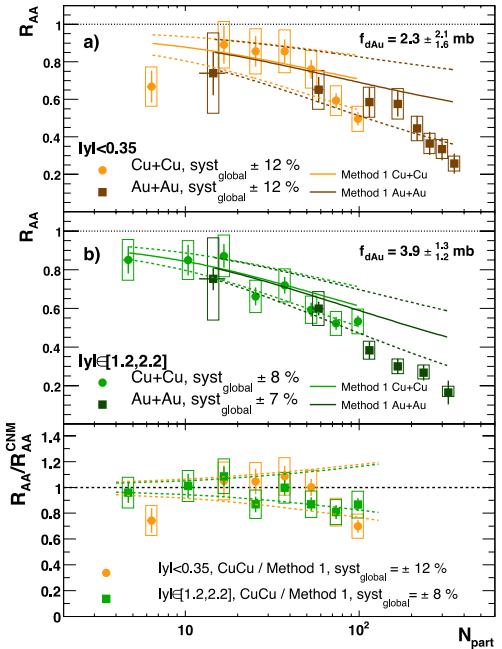


図 1 3: 衝突関与核子数 N_{part} の関数としての Cu+Cu, Au+Au 衝突における J/ψ 収量の原子核因子 R_{AA} 。カーブは d+Au データから得られた結果から予想したもの。

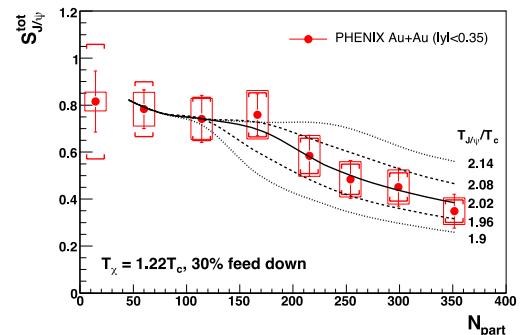


図 1 4: RHIC での金+金衝突における J/ψ 生存確率の N_{part} (衝突関与核子数) 依存性。比較のため、 J/ψ の融解温度 $1.90 T_c$, $1.96 T_c$, $2.02 T_c$, $2.08 T_c$, $2.14 T_c$ についての計算結果

計算の例[30]を図14に示します。実験データの傾向を良く再現しています。

融解描像は必ずしも強い支持が得られているわけではなかったのですが、最近 LHC CMS 実験で得られたY（ボトムクォークと反ボトムクォークの束縛系）及びその励起状態の収量についての新しい結果[31]は、融解描像を強くサポートするものとなっています。

7. 今後の課題、展望

紙面の関係もあって、LHCでの実験から得られつつある面白い結果の紹介は割愛します。もう少し時間が経って、結果が更に充実し、その理解についてもある程度言えるようになった段階で、報告する機会を持ちたいと思います。この後は、今後の課題、展望について私なりにまとめてみたいと思います。

7.1. 流体模型の拡張と初期条件

RHIC から得られたデータに対する流体模型の成功により、色々な物理量に関して実験結果と定量的に比較するベースが確立しました。方位角異方性について謂えば、高次の異方性についての研究が進んでいます。高次の異方性は、原子核同士の衝突で生成される初期状態の空間的な揺らぎによって生成されますが、各次数の異方性の大きさと、有限の η/s を持つ場合に拡張された流体模型計算との比較に依って、 η/s 値の精密化が進んでいます。今のところ、 η/s 値としては一定の値を使用されている例が大半ですが、理論的な拡張としては、温度依存性、相対運動量依存性が重要と思われます。 η/s については、AdS/CFT が与えた強結合極限の値 $1/4\pi$ が有名ですが、実のところ、それ以外に信頼出来る理論値はありません。格子 QCD 計算を用いた努力は続けられていますが、精度の良い結果は得られていません。大きな理論的な進展が必要ですが、それとともに、比較に耐え得るより高い精度の実験データ取得が非常に重要であると考えられます。

このような比較を進める上で大きな任意性が、初期条件の不定性にあります。問題は二つあって、ひとつは粒子生成プロセスにおけるパートン分布の原子核効果の不定性です。多重量子生成に大きく寄与する小さな x ($\sim 2/s(\text{GeV})$) では、グルーオン密度の飽和が予想されており、その影響

で原子核衝突時における空間的な生成粒子分布に違いが出ると考えられています。この分布の違いが流体時空開始時の形状の違いとなります。それに加えて熱化過程の不定性があります。これら初期条件の理解は、実験理論両者への大きな課題です。

7.2. ミクロな性質の研究へ

マクロな系の流体的振舞の研究から一步先に進んで、sQGP のミクロな性質を調べたいと考えるのは自然なことです。そのようなプローブ候補として、熱光子、熱電子対、 J/ψ 収量、重いクォーク等が挙げられます。これらのうち特定の過程について、系の時空発展の各時点における収量を計算し、それらを積分することで実験結果と比較することが原理的には可能となりました。事実そのような手法は標準的なものとなりつつあります。

ここで問題となるのは、強結合の場合における物理過程の計算方法が必ずしも確立していないことです。その昔、QGP 相においては結合定数 α_s は摂動論が使える程に小さな値となるので、クォークとグルーオンは弱く相互作用する自由気体のように振舞うと教えられました。そうだと

すれば、物理過程に対する計算は摂動論で概ね信頼のにおける値が得られると期待されます。少し前まで理論計算は多かれ少なかれそういう具合になされていました。それが蓋を開けてみると強く相互作用する液体です。これまでの摂動論的な計算は二つの意味で信用出来ません。一つは、結合定数 α_s が恐らく大きな値であることです。次は、もっと厄介な問題ですが、我々が取り扱っているのはクォークやグルーオンの独立した自由粒子の集まりとはほど遠いものであるかも知れないということです。

超高温の極限では単純な取り扱いが可能な系になるのでしょうか、RHIC や LHC で実現される温度は如何にも低くて、臨界温度に近すぎます。大きな運動量移行を伴う反応過程では自由なクォークやグルーオンという取り扱いは依然として正しいと思われますが、小さな運動量移行の領域では新たな描像が必要かも知れません。

例えば J/ψ の例のような静的な性質であれば、もう少し頑張れば格子 QCD 計算で何とかなるかも知れませんが、動的な性質に関してはそう簡単には行きません。色々な試みがなされているようですが、聴覚目に見て AdS/CFT は善戦してように見えます。

AdS/CFT 対応について平易な説明を出来るだけの準備はありませんが、Wiki に依れば以下のよう�습니다。「AdS/CFT 対応（英: AdS/CFT correspondence）とは、1997 年にファン・マルダセナによって提唱された理論[32]で、AdS (Anti de Sitter) 時空上の重力の弱結合領域と共形場理論 (Conformal Field Theory) の強結合領域との双対性のことである。具体的には、10 次元時空として 5 次元 AdS 時空 (AdS5) と 5 次元球面 (S5) の直積空間を考える。AdS5 時空の境界は 4 次元ミンコフスキ時空 (M4) であり、上記の共形場理論とは $AdS5 \times S5$ 時空の等長変換群 $SO(4,2) \times SO(6)$ を対称性として持つ境界 M4 上の超対称ゲージ理論のことである。また、AdS/CFT 対応は、4 次元超対称ゲージ理論の強結合領域での相関関数の計算が、AdS5 を背景時空とする 5 次元超重力理論の弱結合領域で計算できることを示したという面で画期的であった。」

なんとなく分かった気になってもらえば十分ですが、最初に AdS/CFT 対応が注目されたのは、強結合のリミットで $\eta/s = 1/4\pi$ を示したときです。それ以来色々な物理量の計算がなされてきました。AdS/CFT は QGP とは違う対称性を持つゲージ場ですので、そもそも結果は信用出来ないという立場は一理あります。しかしながら、強結合系という括りで、共通する性質があるのだという予想も正しそうな気がします。何れにしても、この辺りの理解は、今後の大きな課題です。

以上述べて来たことを象徴するような不可思議で注目を集めている単光子の話を最後の話題とします。

7.3. 低運動量領域の単光子のパズル

高温状態を調べるプローブとして、熱光子の測定は高エネルギー重イオン実験における積年の課題のひとつでした。熱光子が多く放出されると予想される運動量領域は $1\sim3 \text{ GeV}/c$ と比較的低く、この領域は π^0 崩壊からのフォトンのバックグラウンドが大きいため、なかなか有意な結果が得られませんでした。この困難を克服したのが、仮想光子法と呼ばれる方法で、光子生成過程には高次のプロセスとして仮想光子生成過程が伴っていることに着目し、光子を直接測るのではなくて積極的に低質量仮想光子 (=電子対) を測るというアイデアです。この過程においても π^0 崩

壞からの寄与 (Dalitz decay) はありますが、この方法のメリットは、仮想光子の質量領域をコントロールすることで、Dalitz decay からの寄与を大幅に減らすことが出来ることです。

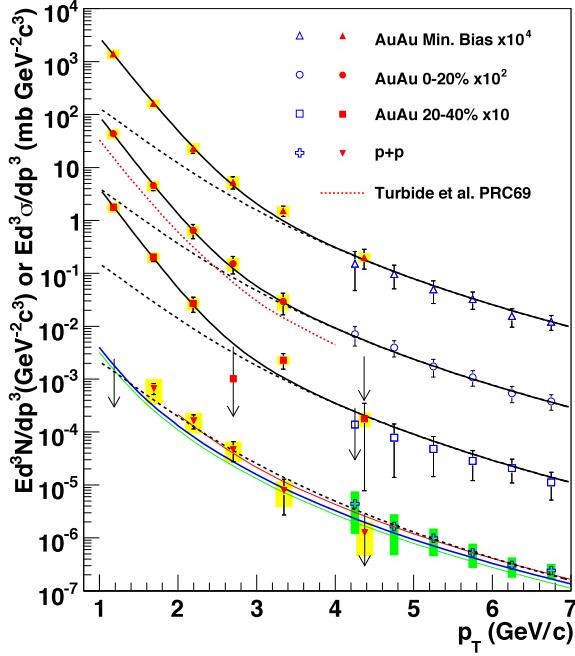


図 1 5：核子対あたり 200GeV Au+Au 及び p+p 衝突からの単光子の横運動量スペクトル。

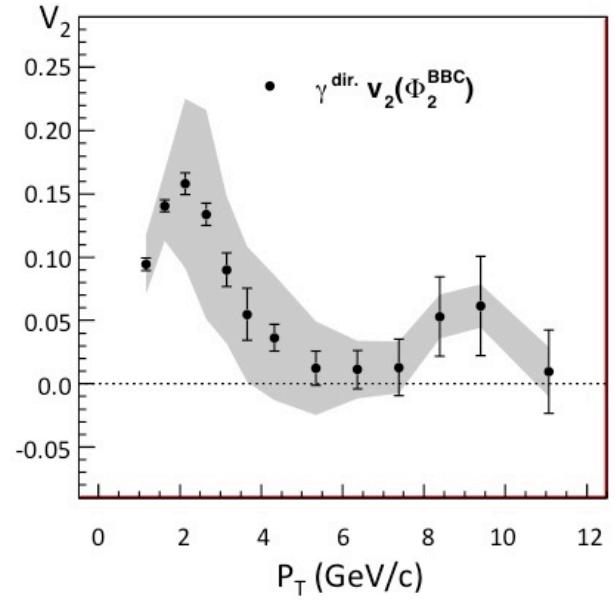


図 1 6：核子対あたり 200GeV Au+Au MB 衝突からの単光子についての v_2

仮想光子法を用いることで、図 1 5 に示すように、金+金衝突における低運動量領域の単光子収量に大きな増加が見出されました[33]。流体模型の時空発展に熱光子生成過程を組み合わせたモデル計算が幾つもなされ、いずれも QGP 相起源の熱光子を支持しました。ここ迄は良かったのですが、この後、大きな問題が持ち上りました。

単光子について橿円的方位角異方性 v_2 の測定がなされ、図 1 6 に示すように、低い横運動量領域ではパイ中間子のそれに匹敵する非常に大きな値を持つことが見出されました[34]。熱的な光子放出過程においては、熱浴の流体的な運動により多少の方位角異方性は期待されていましたが、衝突初期の温度が高い状態からの寄与が多いと予想されるので、大きな方位角異方性は想定外のものでした。実際、収量を再現したモデル計算では大きな異方性を再現することは出来ません。LHC ALICE 実験では実光子について同様な結果 (preliminary) が得られていますので、仮想光子測定に特有の問題ではなさそうです。

ここで色々な可能性が議論され始めました。ひとつの方向性は、衝突のごく初期における光子や電子対生成過程にその因を求めるものです。色々な可能性が考えられますが、いずれも原子核同士の衝突時に生じる大きな磁場との相互作用により光子や電子対が生成されるとして、磁場の向きに対して異方性が生じるのがミソです。もうひとつの可能性としては、衝突の後期、十分に流体的流れが発達した後での光子生成を想定する考え方で、極端な場合、ハドロン相における光子生成が主役というアイデアもあります。何れにしても簡単には解決しそうにない状況で

ですが、その原因のひとつとして、時空発展途中における単光子生成量にかなりの任意性があることが挙げられます。

さて、これ迄余り注目されていないことに、相転移領域での光子生成があります。格子 QCD 計算によればバリオン密度零での相転移はクロスオーバーであるとされています。従って、ある温度範囲に亘って徐々にクォーク、グルーオン的な様相からハドロン的な様相へとシフトしていくのでしょうか、その間の系の様相に関しては余りよく分かっていません。しかしながら、この領域では、 π や K ばかりでは無くて多数の共鳴状態が存在すると考えるのが自然のように思われます。遷移領域への高温側入り口では、多くの共鳴状態が存在し、温度が低くなるに連れて次第にパイオニア等の軽い粒子群の割合が増えると考えてみるのはどうでしょうか。このように考えると結構な流速を持つハドロンからの追加的な光子の放出も期待出来そうに思えます。

何れにしても、理論実験双方においてやるべき課題は明白押しです。実験的には、何と言つてもより精度の高い実験データを得ることが最優先課題です。

7.4. ALICE 実験のアップグレード計画

前節ではホットな話題を取り上げて、強結合 QCD についての研究の面白さ、困難さを説明しました。流体的描像という時空発展の記述を容易とし、定量的比較を可能とした強結合が、その性質を探る為のプローブについての定量的な計算を難しいものとしているのは、何とも皮肉な話です。しかしながら、希望はあります。AdS/CFT 対応は、原子核の理論の方々にはすこぶる不評ですが、少なくとも実験結果と比較可能な定量的な結果をもたらしています。非摂動論的な繰り込み群という厄介なアプローチも模索されています。

このように、高エネルギー重イオン衝突実験は既に開拓的な研究という段階を超えて、系統性・定量性が求められる性質研究の段階に入ったと考えられますが、何度か強調しましたように、こういう状況において何よりも大事なのは信頼性の高い実験結果をキチンと生み出していくことだと思われます。

そういう観点からして、LHC ALICE 実験が考えているアップグレード計画は非常に理に叶っていると思います。ALICE 実験の最大の売りは、ITS (Inner tracking system) と TPC (time projection chamber) による高い荷電粒子飛跡の再構成能力ですが、他方、その最大の弱点も ITS と TPC にあって、それらが主因であるデータ収集レートの低さです。今現在の最大データレートは、TPC の読み出し系の脆弱さにより 500Hz 程度に押さえられています。仮に TPC の読み出し系の問題を解決したとしても、次は ITS により 1kHz に制限されます。今後 LHC のルミノシティ増強計画により、Pb+Pb 衝突レートは 50kHz まで上がると予想されていますので、このままではどうにもなりません。重イオン衝突実験では、高エネルギー衝突のように効果的なハードウェアレベルのトリガーを構築して取り込みレートを落とすというポリシーが必ずしも通用する訳でもありません。そこで、ALICE 実験はアップグレードの目標に、この 50kHz を全部取り込んでしまうことを掲げました。我ながら実に野心的と感心してしまいますが、(1) ITS の全面的な取り替え、読み出しの高速化、(2) MWPC→GEM 取り替えによる TPC 連続運転の実現、読み出しの高速化、(3) 関係する検出器群の高速化、(4) DAQ システムの高速化、を 2018 年完成目標で進めることになります。

目下、私のグループでは TPC 連続読み出しを実現するための基礎開発を進めています。通常 TPC にはドリフト領域の電場を乱すイオンの流れ込みを避ける為に *gating grid* が用いられますが、ALICE 実験の場合、このことによって最大レートが約 3.5kHz に押さえられてしまいます。イオンの流れ込みを 0.2% 以下に押さえることを目標とし低ます。これが達成されると *gating grid* 無しでも運転可能となります。GEM は私のグループが恐らく日本で最初に手掛け、以来、理研仁科センターの玉川グループと共同で開発して来たのですが、その技術がこんなところで役に立ちそうというのは中々楽しい巡り合わせです。これ迄の研究から、イオンの流れ込み目標値の達成はそれほど簡単なことではないことが分かり、新たな方式に挑戦しつつあります。技術的な挑戦自身楽しいことですが、それによって格段に高い精度が達成されると思うと今からワクワクします。

8. おわりに

杉本先生との出会いから最近の研究迄を書き綴ってみました。高エネルギー重イオン衝突実験研究が、杉本先生ら先達が進めようとしたニューマトロン計画にその起源を持つことは本論で述べたとおりですが、ニューマトロンに馳せた夢のある部分がこのような形で実現しつつあるのは感慨深い限りです。しかしながら、原子核物質の構造、相図という観点からすると、ようやくほんの一部分が分かり始めたに過ぎない状況です。今しばらく、見果てぬ夢を追いかけていこうと考えています。

参考文献

- [1] PHYSICS TODAY: January 1967 p.80, <http://www.lorentz.leidenuniv.nl/history/gorter/badluck.pdf>
- [2] Y. Nojiri, H. Hamagaki, K. Sugimoto: Phys. Lett. A 60 (1977) 77-78.
- [3] H. Hamagaki, Y. Nojiri, K. Sugimoto and K. Nakai: J. Phys. Soc. Jpn. 47 (1979) 1806-1815.
- [4] H. Hamagaki, X.X. Bai, O. Hashimoto, S. Kadota, K. Kimura, Y. Miake, S. Nagamiya, K. Omata, Y. Shida, I. Tanihata and N. Yoshikawa: Phys. Lett. 150B (1985) 416-420.
- [5] S. Hayashi, Y. Miake, T. Nagae, S. Nagamiya, H. Hamagaki, O. Hashimoto, Y. Shida, I. Tanihata, K. Kimura, O. Yamakawa, T. Kobayashi and X.X. Bai: Phys. Rev. C 38 (1988) 1229-1241.
- [6] T. Abbott et al. (E-802 Collaboration): Nucl. Instrum. Meth. A290 (1990) 41-60.
- [7] T. Abbott et al. (E-802 Collaboration): Phys. Lett. B291 (1992) 341-346.
- [8] K. Shigaki, Y. Akiba, H. Hamagaki, H. Sako, C. Chasman, Z. Chen, H.E. Wegner, F. Zhu, A. Kumagai, K. Kurita, Y. Miake, S. Ueno-Hayashi, O.~Sasaki: Nucl. Instrum. Meth. A438 (1999) 282-301.
- [9] L. Ahle et al. (E-802 Collaboration): Phys. Rev. C 57 (1998) R466 - R470.
- [10] 杉立徹, 三明康郎: 日本物理学会誌 Vol. 55, No. 11, 2000, p868 – p871.
- [11] 秋葉康之, 浜垣秀樹: 日本物理学会誌 Vol. 59, No. 8, 2004, p291 – p299.
- [12] 平野哲文, 浜垣秀樹: 日本物理学会誌 Vol. 59, No. 12, 2004, p862 – p870.
- [13] 浜垣秀樹、浅川正之: 日本物理学会誌 Vol. 67, No. 9, 2012, p616 – p624.

- [14] K. Adcox et al. (PHENIX Collaboration): *Phys. Rev. Lett.* **88** (2002) 022301.
- [15] S.S. Adler et al. (PHENIX Collaboration): *Phys. Rev. Lett.* **91** (2003) 072301.
- [16] S.S. Adler et al. (PHENIX Collaboration): *Phys. Rev. Lett.* **91** (2003) 072303.
- [17] S.S. Adler et al. (PHENIX Collaboration): *Phys. Rev. Lett.* **94** (2005) 232301.
- [18] K.H. Ackermann et al. (STAR Collaboration): *Phys. Rev. C* **66** (2002) 034904.
- [19] E.V. Shuryak: *Prog. Part. Nucl. Phys.* **53** (2004) 273; *Nucl. Phys. A* **750** (2005) 64.
- [20] M. Gyulassy and L. McLerran: *Nucl. Phys. A* **750** (2005) 30.
- [21] K. Adcox et al. (PHENIX Collaboration): *Nucl. Phys. A* **757** (2005) 184.
- [22] R.J. Fries, B. Müller, C. Nonaka and S.A. Bass: *Phys. Rev. C* **68** (2003) 044902.
- [23] A. Adare et al. (PHENIX Collaboration): *Phys. Rev. Lett.* **98** (2007) 162301.
- [24] T. Matsui and H. Satz: *Phys. Lett. B* **178** (1986) 416.
- [25] M.C. Abreu et al. (NA50 Collaboration): *Phys. Lett. B* **450** (1999) 456.
- [26] M. Asakawa and T. Hatsuda: *Phys. Rev. Lett.* **92** (2004) 012001.
- [27] S.S. Adler et al. (PHENIX Collaboration): *Phys. Rev. Lett.* **96** (2006) 012304.
- [28] A. Adare et al. (PHENIX Collaboration): *Phys. Rev. Lett.* **98** (2007) 232301.
- [29] A. Adare et al. (PHENIX Collaboration): *Phys. Rev. Lett.* **101** (2008) 122301.
- [30] T. Gunji, H. Hamagaki, T. Hatsuda and T. Hirano: *Phys. Rev. C* **76** (2007) 051901.
- [31] S. Chatrchyan et al. (CMS Collaboration): *Phys. Rev. Lett.* **109**, 222301 (2012).
- [32] J. M. Maldacena: *Adv. Theor. Math. Phys.* **2** (1998) 231.
- [33] PHENIX Collaboration (A. Adare et al.): *Phys. Rev. Lett.* **104**, 132301 (2010).
- [34] PHENIX Collaboration (A. Adare et al.): *Phys. Rev. Lett.* **109**, 122302 (2012).