

原子核と物質の極限状態

東大・総文 松井 哲男

田中：おはようございます。今朝の最初の座長をいたします田中です。今日のお話は、東大の総合文化の松井哲男さんに「原子核と物質の極限状態」ということで、お話いただきます。

「極限状態」は非常に高いエネルギーで、原子核と原子核がぶつかりますと、まさしく混沌の状態になりますから、その混沌の状態を手がける、実験的な道筋として、レプトンペアという方法を提案されて、たいへん関心と呼んでいることは、みなさんもお存知かと思えますけれども、そういうお話を中心に、いろいろと楽しい話題が出ることを期待いたします。これから始めたいと思います。

では松井さん、どうぞよろしく願いいたします。

松井です。ずいぶん昔になりますが、私はこの京都大学の学生でした。湯川先生が退官されたあとの1971年に入学しましたので、昨夜の懇親会で湯川先生のお話を聴いても、あまりぴんとこないことが多かったのですが、今日は湯川先生と朝永先生の生誕100年ということで、少し歴史的なことからお話をしようと思います。かなり主観的な話になるかもしれませんが、予めそれをお断りしておきます。

基研研究会：学問の系譜2

原子核と物質の極限状態

Atomic nuclei and extreme states of matter

松井哲男(東大総文)

1. 核物理の系譜と新しい展開
2. 私の経験から
3. 最近の実験の状況
4. これから

[Slide 1]

核物理学の系譜：「古き良き時代」

- ・ 放射能の発見(1896)
- ・ 原子核の発見(1911) → 原子模型(Bohr) → 量子力学
- ・ 中性子の発見(1932) → 原子核模型(Heisenberg)

核内相互作用の問題(Fermi, 湯川) → 素粒子論

新粒子の「場」を導入(ニュートリノ、中間子)
内部対称性の導入(アイソスピン)

核反応 複合核、共鳴反応、核分裂、光学模型

→ 天体核物理、宇宙線物理、宇宙論

核構造 液滴模型、殻模型 → 核多体論

[Slide 2]

最初に、核物理がどういうふうにして現在に到達したかという話を、2枚のトラペーンでお話します。

これはみなさん、よくご存知の話なのですが、少し歴史を遡って核物理学の系譜をまとめてみました [Slide 2]。100年以上前に放射能が発見されるのですが、原子核が実際に見つかったというか、 α 線の「異常」な大角度散乱から、原子核の存在にRutherfordが気がつくのは1911年です。それからまだ100年も経っていません。その直後に、Rutherfordのところに奨学生として来たBohrが、その話を聞いて有名な原子模型を作る訳です。1913年のことでした。これが量子力学に発展していくわけです。ですから原子核の発見というのは、現代物理学の発展に非常に重要なインパクトを与えたわけです。

原子核の中はどうなっているかという問題は、スピンと統計の問題や β 線の連続スペクトルの問題など、深刻な困難のため、闇の時代がしばらく続いていて、朝永先生は名著「スピンはめぐる」のなかでこの頃の原子核を立ち入ることのできない「聖域」という言葉を使って表現されています。それが中性子の発見によって「聖域」でなくなり、Heisenbergの原子核が中性子と陽子とで

きているという模型が出て、本格的に原子核の研究が始まる訳です。湯川先生はその核物理の初期の段階で、(核内) 相互作用にかんする画期的な研究をされた訳です。Fermi が1年前に、Pauli のニュートリノを量子化された「場」として導入して、ベータ崩壊の理論をつくっているのですけれども、湯川先生は、それでは核子を結合する強い核力が説明ができないということで、更に新しい粒子の「場」を導入されるわけです。素粒子の相互作用を記述するのに、新粒子の「場」を使って研究するということは、ここで始まったと思います。Fermi はこの研究の前に QED のレビューを書っていますが、電磁相互作用とのアナロジーがこれらの研究の背景にあったようです。(フェルミのニュートリノ場は電子場の拡張であり、湯川の間接子場は電磁場の拡張だった訳です。ただ、この時のフェルミの「量子場」の使い方は、粒子の生成(消滅)を記述するための「第二量子化」による形式的な表現方法だった。これに対し、湯川の間接子場は「力の場」としての物理的な意味をもち、相互作用の到達距離と場の量子の質量との関係など、概念的に更に新しい内容を持っていたと言えます。)

更に、Heisenberg はアイソスピンというものを導入していますけれども、そのあとで核力の荷電独立性の発見により、この内部空間の対称性が重要だということがわかりました。この「場」という考え方と「内部対称性」という二つの考え方は、その後、素粒子論の発展で中心的な役割を果たしたわけですが、ここがその出発点になっていると考えられます。

中性子が見つかる、今度はそれを使って、いろいろな核反応の実験を Fermi がやるわけですが、そこから Bohr の複合核の理論が生まれ、核分裂の発見に至るわけです。この発見は「核兵器」という非常にネガティブな遺産を残してしまったわけですが、核反応の研究は、天体核物理とか、宇宙論という新しい分野を作り発展させました。このところは佐藤 さんがあとで話をされると思います。ビッグバン元素生成で有名な Gamow は、もともと原子核の研究(α 崩壊、 β 崩壊の理論が有名)をしていた人です。

私が学生の頃は、原子核理論という核多体論のことでしたが、こういう大きい流れで考えるとそれは少し狭い見方で、素粒子論や天体核物理も、原子核の研究の中から生まれているということになる訳です。

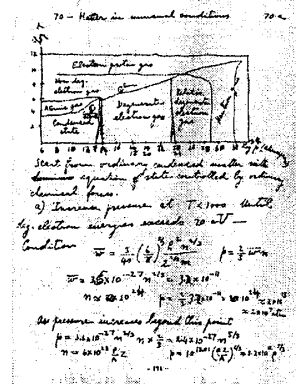
最近の核物理の新しい展開を促した3つの要因

- ・ 加速器実験の進展:
重イオン、高エネルギービーム → 新しい核現象の探索
- ・ 素粒子物理の発展:
ハドロン物理、クォーク模型、標準模型(特にQCD)
→ ハドロン多体系、クォーク多体系としての原子核
- ・ 宇宙物理・宇宙論からのインパクト:
中性子星の発見、超新星、初期宇宙論
→ 極限状態の核物質・ハドロン物質・クォーク物質

[Slide 3]

Matter in unusual conditions

E. Fermi: "Notes on Thermodynamics and Statistics" (1953)



[Slide 4]

このような視点から最近の原子核研究の流れをみると、もう一回元へ戻るような流れだとも見ることが出来るのではないかと思います。

その流れを作った主要な要因をまとめてみますと [Slide 3]、まず、加速器実験が進展してきて、いろいろな新しい実験ができるようになったことがあげられます。昔、加速器がなかった時代は、 α 線とか中性子とか、実験でできることは限られていました。加速器技術がどんどん発展していつて、高エネルギーのビームや、重イオンビームがきるようになる。それによって、新しい核現象を

探ることが可能になりました。

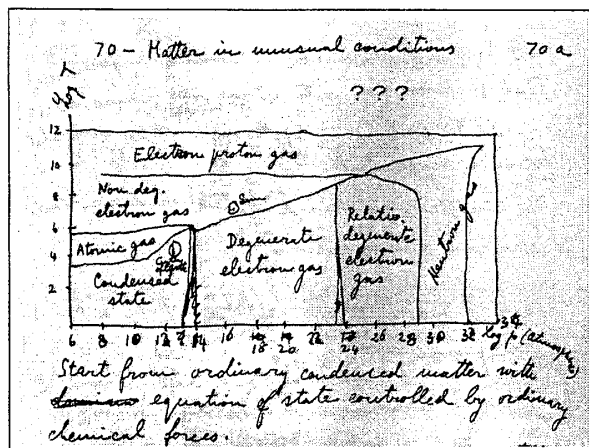
もう一つの要因は、素粒子物理の発展で、ハドロン物理から、クォーク模型が現れ、これが1970年代の始めに現在の標準模型に集大成されます。その中でも特にQCDというのは、1973年にasymptotic freedomが発見されて、標準模型の一部を構成しているわけです。クォークというのは、初め疑う人が多かったようですが、この時期から、その存在は間違いないということになりました。そうすると原子核に対する見方も当然変わります。Heisenbergの原子核が中性子と陽子からできているという見方から、パイ中間子や核子の励起状態の自由度も入れたハドロン多体系としての原子核。最近では、クォーク多体系として原子核を位置付けようということになっています。

最後の要因は、原子核から発展していた宇宙物理、宇宙論からのインパクトです。これは（宇宙）観測の発展のほうから出てきているわけですが、中性子星がパルサーとして発見され（1967年）、更に例の1987年の超新星爆発からのニュートリノの観測等は、どちらも大きなインパクトがありました。それから佐藤 隆 さん等がやられている初期宇宙論の発展ですね。こういうところから、原子核でわれわれが知っている知識を使って、極限状態でどのような物質相ができるのかを研究することが重要な課題となりました。極限状態の核物質の研究、更にハドロン物質、いきつくところクォーク物質の研究ということになるわけです。

これが最近の原子核研究の一つの大きな流れだと言っていると思います。もちろん、この他にも、（高励起・高スピン原子核、不安定核の物理など）核多体論のいろいろな新しい展開もあるわけですが、私の専門ではないので、その辺のことは、この話では割愛させていただきます。

こういう物質の極限状態の研究というのは偉大な先駆者がいまして、それを最初に現代物理学に基づいて考えたのはあのFermiなのです。Enrico Fermiは53歳で亡くなっているのですが、亡くなる数年前に行った熱力学・統計物理学の講義の手書きのノートがあります。それ（"Notes on Thermodynamics and Statistics", U. Chicago Press, 1966）に、こういうページ（70a）があります [Slide 4]。

この図の縦軸は温度でlogスケールでケルビンで測られていますから、12の目盛りは $10^{12}K$ を表します。横軸は圧力で、大気圧を使って、やはりlogスケールで目盛っています。この図は、圧力を上げていったり温度を上げていったりすると、物質はどういうふうに状態が変わるかを示したもので、つまり極限状態での物質の相図を描いたものです。



[Slide 5]

関連する重要な出来事

- 1967: 中性子星の発見
- 1971: Betheの「核物質の理論」の総括
- 1973: QCDの漸近的自由の発見
- 1974: J/ψの発見—「11月革命」
- 1976: 基研研究会「高密度核物質」
- 1979: Berkeley WS on Ultra-relativistic Heavy-Ion Collision
- 1983: NSAC recommendation for RHIC
- 1986: AGS, SPS 重イオン実験の開始
- 1987: 第1回YKIS "Mesons and Quarks in Nuclei"
- 1994: 第9回西宮シンポ "Modern View of Hadronic Matter"
- 2000: RHICの実験の開始

[Slide 6]

[Slide 5] はそれを少し拡大したものです。真ん中に線が引っ張ってありますが、この線の下の方が（低温・高圧の状態）低温になると電子がフェルミ縮退した状態になります。温度を上げていくと、粒子が熱励起します。「Sun」というのは、太陽の（内部）状態がここにあるという

意味です。

温度が低くて、圧力を上げていくと、ニュートロン・ガスに変わる。これは中性子の発見の意義にふれ、ランダウが最初に指摘したと言われています。中性子星の内部はこの状態にあるわけです。少し圧力の小さい状態は White dwarf 白色矮星（の内部状態）に対応しています。

結局、われわれがいま問題にしているのは、ここに書かれた相図の外の領域に何があるかということです。「物質の究極状態」というと、それは「素粒子の究極理論」といわれる超弦理論で問題となるような、このずっと先にある領域になりますが、今われわれが問題にしているのは、この既にわかっている領域から少し先を現在わかっている素粒子に関する知識をつかって探求しようという、もっとモデストな目標です。

[Slide 6] に関連する重要な歴史的な出来事をまとめてみました。中性子星の発見は 1967 年です。当時、私にとって非常に重要な出来事だったのは、原子核理論の大御所であった Hans Bethe が 1971 年に長年研究してきた核物質の理論のまとめを書いたことです。これは彼がコーネル大をリタイアする頃だったと思います。Bethe は 56 年に難解な Brueckner 理論をわかりやすく定式化する論文を書いて以来、長い間、コーネル大で彼の学生を指導してこの研究を続けてきました。このとき、彼はこの一連の研究の総括を書いて、まだ定量的には詰めのある必要などもありましたが、現実的な 2 体の核力を用いた核物質の飽和性の研究に一応の区切りをつけています。この 1971 年の Bethe の論文は、私たち原子核理論の学生の必読文献でした。

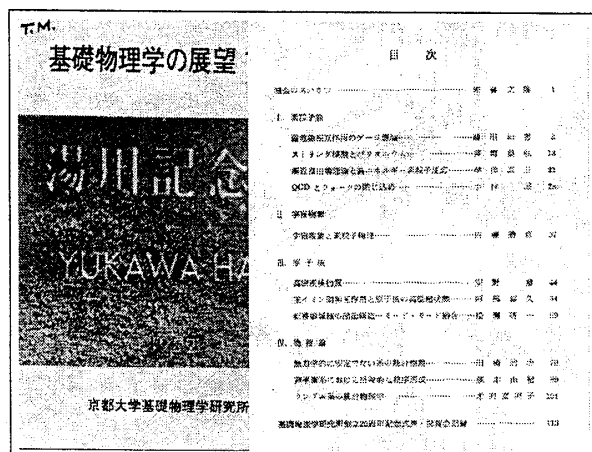
そのあと、漸近的自由の発見 (1973 年)、そして J/ψ の発見 (1974 年) がありました。あとでまたお話しますが、これは非常に重要なイベントで、「11 月革命 (November revolution)」ともいわれています。この J/ψ の発見によって、これまでクォークの存在を信じていなかった人が、ここで転向して、信じるようになったといわれています。私は 1981 年に Erice で Bethe の講義を聴いたことがあります。確かそのとき、彼も J/ψ の発見によってクォークが実在することを受け入れたと言っていました。ですから、この時がわれわれの素粒子に関する考え方の大きな転換点でした。もちろん素粒子論の多くの研究者にはクォークが存在することは既に当然のことだったんですが、「チャーモニウム分光学」のクォーク模型による成功により）他の分野の人にも説得力を持ったということだと思います。

それから、（これは後で知ったことですが）1979 年に、重イオンコライダーに関する初めてのワークショップが Berkeley で開催されています。この会議には David Gross も出席していて、彼は高温のクォーク物質の話をしています。

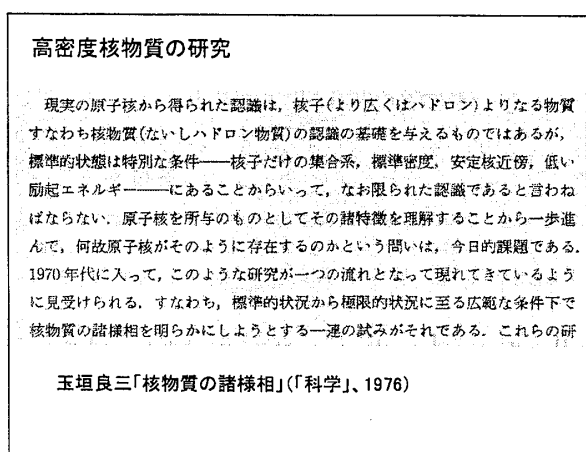
1983 年に RHIC をつくるというアメリカの政治的な判断が下って、その準備実験として、1986 年から AGS (ブルックヘブン) と SPS (CERN) で相対論的な重イオン衝突の実験が始まります。そして、2000 年からブルックヘブンで RHIC で本格的な実験が始まっているわけです。(1983 年は CERN で SPS を使った陽子・反陽子衝突実験で W と Z が見つかった年。このときブルックヘブンですすめられていた Isabelle (CBA) という陽子コライダーの建設にストップがかけられ、SSC 建設が決定されています。RHIC は Isabelle の為に作ったトンネルを利用して作られたのです。皮肉なことに、SSC はその 10 年後に、Isabelle と同じ運命を辿ります。SSC の為に掘ったトンネルは埋め立てられたそうです。)

日本であった関係する研究会を少し紹介しますと、私が学生の頃、最初に出た基研の研究会は、「高密度核物質」という研究会で、1976 年、私が M1 の終わりの頃にあったと思います。あと、関係する話としては、第 1 回の YKIS が 1987 年です。いま、國広さんが一所懸命やられている YKIS が来週から始まりますけど、第 1 回の YKIS というのは当時の西島所長のもとで玉垣先生らによって 1987 年に開催され、「Mesons and Quarks in Nuclei」という、今日の話と非常に関係したものだったのです。その「第 2 回」を國広さんが今年組織されているわけです。残念ながら私はこ

のとき米国にいて、(ビザの問題で出国できず) この会議には出席できませんでした。私が関係した会議では、西宮・湯川シンポジウムが、ちょうど神戸の大地震の直前の 1994 年秋に、「Modern View of Hadronic Matter」というテーマで行われ、そのポストシンポをこの基研で行いました。



[Slide 7]



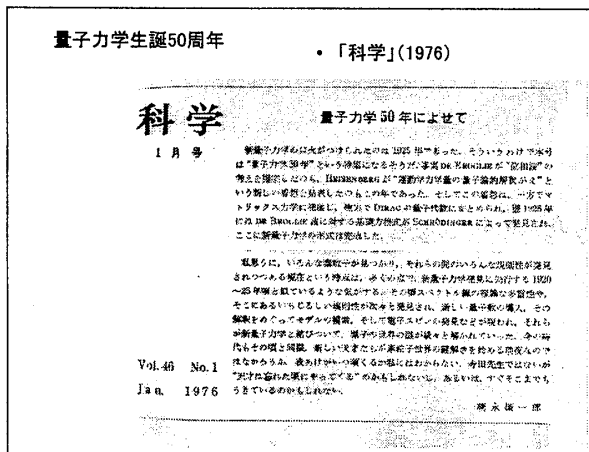
[Slide 8]

この「基礎物理学の展望」と題した冊子 [Slide 7] は、1978 年に開かれた基研の創立 25 周年のシンポジウムのプロシーディングスです。個人的なことで申しわけないのですが、私は実は、基研と年が一緒で、そのとき、私は 25 歳で D2 でした。私の先生だった名大の安野先生、それから基研にいらっしゃった阿部さん、京大理学部で松柳さんが核理論のコミュニティーを代表して話をされました。実は私は学部 4 回生のときに、松柳さんに課題研究でお世話になりました。安野先生は基研の研究会（長期、モレキュール）で行われた高密度核物質の研究の主要なテーマであったパイ中間子凝縮の問題について話をされました。

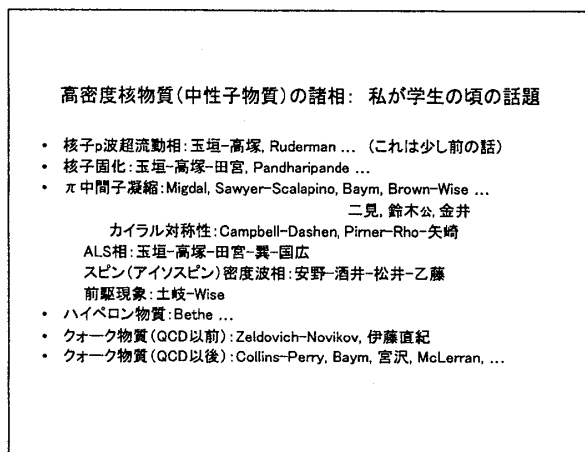
高密度核物質の研究（の目的と意義）について、玉垣先生が非常にいい表現をされていますので、抜粋をコピーしました [Slide 8]。なんでこんなことを研究するかということです。少し読みますと、「現実の原子核から得られた知識は、核子（より広くはハドロン）よりなる物質すなわち核物質（ないしハドロン物質）の認識の基礎を与えるものではあるが、標準的状态は特別な条件—核子だけの集合系、標準密度、安定核近傍、低い励起エネルギー—にあることからいって、なお限られた認識であると言わねばならない、原子核を所与のものとしてその諸特徴を理解することから一歩進んで、何故原子核がそのように存在するのかという問いは、今日的課題である」という、非常に素晴らしい表現をされています。玉垣先生というのは、こういう表現が実にうまいのです。更に、「1970 年代に入って、このような研究が一つの流れとなって現れてきているように見受けられる。すなわち、標準的状况から極限的状况に至る広範な条件下で核物質の諸様相を明らかにしようとする一連の試みがそれである。」と続きます。これは『科学』という雑誌があって、そこに最初に出たのですが、あとで『量子物理学の展望』（江沢洋、恒藤敏彦編、岩波書店）という本に収録されています。

[Slide 9] はその玉垣先生の論文の載った「科学」の 1976 年の 1 月号の巻頭言です。「量子力学 50 年によせて」という表題で朝永先生が書かれています。その内容については、特に注目することは書いてなく、朝永先生が書かれたということだけです。[笑] いや、私は朝永先生のお話を一度だけ、学生のときに聴いたことがあります。原子核の国際会議が 1977 年に東京で開かれましたが、朝永先生が会議の最初に話をされました。このとき私は学生で、D1 だったんですけど、その（朝永先生の）お話を聴いて、大変感銘を受けました。英語もとてもエレガントでしたけれど、特に私の印象に残ったのは、朝永先生は非常によく勉強されている、周りの人からいろいろと話を聴かれ

て勉強されていたのかもしれませんが、当時の核物理の最新の成果を踏まえて非常に適確な話をされたように記憶しています。



[Slide 9]



[Slide 10]

私が学生の頃、どんな話題があったかということ [Slide 10] に書きました.. 玉垣先生、高塚さんと一緒に仕事をされていた学生さんで、田宮さん、巽さん、それから國広さん、この人達が（当時）玉垣スクールから育った人です。私は名古屋にいました。

私たちは、この π 中間子凝縮という、Migdal（お父さんの方）が最初に言い出したもので、それは（高密度核物質の中で核子とのユカワ相互作用によって） π 中間子場の期待値がゼロでなくなるという話なんですけれども、それによって核子系（の構造）がどう変わるかという問題を、京都と名古屋で、二つの違った立場から研究していました。

この一連の研究のなかで、私が注目したいのは、玉垣先生は、この中性子星が発見された直後から先駆的な研究をされていて、p波の超流動相というのを提案されています。普通のクーパーペアというのは、s波の結合状態なんですけど、核力には強い状態依存性があるってエネルギーが上がってくると、s波成分は近距離での斥力芯が効いてきて斥力が優勢になる。しかし、p波だったらこの斥力芯の効き方が弱く外側の引力の効果が勝るので、フェルミ面上でクーパーペアをつくれるという訳です。このあとで、ヘリウム3で、異方的超流動相が見つかり、それはparamagnon exchangeという効果で、p波のクーパーペア生成によることがわかりました。この話題でノーベル賞が二つ出ています。

最後に、この研究会では「クォーク物質」という話も聴きました。実はクォーク物質の話は、QCDがでる前からあって、例えば日本では、伊藤直紀さんが、1970年だったと思いますけど、縮退したクォークのフェルミガスでできた星が存在する可能性について書かれています。この頃は、クォークの相互作用もよくわかっていなかった時期なので、この問題はあまり本気には検討されていなかった様に思いますが、QCDが現れて事情が変わってくるわけです。

私が学生のときに聴いた「クォーク物質」の話は、宮沢先生の「高密度核物質」の研究会での講演です。その内容は物理学会誌のこの記事に書かれています [Slide 11]。要約に「お急ぎの方は、第10, 11, 12図を見てください」とありますので、それをお見せします。(a) がhadronで、これ(b) がクォーク物質だということです。たしか大槻昭一郎先生だったと思いますけれども、このイラストを見て「雷の太鼓みたいだな」と批評されたこと、なぜかそれだけ印象に残っています。私はこの時はまだ勉強不足で、この話に特に興味をもてませんでした。

松原を結んで歩いて、源子に到着した。それ以上は不可知な事だと言われたが、もう誰にでも知り得たかった。40年代、源子の子の老害にまらって強姦した陽子、中津子、中津子などの姦子。松原の妻(お母さん)というものが出来た。現在源子は、クエックと呼ばれる基本源子と、それらを統括する母とでできていると語られていた。松原の方法は 10、11、12 図を見ていただければ、これが分かる。源子達の図である。

[Slide 11]

物性研研究会「超高密度物質」報告
(1976.2)

[Slide 12]

ここまでの話を聴かれると、物性の人は全然関心がなかったように思われるかもしれません。実は、当時名古屋大学にいらした長岡洋介先生が『固体物理』という雑誌にこういう記事を書かれています [Slide 12]。私が学生のときにこの記事を読んだ覚えがあって、最近調べて、見つけてきました。これは基研の研究会と同じ年に物性研でやった研究会の報告記事です。佐藤（勝彦）先生もご存知のようですね。先生も、この研究会に行かれたか？

佐藤^勝：行きました。

松井：ああ，そうでしたか。

これにはいろいろなことが書かれています。π中間子凝縮についても物性でよく知られているパイエルス転移とのアナロジーで、長岡先生らしい、明快な解説をかかれています。そのなかで、「クオーク物質」の問題についても最後にすこし触れられており、「しかし、クオークに関しては、その性質はまだわかっていないことの方が多く、(中略)今のところ空想物語といった方がよいかも知れない」と、少し厳しいコメントをされています。

南京大學學子讀書研究 飯井 光 夫

1. 序章——ニューマトロン計画とは

ニューマトロンとは、自然界に存在するものと見なされての元素、すなわち、一極電うのランに到るまでの元素の原子核を光の速度の約40倍以上の速さまでに加速する大型電子加速器である。これとは、ラザロフ原子核爆弾、中性子（これを誘発して核分裂を起す）を合わせて20〜30個程の核子から成り立っているから、この装置で加速されたラザロフ原子核は約200 MeV（約2千億電子ボルト）という巨大なエネルギーをもつこととなる。ニュー

よる高エネルギー中性子ビームの物理的物理学、原子力、医学、生物学など広い分野への応用について概説する。この大方向性策定については原子核研究に設計のスタンダード化が図られ、基本設計が完了している。その結果を、樹形図に示す。結果として、ゴーマートン新鋭の技術的成長と社会的需要についても言及する。

なお、全体について、高度のみを数値かつ年表に記述することになった。

2. 原子核研究の歴史におけるニュー

[Slide 13]

：漢子由以三教為家好道；

漢書ノ一ト

• 物性研究(1979-80)

“高密低物質と中性子線”

45 / 45-22

翌6月8日の、G. Szym 教授は、多額の借りに苦しむ、66才の父方の下宿に
 来て、北村と懇話にいられます。この時、北村は東京に滞在して、上野の国立近代
 美術館で「大正と現代」展覧会を見て帰って来ておられるところ、梅原重雄君の海
 軍及び民間機隊で、若狭の機務施設見学の依頼ノートにもとめ、それらを閲覧、本紙に
 掲載して、これに賛成しようと、西村君を通じて、ロバート君の母の借りを償う
 ことに同意したと報告された所を北村も承知して、ロバート、東郷一太郎の協力、羽
 生の積極的方針に賛成せず、羽生の意図に合っていないところ、彼は、英語で親しく
 フォトにもお話をしながらお話をします。彼によれば、以下7/11の内報によって
 の断片は、ノートに添付一箇にあらわす、そのとおりであると聞きます。

（说明：上羽牧夫，山阳一雄，松井新男，乙藤慈志，外山泰三，羽中一良
编著：三宅和正）

[Slide 14]

『固体物理』を調べていたら、当時核研所長だった坂井光夫先生の、こんな記事 [Slide 13] を見つけました。もう忘れた人が多いと思うのですが、当時、原子核実験の分野で、「ニューマトロン計画」という将来計画がありました。「ニューマ」というのは nuclear matter のことで、核物質の高密度な状態をつくって、実験的に研究しようという計画でした。これは結局、立ち消えになっちゃったのですが、その事情は僕はよく知りませんけれども、その頃核研にいらっしゃった丸森先生も、名古屋に来られて、私たちに「何か手伝いをやってくれないか」と言われたことがあります。

私がD3のときに、イリノイ大学の Gordon Baym (外国人に敬称を使うのは違和感がありますので、以下省略します) が碓井先生がホストになって学振の招聘で名古屋に来ました。その時、中性子星についての集中講義をされましたが、その講義録が「物性研究」に日本語で出ています [Slide 14]。長岡先生は私がM2のとき基研に移られましたが、その後任で名古屋にいらっしゃった黒田さんの音頭で、Baymの講義を録音して、トラペンを見ながら、若手で日本語に翻訳して、それを『物性研究』に発表しました。5回分あります。私も翻訳に加わりました。当時名大のS研(物性理論研究室)にいらした、三宅(和正)さんや上羽(牧夫)さんもこのプロジェクトに参加されています。私のいたG研(原子核理論研究室)からは私と2学年下の乙藤(岳志)さんが参加しました。このように、当時、私たちは物性理論の人たちともよく交流していました。

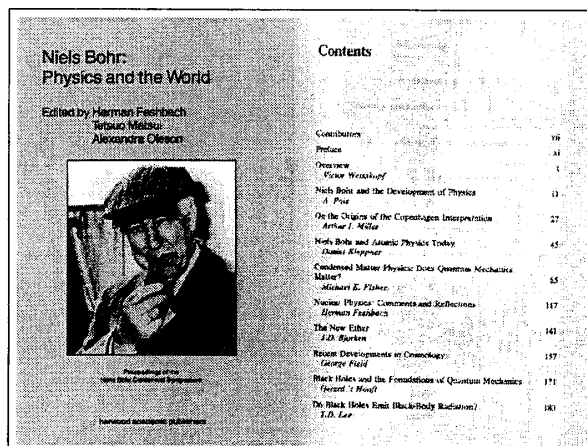
そのあと私は卒業して、アメリカに渡り、結局13年の長い間アメリカで研究生を送りました。この間いろいろなところに行って、いろいろな人に出会いました [Slide 15]。最近では国際交流も盛んになりましたが、私がアメリカに行っていちばん良かったと思うのは、いろいろな人と知り合ってその人たちとの交流からいろいろ学ぶことができたことではないかと思っています。

最初、スタンフォードに行ったんですけども、Dirk Waleckaの核理論グループのポスドクとして相対論的多体問題の研究で2年間修行して、バークレーのLBLに移りました。ここで重イオン実験につながるような仕事を始めました。当時、LBLの核理論グループには、Norman Glendenningや、後にコロンビア大に移る Miklos Gyulassy がいましたが、研究所ですから、多く人の出入りがあって、他にもいろいろな人と知り合いました。Stanfordにいく時お世話になった Baym にも、何度か再会しました。私がLBLに移った時、CERNのLeon van Hoveが原子核部門の外部評価委員として来られていて、若い人とも話をしたいというので、少し話したのですが、その時、非常にいい示唆を受け、たいへん励みになりました。それから、Helmut SatzやLarry McLerran, Vesa Ruuskanen などともここで初めてお会いしました。日本人では、住吉さんや北添さんという方が、原子核理論グループのビジターで来られていました。

アメリカでの私の遍歴と人との出会い

- カリフォルニアの新天地スタンフォードで新しいスタート(1980-82)
Walecka, Serot, Horowitz, Lindblom, Hosftadter, Schawlow, ...
- 加速器物理のメッカ=バークレー(LBL)で重イオン物理へ(1982-84)
Glendenning, Gyulassy, Randrap, Danielvich ...
Baym, van Hove, Satz, McLerran, Ruuskanen, 住吉, 北添 ...
- ニューイングランドの伝統あるMITで(1984-91)
Feshbach, Kerman, Negele, Moritz, Weisskopf, Low, Goldstone, Huang, Johnson, Jackiw, Jaffe, Freedman ...
Svetitsky, Polonyi, Vautherin, Chu, 岡, 山岸, 高木, 小池, 浅川, ...
Kajantie (Helsinki visit), Satz, McLerran (BNL summer visits)
- ミッドウェストの楽園ブルーミントンで最後の2年(1991-93)
Serot, Horowitz, Londergan, Macfarlane, Newton, Garvin ...

[Slide 15]

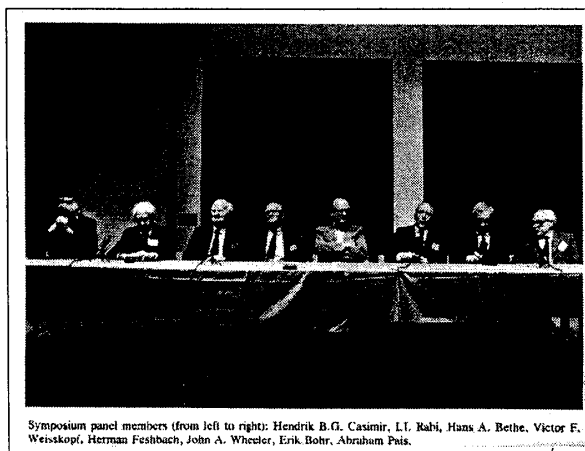


[Slide 16]

そのあとブルックヘブンに新しい重イオンの加速器(RHIC)ができることになって、MITでリクルートされて1984年に移りました。MITに行くと、常に多くの人の出入りがあって活発な議論があり、外の人とも共同研究する機会ができました。MITのArthur Kermanや、私と一緒にMITに来たBen Svetitskyの他にも、Fermilabに移っていたMcLerranとも一緒に仕事をしました。また、1985の夏には、ヘルシンキのKeijo Kajantieのところに行って共同研究しました。また、ブルックヘブンには、毎年summer visitorとして1-2週間滞在し、SatzやMcLerranなどと共同研究をしました。

Herman Feshbachは、Annals of Physicsのchief editorをずっとやられていた核理論の有名な

先生です。もう亡くなられましたけれども、非常にいい思い出があります。昨日の佐藤_スさんの話みたいになっちゃうのですが、こういう本があるんです [Slide 16]。Feshbach 先生と名前を揃えているという、非常に光栄なことなんですけれども、僕は何もやっていません。(私が MIT に移った翌年の) 1985 年は Niels Bohr の生誕 100 年でしたが、そのとき Feshbach は、American Academy of Science (ボストンに古くからある学術組織) の会長をやっていて、彼がシンポジウムをオーガナイズして、いろいろ著名な人が来て話をされました。Viki Weisskopf とか Abraham Pais, また Gerard 't Hooft も最近流行っているブラックホールのエントロピーとか、そういう話を、この会議でしていたと思います。T. D. Lee も、Hawking 輻射の話をしていました。それから Bjorken が、初期宇宙の相転移という切り口で素粒子の標準模型による今日の物質像にたいするレビューをしました。このリストにはまだ続きがあり、John Bell も話をしています。これは非常にいい本です。ぜひお読みください。



[Slide 17]

[Slide 17] はそのなかに出てくるパネルディスカッションのときの風景です。左から5人目が Feshbach です。一番左から、Hendrik Casimir, Ishidro Rabi, Bethe, Weisskopf, そして Feshbach の右は、John Wheeler, Erik Bohr, Pais という、錚々たる面々です。

話を元に戻しますと、私の研究は、原子核衝突の物理というところに入っていたわけですが、当時のアメリカでは、いっぱい加速器の将来計画があって、それで何をするかということを考えなければならぬわけです。これは健全なやりかただと思います。だんだん難しくなってきましたけど。

基本的に三つの問題があって [Slide 18], 最初に言いましたけど、極限状態で物質はどのような状態になるかということが最も基本的な問題です。これは閉じ込め・非閉じ込めの相転移、あるいはカイラル対称性の自発的破れの回復の相転移、これらは基本的に理論的な問題で、最近では格子ゲージ理論で数値計算をやるわけですが、そのままでは実験と比較できない。次の問題は、では核衝突によって、極限物質がどうやって生成されて、崩壊するかという非平衡時空発展の問題。それから最後に、実験で何をみたら何がわかるかという問題を考えなければならぬ訳です。

この2番目の問題というのは、実は古い話で、多重発生の時空発展という、昔からある問題です。多重発生というのは、ご存知の人が多いと思います。

私が関係した時空発展の問題 [Slide 19] では、多重発生の流れからきているのですが、流体模型というのは1953年のLandauの多重発生の理論にまで遡ります。それがBjorkenが1983年に流体描像をつかった論文を書いて復活し、それでまたみな流体描像で考え始めるわけです。私もLBLにいたとき、Landauの1953年の流体模型の論文を読んで、Gyulassyと一緒に、Bjorkenの論文の一つのコメントみたいな論文を書きました。

相対論的原子核衝突の物理

- 高温・高密度の極限状態で物質はどのような状態になるか
QCDの相構造の問題: 閉じ込め・非閉じ込め転移
カイラル対称性の自発的破れの回復
- 核衝突によってそれがどう生成されどう崩壊するか?
多重発生の時空発展
- 実験で何をみたら何がわかるか?
相変化のシグナルの問題

[Slide 18]

時空発展の問題(私が関係した仕事)

- 新しい流体描像:
Boost invariant expansion (Bjorken, 1983),
Cylindrical expansion (Baym 他, 1984)
Multiplicity and early entropy density (Gyulassy-松井, 1984)
- ハドロン化の問題:
Deflagration theory (van Hove, 1984), Shock analysis (Baym 他, 1985);
Fission of the flux-tube (Banerjee-Glendenning-松井, 1983)
- 初期条件の問題:
Inside-outside cascade model (Kajantie-McLerran-Ruuskanen, 1983)
Boltzmann方程式のスケール解 (Baym, 1984, Kajantie-松井, 1985);
Flux-tube模型 (Kerman-松井-Svetitsky, 1988; Gatoff-Kerman-松井, 1987)

[Slide 19]

多重発生の理論の系譜(多くは後で知った話)

爆発的シャワー理論: Heisenberg (1938)
制動輻射理論: Lewis-Oppenheimer-Wouthusen (1948)
統計-熱力学理論: Fermi (1950)
流体理論: Landau (1953), 木庭 (1955)
中間子論による粘性係数の計算: 磯-森-並木 (1959)
Multi-peripheral: 木庭 (1963), Capella-Krzywicki (1977), 木下他 (1979)
流体理論の修正: Carruthers (1973), Cooper-Frye-Schonberg (1975)
Pokorski-van Hove (1975)
ジェット理論: Feynman-Feld (1972)
Inside-outside cascade: Casner-Kogut-Susskind (1973)
Lund string fragmentation model: Andersson-Gustafson (1981)

熱力学的・流体力学的描像
非流体的・コヒーレント場的描像

[Slide 20]

それから Landau とか、昔の人がやったこととは違うのは、クォークというのは昔はなかった。クォーク・グルーオンプラズマという状態が最初にできると、それはどうやってハドロン化するかという問題です。van Hove は燃焼とのアナロジーで deflagration (ゆるやかな燃焼) 理論というものを提出していました、同じようなアイデアとして Baym たちの condensation shock, また detonation (爆発的燃焼) の可能性も Gyulassy と McLerran によって検討されていました。

私は (LBL で) この van Hove に、ハドロン化というのはどう起こるんですか、という素朴な質問をしたのですが、そうしたら、こういうことを考えてみたらいいんじゃないかということで、flux-tube model というのを教えてくれました。そして Schwinger メカニズムによって、flux-tube のなかの強いカラー電場でクォーク対の pair creation がおこると、flux-tube がちぎれハドロンができる。そういう論文があるから読んでみて、考えたらどうかという示唆をしてくれました。これが私のこの問題の最初のもう一つのきっかけになりました。

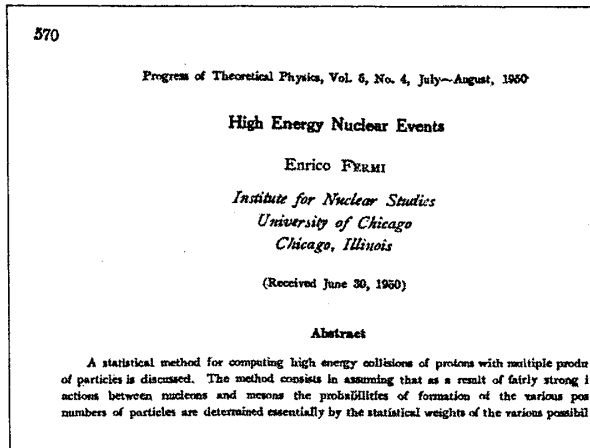
それから、次に考えたのが (流体模型の) 初期条件がどうやってできるか、どういうふうに設定したらいいかという問題。いきなり (局所) 平衡状態ができると仮定せず、quark-gluon plasma がどうやってできるかを、やはり Flux-tube 模型と Schwinger メカニズムをつかって考えました。これが、MIT で私が Kerman と議論して始めた仕事です。

[Slide 20] こういうことは、私よりもずっとよくご存知の方がここにたくさんいらっしゃると思うのですが、多重発生の理論というのは、ずいぶん古くからいろいろとあって、Heisenberg は (場の理論に流体描像を使って) 戦前からやっている。Oppenheimer も、これは例の有名な QED に関する Shelter Island の会議の直後だと思うのですが、QED とのアナロジーで多重発生の理論をつくっています。それから Fermi が最初に熱力学、あるいは統計力学的な考え方を導入して、Landau がそれを修正していくわけですが、それらの仕事のインパクトはずっと後まで残りました。基研では、最初の教授であった早川先生と木庭先生のあいだで、多重発生に関して大議論があったと聞いています。

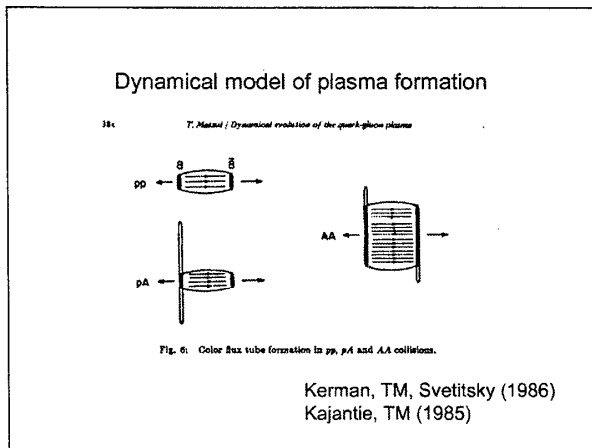
[Slide 21] はその Fermi の論文ですが、この歴史的論文はプロGRESS に 1950 年にでています。湯川先生の論文が出たのが 1935 年ですから、この年はその 15 周年だったのです。それでプロGRESS に中間子論の特集号がでて、Heisenberg もその中に書いていますが、Fermi がこの論文を寄稿したのです。「High Energy Nuclear Events」という表題です。要するに「ファイヤーボール」の論文ですね。

私達は、Fermi のようなファイヤーボールがいきなりできるというのではなくて、新しい見方で多重発生のメカニズムを理解しようとしていました。私たちが考えていたのは、例えば陽子・陽子の衝突では、何かバッグ (袋) みたいなものの間にグルーオンの交換が起こって核子がカラー電荷を帯

び、それでカラー電場ができて、そこから対生成で多重発生が起こるという（MIT の Francis Low が提案していた）見方です。 e^+e^- も、 qq バーの flux-tube ができて、多重発生が起こる。これら（多重発生）には、QCD という観点から見ると、ある種のユニバーサリティがあつて、原子核衝突では、もっと強い（ランダムな）カラー場ができて、それが（Schwinger メカニズムで崩壊して）プラズマになるという描像で考えました。



[Slide 21]



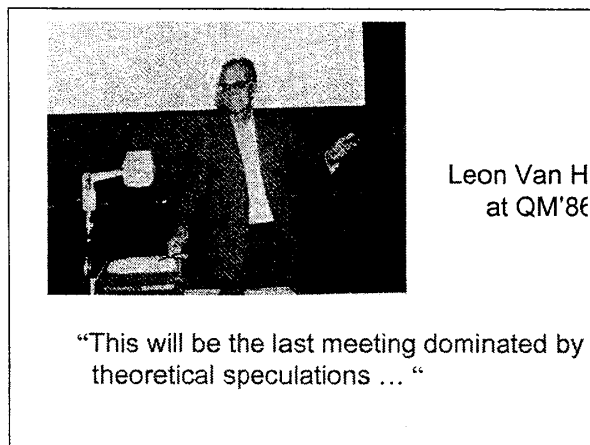
[Slide 22]

坂東 :そこに3本を書いたのは、意味があるんですか？

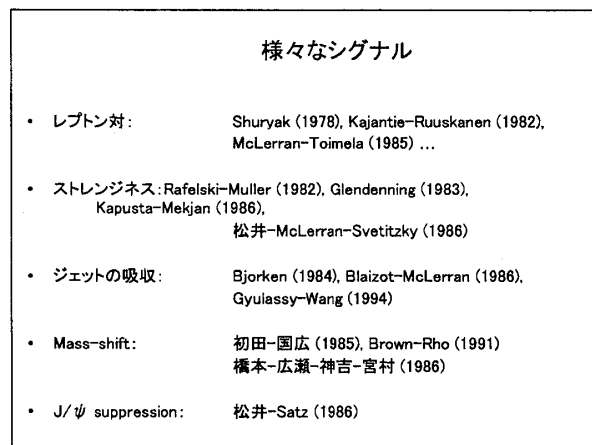
松井 :意味はありません。

坂東 :クォーク3つかと思った。

松井 :そういう意味じゃありません。どちら向きでもいいのですけれども、カラーの電場ができているということです。 flux-tube ができているという意味です。



[Slide 23]



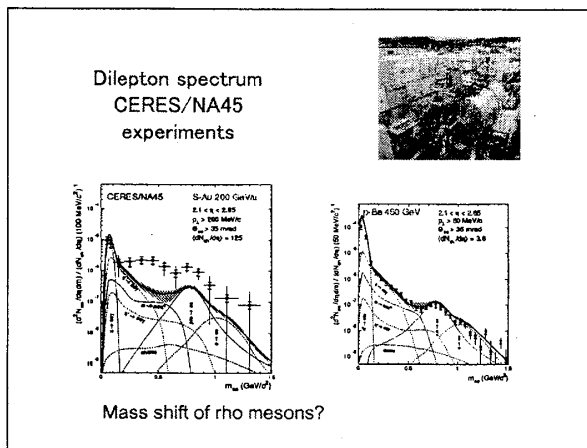
[Slide 24]

こういう描像を、1986年に「Quark Matter」という会議がカリフォルニアであつて、そこで話しました。 [Slide 23] はそのときの Leon van Hove です。彼はもう亡くなりましたけど、亡くなるちょっと前に、(仁科財団の招聘で) 日本に来ています。私はカリフォルニアの会議で、最初のほうで plenary talk をしましたが、その私の話の前だったかと思うんですけど、van Hove は「This will be the last meeting dominated by theoretical speculations」と言って、これからは理論的スペキュレーションばかりやってもだめだ。(もうすぐ始まる) 実験から何を学ぶかということが大事だということを強調されたわけです。私は、それまでの研究でも、van Hove からいろいろと影響を受けていたんですけど、これがまた刺激になりました。

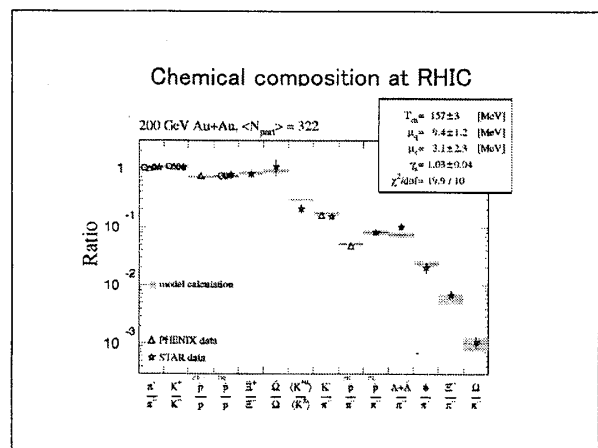
その頃、(どのような量を観測すれば何がわかるかという) シグナルの問題に関してどのようなことが考えられていたか [Slide 24] と言いますと、日本では Hatsuda-Kunihiko という仕事があるのですが、Nambu-Jona-Lasinio 模型を使って (クォーク場を使って書かれています) 、密度が上がったり、高温になると、カイラル相転移の前駆現象として、ハドロ (σ 中間子) の質量スペクトルが変わるという話がありました。関連した話としては、「Brown-Rho Scaling」という話がありますが、これは (私はちゃんと理解していないので) 説明できません。

その当時、日本で J/ψ に注目したグループ (当時阪大にいらした宮村さん達のグループ) がありました。これは mass-shift というところに載せました。mass-shift という考えは國広さんたちと共通しますが、カイラル相転移ではなくて、QCD の閉じ込め・非閉じ込めの相転移の前駆現象が J/ψ の質量スペクトルの変化を使って見えるのではないかという提案をされました。その同じ年に、私たちの、さつき田中先生から紹介があった、 J/ψ suppression という論文が出ますけれども、後でもう少し詳しく説明します。

その話の前に dilepton の話をします。dilepton というのはレプトン対のことです。high energy の実験のことを詳しくご存知の方には全然説明する必要はないのですが、レプトン対というのは、例えば $\pi^+\pi^-$ のような電荷を持った粒子と、その反粒子が消滅しますと電磁相互作用でできます。そこにも、 2π の共鳴状態があれば、それを通してできます。いろいろな共鳴ができれば、それからどのくらいレプトン対ができるかという評価ができます。実際に実験をやってみると、それより少し増えている。これはなぜか。



[Slide 25]



[Slide 26]

[Slide 25] の左の図は proton-Be の実験データ、右側は軽い核 (硫黄) のデータですけれども、単純な共鳴状態からの崩壊によるレプトン対の生成より生成量が増えている。これは、 ρ 中間子の質量が変化したんじゃないかという話もありました。しかし、核子と中間子の多重散乱効果で説明できるという解釈もあり、結局、必ずしも質量変化とは関係がなさそうということになりました。

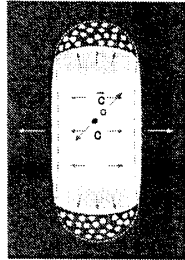
原子核を高エネルギーで衝突させるといろいろな粒子ができるのですが、その中には不安定でいずれ崩壊する粒子もありますが、強い相互作用のスケールで安定ないろいろな粒子の生成比が測られています。[Slide 26] は RHIC の最近のデータです。

実はこの生成比は、非常に少ないパラメータで全部フィットできます。どういうパラメータかというと、まず温度。どういう温度で強く相互作用する粒子の分布が凍結したかという、「凍結温度」です。それから2つの化学ポテンシャル。もし化学平衡が常に達成されていたとすれば、粒子比は時間とともに変化していき、重い粒子は軽い粒子に変わって消えてしましますが、あるとき生成比を変えるような (強い相互作用による) 化学反応が停止したとしますと、その時の化学ポテンシャルと温度で生成比が凍結します。そのあとは生成比に変化が起こらないのでこの時の生成比が実験

で観測されると考えられます。これは不思議な話ですが、実際この少ないパラメータで実験値がぴたと合います。 Ω のところまで合ってしまうのです。ストレンジクォークが入った粒子生成までほとんどうまく合ってしまう。このことから、生成された物質は、軽いクォークでできたハドロンにたいしある時点で化学平衡になっていたと考えることができる訳です。

J/ψ suppression

- Hard scattering of primary partons produces a pair of charm quark and its antiparticle.
- In free space, some of these pairs would produce a bound state (charmonium), which can be detected through dilepton decay channel.
- In the plasma environment, however, the screening of the binding potential will prevent formation of any bound state and this would result in strong suppression of production rate with regards to hard scattering rate as measured by Drell-Yan process.



Matsui-Satz (1986)

[Slide 27]

Proposal of a signature

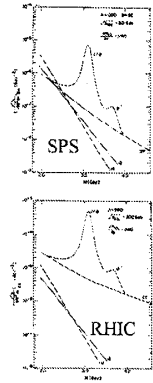
Volume 176, number 4
PHYSICS LETTERS B
7 October 1986

J/ψ SUPPRESSION BY QUARK-GLUON PLASMA FORMATION

T. MATSUI
Laboratoire de Physique Nucléaire, Université de Montréal, Montréal, Québec, Canada H3C 3J8

H. SATZ
Laboratoire de Physique Nucléaire, Université de Montréal, Montréal, Québec, Canada H3C 3J8

Received 1 July 1986



“We are removing mountains!”
H. Satz (1986)

[Slide 28]

次に、 J/ψ suppression の話をさせていただきます。[Slide 27] の図は原子核が衝突した直後の状況を描いたものですが、Dilepton はこの真ん中の高温の物質でできるとほとんど相互作用をせず外に出てくるのですけれども、後で Dilepton に崩壊する粒子で J/ψ という（光子と同じ量子数をもった）粒子があります。既に何度も出てきましたが、これはチャーム・クォークが、その反粒子とくっついて結合状態をつくったものです。ポジトロニウムは、電子と陽電子の結合状態なんですけど、それをクォークと反クォークで強い相互作用（QCD）でつくったようなものです。

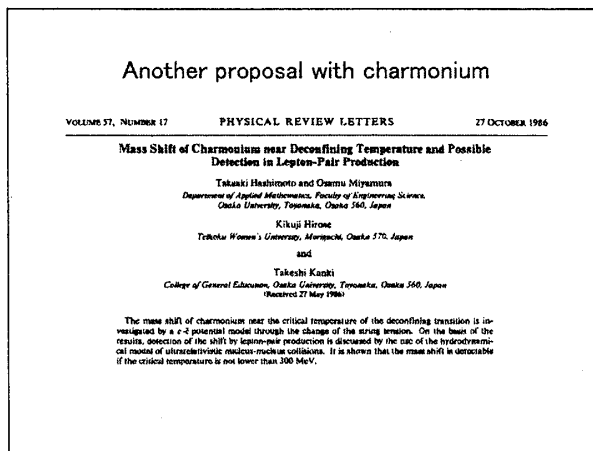
この J/ψ は、チャーム・クォークとその反粒子の対 ($c\bar{c}$) が真空中に飛び出すとある割合でできるんですけれども、もしそのまわりを quark-gluon plasma が取り囲んでいたとすると、クォークの間の力はプラズマの遮蔽効果で弱くなるわけです。ですから quark gluon plasma ができた場合には、こういう粒子対ができたとしても、2つの粒子は別れ離れになってしまっ、相手が見つからず、結局 J/ψ のような粒子ができなくなることになります。従って quark-gluon plasma ができた場合、 J/ψ の生成は強く抑圧されるはずなんです。

このアイデアで 1986 年に Helmut Satz と論文を書きました [Slide 28]。その時、実験は、まだされていませんでした。実験をすると、どんなことが予想されるかというと、(quark-gluon plasma ができない場合は) background の上に、共鳴ピークがでできます。この background は何かといいますと、Drell-Yan process といって、衝突前に原子核の中のクォーク場の量子的揺らぎで、クォークと反クォークができています。衝突のときにそれがたまたま対消滅を起こして（電磁相互作用で）dilepton となったものがこの background を作っている。lepton が最初にできればそれは強い相互作用をしませんから、そのまま出てくるわけで、この background は変わらない。一方、クォーク・反クォーク対やグルーオン対の消滅によって $c\bar{c}$ ができると、こちらのほうは、quark gluon plasma ができれば生成が抑圧されるので、この大きい共鳴ピークはなくなるはずだ、それを quark-gluon plasma 生成のシグナルとみなせるのではないかと、という提案をしました。

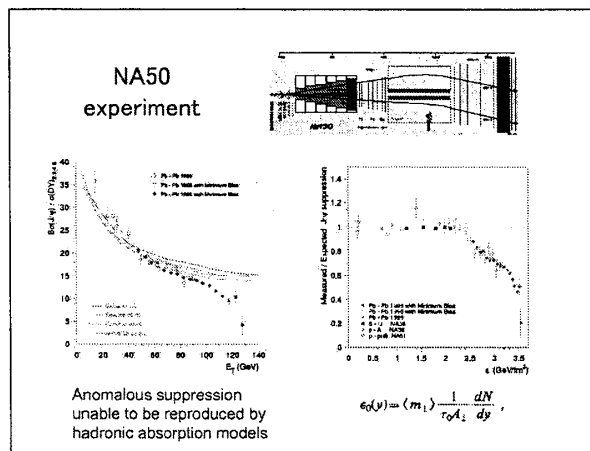
こういう論文を Satz と一緒に書いたのですが、彼はその時、「We are removing mountains! (我々は、山を取り除くというたいへんなことをやろうとしている。)」と言っていました。

[Slide 29] はさっき言った宮村さんたちの論文です。宮村さんたちはチャーモニウムの mass-shift を調べて、クォークと反クォークの結合力の変化を見ようというわけです。ですから「near deconfining transition」と書いてありますけれども、これは非閉じ込め相転移が起こる前の話なのです。つま

り前駆現象といわれているものを考えられているのですが、それを見るために転移温度を 300MeV と高く想定されています。最近では、転移温度の上でもチャーモニウムの結合状態が生き残って mass shift が起こるという可能性が話題になっています、



[Slide 29]



[Slide 30]

[Slide 30] は CERN の SPS の実験結果ですが、J/ψ は（そのもとの質量のところに）見えています。この実験（NA50）は、もう少し前の NA38 実験から発展してきたもので、lepton をスペクトロメーターというもので捕まえて、レプトン対の重心系でのエネルギー・スペクトルを見て、そこから J/ψ が増えているか減っているか判定するわけです。これはその J/ψ の yield（生成量）を、横軸に「横エネルギー」という量をとってプロットしたものです。原子核衝突が起こるとものすごくたくさんの粒子が出てきます。その粒子が持っている（ビーム方向に対して）横方向の運動エネルギーを、「横エネルギー（transverse energy）」と実験屋さんは呼ぶのですけれども、それを横軸にして、生成量がどう変わるかプロットしたものです。

右側にいくと正面衝突に近く、その場合、たくさんの粒子が生成される。だから放出されるエネルギーは大きいということです。だからそれを（生成された物質の）エネルギー密度が高いというふうに解釈するわけですが、そういうところに行くと、J/ψ の生成量はぐんと減っている。

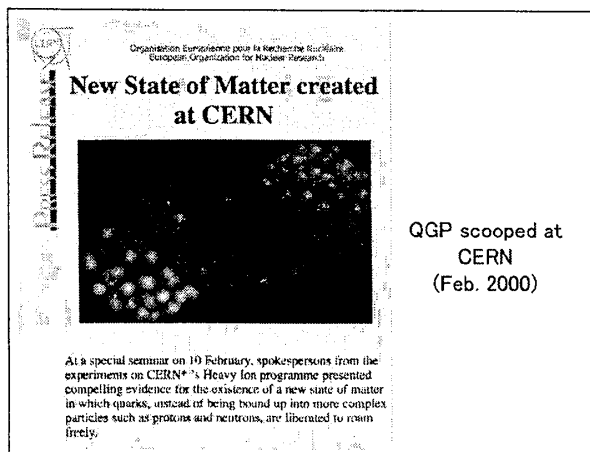
右側の図でこれは Bjorken が観測された横エネルギーから初期エネルギー密度を見積もる式を考案しているのですが、多重度と 1 個の粒子のエネルギーの積を、最初にこういう粒子が含まれていた体積で割ってやれば、エネルギー密度がわかるという式です。そういう量を横軸にとってプロットしてみると、あるところで（J/ψ の生成量が）すっと落ちます。これによって、われわれが言っていたことが起こっているのではないかと、ということになりました。

坂東 :mass-shift というのと、山がなくなるというのは、なんか違うような気がするんですけど、どっちがどうなんですか。山がなくなるというのは、理由がわかったような気がするんですけども。

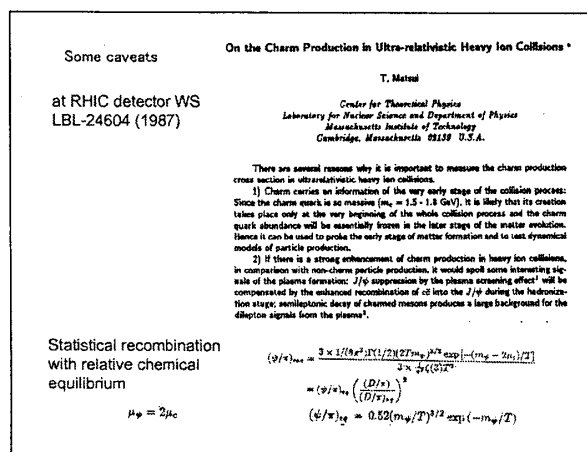
松井 :mass-shift というのは、ポテンシャルが変わって一私たちは充分弱くなれば結合できなくなるということを言ったんですけど、そこまで弱くなる前に一揺らぎでポテンシャルが変わると（結合）エネルギーが変わって、(J/ψ) の質量が変わるということです。[補足：しかし、その場合も、J/ψ の dilepton への崩壊幅は非常に小さいので、mass shift がいったん起こったとしても、それが崩壊する頃には高温物質は膨張してなくなり J/ψ の質量はもとに戻っているはずで、dilepton で J/ψ の mass shift を見るのは難しいと考えられます。]

2000 年に CERN は SPS の実験を締めくくったんですけども、そのときに記者会見をやりまして、[Slide 31] は、その時、ホームページに載っていたものです。もう出ていません。「スクープ」

と書いたのですが、quark-gluon plasma は、もう自分たちが捕まえたんだということを、ホームページに載せました。その根拠になったのは、この話だったようです。



[Slide 31]

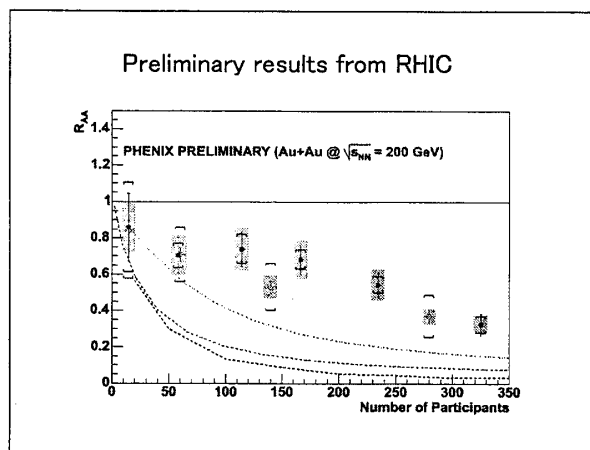


[Slide 32]

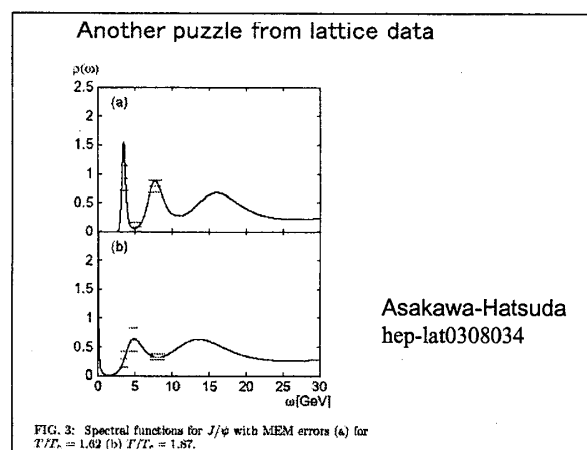
坂東 : その白のとあれは何ですか？

松井 : これは私もよく理解していないんですが、一般の人にイメージを与えるために、白黒は原子核の陽子と中性子で、色が三つ使ってあるあたりは quark gluon plasma のつもりなんだろうと思います

ただ、私はチャームクォークの生成について [Slide 32] のようなことも考えていました。これは論文にしたかったのですけれども、(1987年にLBLであったRHICの測定器のための) ワークショップで話したので、その proceedings に載っています。チャームクォークは、重いから(通常は)衝突であまりできないのですが、もしそれがたくさんできるようなことがあったら、それらがふらふら動き回って、あとでたまたまくつつくということがありうる。J/ψ の生成量は非常に小さいので、そういう recombination でできるものも、無視できないかもしれない。だからチャームの生成量を実験的に計る必要があるということを、測定器ワークショップで話したのです。その時、簡単な計算で、D 中間子と π 中間子の生成量を使って、(化学平衡に関する) 簡単な仮定を使えば recombination による J/ψ の生成量が計算できるという話もしました。



[Slide 33]

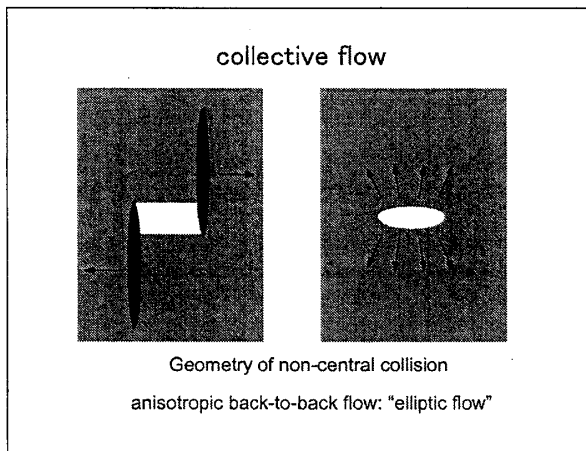


[Slide 34]

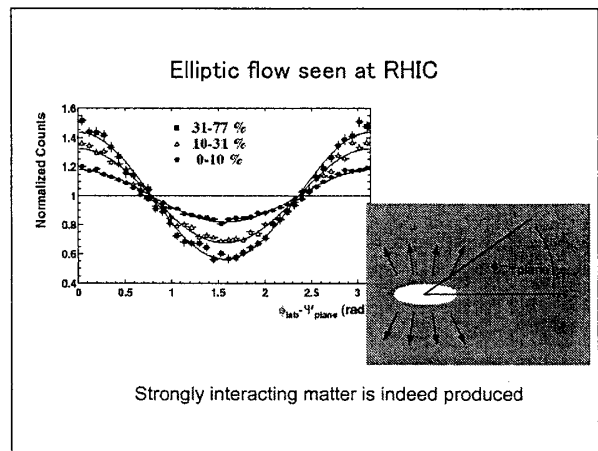
[Slide 33] は最近の RHIC のデータです。RHIC ではもっと減るのではないかと思われていたのですが、そんなには減っていない。これは「Preliminary」な結果なので、まだ私がしゃべることじゃないのですが、これはどうしてかということが、今、問題になっています。

一つの解釈としては、いま私が言ったような recombination 説を唱えている人もいますが、もう一つ、[Slide 34] は、阪大の浅川さんと本郷の初田さんが一緒に書かれた論文からとったのですが、温度が T_c より高いところでも、($c\bar{c}$) スペクトルをある方法で計算するとピーク(共鳴)があるということです。(強結合のプラズマではそのような中間子の結合状態が高温相でも存在するという議論がありますが、) 私はまだよく理解していません。ただ、これは quench 近似の計算で、dynamical quark が入っていません。それも関係あるかもしれない。

RHIC の実験結果でいくつか面白い話があります。その一つは、流体的膨張の効果がはっきり見えたことです。いま、原子核がぶつかる時、正面衝突しないで、ちょっと端のほうでぶつかったとします。横から見ると、ぶつかったところは二つの丸が重なったところですから、[Slide 35] の右の図のようになります。こういう分布で非常にホットなものができると、(上下に)膨張がおきハドロンの流れが生じます。これが実際に実験で見つかっており、これは「elliptic flow」と呼ばれています。

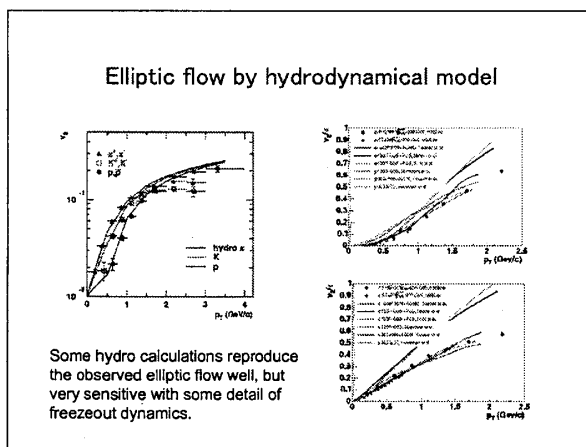


[Slide 35]

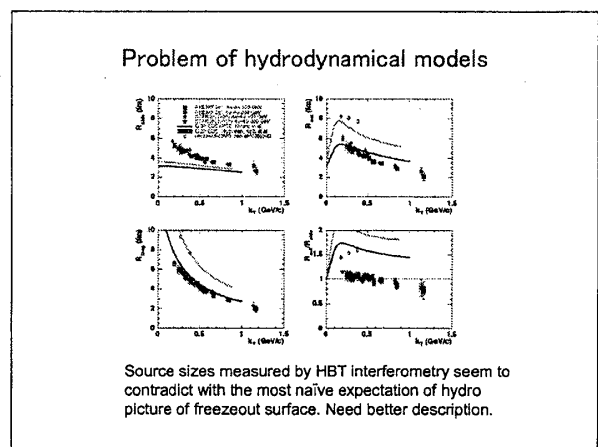


[Slide 36]

この効果を定量的に評価するために azimuthal angle を導入します。この方位角 φ をビーム方向に垂直な面でハドロンの集団の流れの方向を基軸に定義してやると、この角度を横軸に取ると、 π のところでこういうふうに粒子数が増えるということが見つかっております。このような方位角について 180 度対称の流れは「elliptic flow」と呼ばれ、その分布の強さを計る係数を v_2 と表しています。



[Slide 37]



[Slide 38]

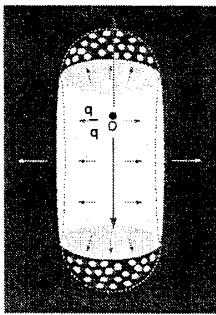
本郷の平野さんが、流体シミュレーションでこの v_2 の計算をされていますけれども、[Slide 37]

のようにその結果が実験に非常によく合っている。多重発生の流体模型は、Landau が最初に提案してから既に 50 年以上の長い歴史がありますが、その有効性にたいし懐疑的な人も多かったと思います。ところが、RHIC の結果は粘性のない「完全流体」の計算で非常によく合っています。これは非常に強く相互作用する物質（「強結合クォーク・グルーオンプラズマ」？）ができた証拠と考えられています。

ただ、すべてを流体模型で説明できるわけじゃなくて、説明できないものもあります。HBT interferometry といって、2 個の同種粒子を捕まえて、今の場合 π 中間子ですが、それが出てきたソースのサイズを、2 粒子の運動量相関によって測る方法があります。この方法は、最初、Hanbury-Brown と Twiss が天体の大きさを測る「強度干渉計」の原理として提案したのですが、Glauber が、その量子光学による基礎付けの仕事で去年ノーベル賞をもらっています。その場合は光子ですが、原子核衝突では pion を使ってやります。この方法で pion のソースサイズを計ってやると、[Slide 38] のように流体計算の結果とちょっと違っている。だから流体模型というのは、まだいろいろと考える余地があると思います。

jet quenching

- Hard scattering of primary partons produces a pair of quarks or gluons with large transverse momenta.
- In free space, hadronization of these high energy partons would result in back-to-back jets of hadrons.
- In the plasma environment, however, the partons will suffer significant energy loss and this would suppress the high energy jet components and/or destroy the balance of jets.

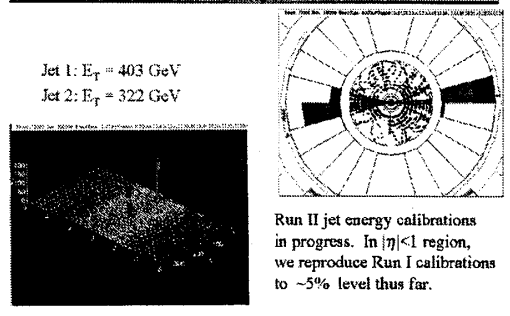


[Slide 39]

Jets at Fermilab

Jet reconstruction/measurement
essential for M_{top} searches ...

Jet 1: $E_T = 403 \text{ GeV}$
Jet 2: $E_T = 322 \text{ GeV}$



Run II jet energy calibrations in progress. In $|\eta| < 1$ region, we reproduce Run I calibrations to $\sim 5\%$ level thus far.

Fermilab, 2002 07-26 BNL Administration, Chicago CDF

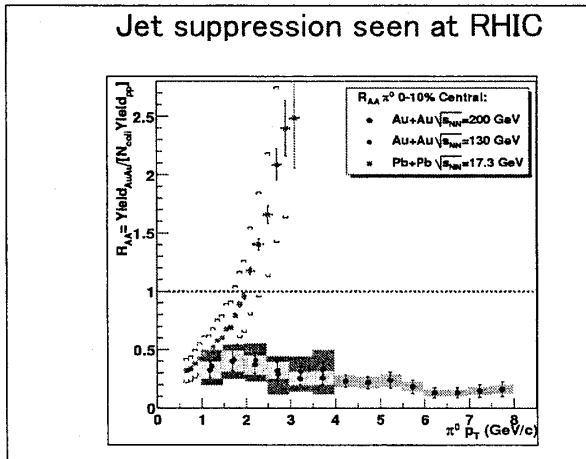
[Slide 40]

もう一つ最近話題になっている「jet quenching」という効果があります。jet というのは、パートン（クォークやグルーオン）の hard collision によってできるもので、もともと beam 方向に流れていたパートンが Rutherford 散乱のように大角度散乱すると、クォークやグルーオンはもちろんそのまま外に出てこれませんから、ハドロンの jet というものをつくるわけです。しかし、plasma 中でこれが起こると、パートンはプラズマ中をしばらく走らなければならない。端の方でこの散乱がおこった場合、一方のパートンは外へすぐに出てこれるので jet をつくるかもしれませんが、反対方向に散乱されたパートンはプラズマ中をかなり突っ切らなければならない。その時、energy loss があると、こちらのほうは jet をつくれな。昔、Rubbia が「mono jet」を見つけたという話がありました。それとは全然違う物理ですけれども、plasma によるエネルギー損失で、同じ「mono jet」みたいなものができる。

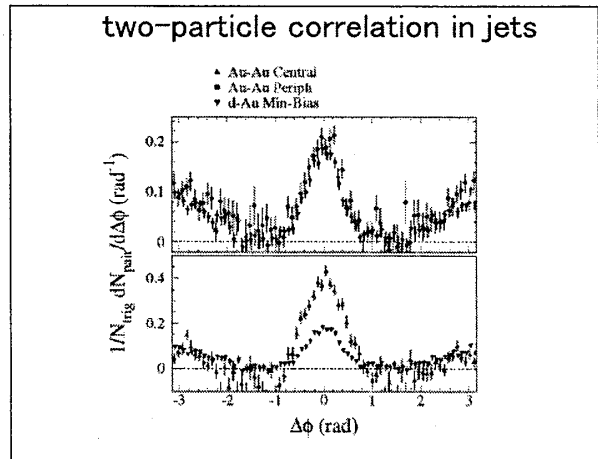
jet というのは、陽子・陽子衝突では [Slide 40] のように非常にきれいに見えています。これは quark 物理が正しいということの一つのサポートになっています。Feynman-Feld という有名な論文がありますが、それによるとパートンの大角度散乱でうまく説明できるのです。それが RHIC の重イオン衝突では消えてなくなる。

[Slide 41] は inclusive なデータで、粒子を 1 個だけ見ているのですけれども、ここでは、金と金とをぶつけたときできるハドロンのエネルギー分布です。それを陽子・陽子のときの量でスケールしてプロットしています。何も新しい物理がなかったら、これが 1 になっているはずの量です。と

ころが、実際は、それよりかなり減っている。それが見えています。



[Slide 41]

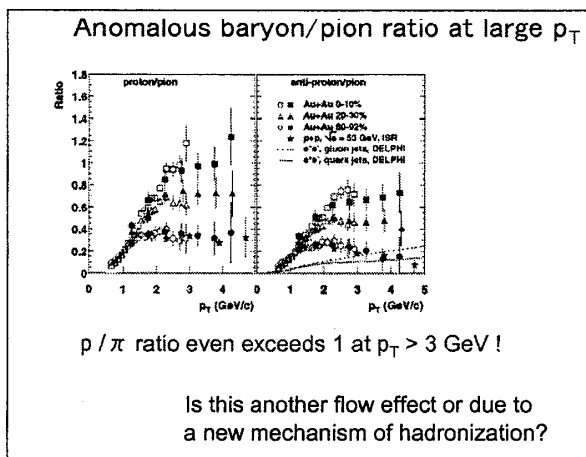


[Slide 42]

SPS のような低いエネルギーの衝突では、この比の値は実際は増えています。これは Cronin 効果といわれていて、パートンの多重散乱の効果として解釈されています。しかし、衝突エネルギーが上がると、この値は減っている。これは jet がプラズマ中でのエネルギー損失によって消えたためと考えられており、[Slide 42] のように jet 中の 2 粒子相関でもそれが見えています。

実は、この効果は実験が始まる前に Bjorken が予想していたことなのですが、彼は論文にしませんでした。私はその経緯を知っているのですが、プラズマの阻止能に計算間違いがあったからというか、式は合っていたのですが、数値を見積もるときに、結合定数に数値を入れるのを忘れていて、プラズマの阻止能を少し高く見積もってしまった。彼はいったん投稿した論文を、この間違いを指摘されて取り下げています。従って、現在「jet quenching」と呼ばれている効果自体は、Bjorken がこの論文で最初に考えていたことなのです。それが実際に実験で見つかっている。

もう一つ、私が最近、面白いと思っているのは、バリオンの異常生成です。陽子・陽子衝突では、主に pion ができますけれども、ほんのわずかですけれども baryon もできます。baryon と pion の生成比は、だいたい 1/10 ぐらいです。baryon というのは、pion に比べて非常に少ない。ところがそれが、RHIC の重イオン衝突ではある運動量領域では 1 ぐらいになってしまうのです [Slide 43]。これは不思議な話です。



[Slide 43]

QCDの成功とジレンマ

漸近的自由:
「繰り込み群」による奇跡の「摂動的」勝利、
しかし「非摂動効果」を繰り込むブラックボックスが必要

クォークの閉じ込め:
未解決の難問—「数学の殿堂入り」(お蔵入り?)

格子ゲージ理論: 強結合からの統計力学的アプローチ
弱結合(連続極限)での「面積則」の証明は難しいが、
とにかく計算機で物理量を非摂動的に計算してみよう

[Slide 44]

実験の話ばかりしたので、最後に理論の現状をまとめてみます。QCD はどこまで理解できたか [Slide 44]。QCD にはもうノーベル賞が出ていますけれども、結局よくわかったのは繰り込み群という手法を使った摂動的なところだけで、実際には、まだわからないところがいっぱいあるわけです。「クォークの閉じ込め」というのは、結局まだ未解決で、これは難問中の難問だと、数学者からお墨付きを得ましたが、物理学者は忘れるべき問題なのではないでしょうか。

実際には何がされているかというと、強結合からこれを理解しようということで、Wilson の格子ゲージ理論による計算がされています、ただ、彼が最初に言っていた面積則の弱結合（連続極限）での証明は難しい、まだできていません。とにかく、計算機で計算できる物理をやろうということになっています。

最近、いろいろな新しい試みがあります [Slide 45]。ここに「名誉ある撤退」と書きましたけど、要するに有効理論でやりたい。QCD がどうこういう理論につながるかということをはっきり示すことはできないのですが、例えば、坂東さんや九後さんがされている HLS (Hidden Local Symmetry) というのがその代表例です。すみません、変なことを書いてしまって、そこでは「対称性」がキーワードで、有効理論をつくる指導原理になっています。このアプローチの課題は、有効理論で何が新しく予言できるかということだろうと思います。

最近の「非正攻法的」アプローチについて

「有効理論」によるハドロン物理: 「名誉ある撤退」?
カイラル摂動論、HLS、NRQCD
「対称性」がキーワード、
本当に「導出」できるのか? 何が予言できるのか?

AdS/CFT 対応: 現実とは影絵のごとし
背後の高次元時空で力学を幾何学に還元
ほんとうに演繹できるのか、単なる迂回作戦か?
しかし、そもそも QCD は CFT ではないのでは?

[Slide 45]

これからの核物理

- 物理学の発展には自然との対話(実験)が必要
- まず、こちらから積極的に話しかける
- スリルとロマンのある会話

[Slide 46]

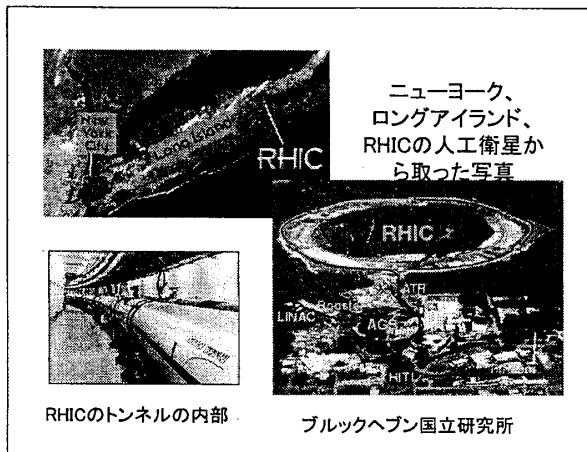
それから最近流行っている、弦理論から派生した AdS/CFT 対応の話、私は聞き逃しましたが、駒場の橋本さんがこの会議でも話しをされたと思います。「現実とは影絵のごとし」と書きましたけれども、これは holography のことです。数回セミナーを聴いただけですが、ゲージ理論の力学を高次元時空で幾何学的なものに還元しようという考え方のようで、たいへん面白いと思いました。Einstein も喜んでいられるだろうと思います。ただ、本当に弦理論から演繹できるのか、それとも（新しい計算方法という意味で）単なる迂回作戦なのか、それがよくわかりません。そもそも、QCD というのは conformal ではないので、そのへんを、どういうふうにみなさん考えていらっしゃるのか。

最後に、これからの核物理ということなのですが、何も言うことはありません [Slide 46]。基本的にはやっぱり、自然との対話、実験が必要であるということです。これはやっぱり忘れてはいけません。物理の発展にはこれが必要だということです。この分野は、そういう意味ではまだ健全だと思っています、これが難しい分野もありますが。

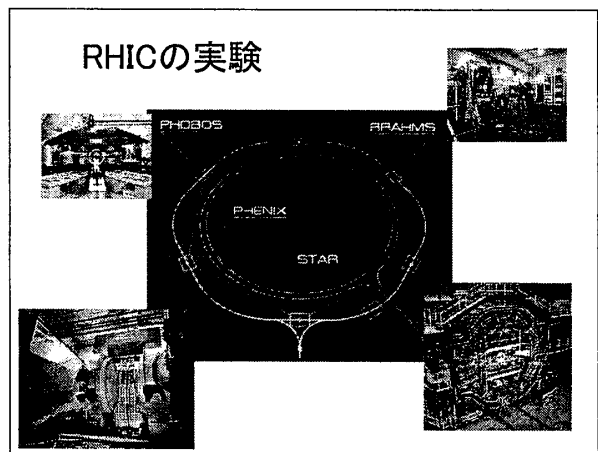
それから、こちらから「自然」に積極的に話しかけることが必要。これは何か予言するということです。こういうことが起こるんじゃないか、それに自然がどう応えてくれるかということをよく考えて。

そこにはスリルとロマンが必要です。これがないとやっぱり、この先、若い人は入ってこない。

私が若いとき、早川先生という人が名古屋にいらっしゃったんですけど、早川先生も物理にはロマンが大事だということを、よくおっしゃっていました。



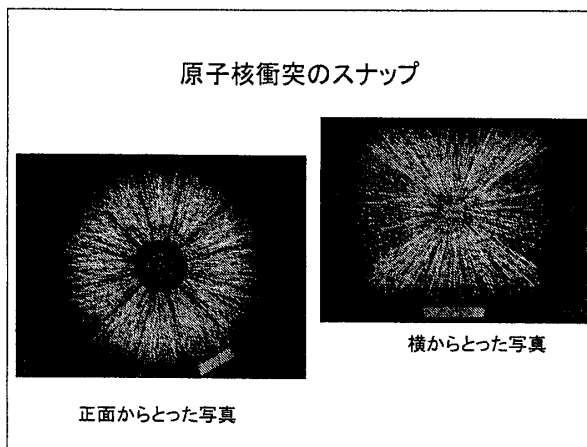
[Slide 47]



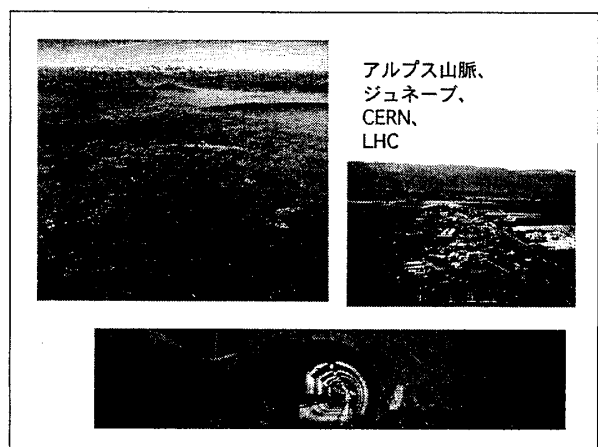
[Slide 48]

そこで、あとは実験の話で、その現在と、これからどんなふうになっていくかという話です。[Slide 47] は人工衛星からとったブルックヘブン研究所のあるロングアイランドの写真で、RHIC のトンネルも見えています。

[Slide 48] は RHIC の 4 つの実験装置で、そのうちの Phenix というのは、現在 KEK にいらっしゃる永宮さんが、以前 Columbia 大学にいらしたとき、中心になってまとめられた大きな実験装置の名前です。この実験には日本のグループが非常に大きく寄与しています。



[Slide 49]



[Slide 50]

RHIC で実験をやると、[Slide 49] のように何百、何千という粒子が飛び出してくるのを測定するわけです。これは大変な実験です。私も装置を見たことがあるんですけども、何千というワイヤーがつながっていて、一つでもそのつなぎ方を間違えると大変なことになる、私にはとてもできないことだと思いました。

[Slide 50] はジュネーブと CERN の写真です。背景に、レマン湖と、モンブランが映っています、ここに大きなトンネルがあって、LHC がいま、つくられています。トンネルの中は非常に半径が大きいので、真っ直ぐに見えます。LHC の実験は、あと数年したら始まります。ただ、この方向はいつまでも続くのではなくて、加速器による高エネルギー物理は、もうそろそろ限界に差し掛かっているのかもしれない。次は、また宇宙線にもどるのでしょうか。

日本の加速器計画では J-PARC というものがあります [Slide 53]。昨日もお話のあったニュート

リノ物理。それ以外に、ハイパー核とか、中性子の2次ビームをつかった物質科学・生命科学、そして核廃棄物処理の研究も予定されています。私はこのへんについては、あまり勉強していませんので、今は特にお話することはありません。ただ、坂東さんがメールでこのトークを依頼されたとき、亡くなられたご主人の話をされていたので、最後に一言。

J-PARC

大強度陽子加速器施設
(KEK・原研共同企画)

ニュートリノ物理
ハイパー核・エキゾチック核物理
中性子・ミュオンをつかった物質・生命科学
核廃棄物処理



[Slide 53]

原子核が縮む！

PHYSICAL REVIEW C VOLUME 59, NUMBER 5 MAY 1999

ARTICLES

γ transitions in $A=7$ hypernuclei and a possible derivation of hypernuclear size

E. Hiyama
Institute for Physical and Chemical Research (RIKEN), Wako, Saitama 351-0198, Japan

M. Kamimura and K. Miyazaki*
Department of Physics, Kyushu University, Fukuoka 812-8581, Japan

T. Motoba
Laboratory of Physics, Osaka Electro-Communication University, Neyagawa 572-8530, Japan
(Received 27 August 1998)

On the basis of the $^3\text{He}+N\rightarrow N$ three-body model which has successfully been applied to a systematic study of the energy and nuclear halo structure of the $A=7$ p-shell hypernuclei, strengths of γ transitions in $^7_\Lambda\text{Li}$ and $^7_\Lambda\text{He}$ are calculated. The new model confirms that the $B(E2; 5/2^+ \rightarrow 1/2^+)$ value in $^7_\Lambda\text{Li}$ is reduced remarkably in comparison with the corresponding $B(E2; 3/2^+ \rightarrow 1/2^+)$ in the core nucleus ^7Li . This is due to the placid role of the Λ particle which induces a contraction of the core nuclear size. It is suggested that a measurement of the $5/2^+ \rightarrow 1/2^+$ $E2$ transition rate in $^7_\Lambda\text{Li}$ (ongoing at KEK as E419) provides a unique opportunity to derive the hypernuclear size and hence to confirm the size contraction experimentally. The $E2$ and $M1$ transition strengths are also predicted for low-lying states in the hypernucleus $^7_\Lambda\text{He}$ whose core nucleus ^7He is known to have a neutron halo. Another prediction is made of much enhanced $E2$ transitions in $^7_\Lambda\text{Li}$ from the $5/2^+$ and $3/2^+$ ($J^\pi=1$) states which are expected to have a proton halo structure. [90556-2815/99/00705-0]

[Slide 54]

最近、原子核にストレンジネスを入れると、原子核が縮むという話があります。[Slide 54] は肥山さん達の有名になった論文ですけども、少し調べてみたら、そのようなことを最初に指摘されたのは、実は、坂東さんのご主人でした。[Slide 55] がその論文で、クラスター模型によるハイパー核の研究です。クラスター模型では、原子核の励起状態を α クラスターが弱結合した少し広がった状態として記述するわけですが、そこに Λ を入れると、 Λ には中性子や陽子との間で Pauli の排他律が働かないので、より効果的にクラスターをくっつける接着剤の役割を果たし、原子核が少し縮むということを指摘されています。私の話の本題とはあまり関係ありませんでしたが、J-PARC でやろうとしているハイパー核の物理と関係する面白いお話だと思いました。

とりとめのない話でしたけれども、これで私の話を終わります。

ハイパー核のクラスター模型

Progress of Theoretical Physics, Vol. 70, No. 1, July 1983

Light p -Shell A -Hypernuclei by the Microscopic Three-Cluster Model

Toshio MOTOKA, Hiroharu BANDŌ* and Kiyomi IKEDA**

Laboratory of Physics, Osaka Electro-Communication
University, Neyagawa, Osaka 572

*Division of Mathematical Physics, Fukui University, Fukui 910

**Department of Physics, Niigata University, Niigata 950-21

(Received March 7, 1983)

A systematic investigation of ^3He , ^4He , ^6Li , ^7Li , ^8Li and ^9Be hypernuclei is carried out within the framework of the microscopic $\alpha+x+A$ cluster-model dynamics ($x=n, p, d, t$ or α). The positive and negative parity energy spectra are analysed in detail and are classified into several characteristic "bands" according to the underlying structures. The $E2$, $E1$ and $M1$ γ -ray transition probabilities and magnetic dipole moments are calculated. The intra-band $B(E2)$'s are obtained to be several times enhanced in comparison with the shell-model values. The level widths of the strong peaks observed at lower B_γ are roughly evaluated on the basis of the calculated reduced width amplitudes. The existing data can be well explained by the present model. The cluster-model estimates of the effective neutron number $N_{\text{eff}}(\theta=0^\circ)$ for the (K^-, π^-) reaction are consistent with the experiments.

[Slide 55]

田中：まことにありがとうございました。内容も面白かったし、だいたい時間内にちゃんと終わっていただきました。チェアマンとしては言うことはありません。話がいろいろなところに渡って、面白かったです。どうぞ、時間が充分あるようですから。

坂東：さっき、mono jet になるような話があつて、その片方の anti quark か何か知りませんけれども、そっちのほうは、エネルギーはたくさん持っているわけだから、そのエネルギーは結局、何になったんですか？

松井：なくなったエネルギーがどこにいったかというのは、私もたいへん面白い問題だと思います。一つの可能性として、昔から考えていることなんですけども、プラズマ中を荷電粒子が走ると、コレクティブにエネルギーを失う可能性があります。いわゆるチェレンコフ効果というのがありますね。誘電体中では光速が違うので、その中を荷電粒子が走ると、一種のマッハコーンみたいなものができて光を発する。カミオカンデの測定器にも使われていますけれども、あれと同じようなことが quark-gluon plasma 中で起こってもおかしくない。そうすると、プラズマ中で消えたジェットの周りにエネルギーのフローができ、それがハドロン化すると、ハドロンのチェレンコフ光みたいな、リング的なものができてもおかしくないと思います。

ただ、プラズマ中でチェレンコフ条件が本当にみたされるか、或はハドロンの終状態相互作用によってどう変更を受けるか。という問題がありますが、それは非常に面白い問題だと思います。

国廣：実際にそれを示唆するようなデータも出ていますよね。具体的な計算もされていますね。

松井：論文を書いた人は、Shuryak という人で、彼は流体描像でマッハショックという考え方です。あと、Berndt Müller も plasma wake の論文書いていますけれども、私も前から同じようなことを考えていました。

国廣：ごく最近、去年ぐらい、2, 3年前かに、論文が具体的に出だした。

松井：国廣さんのほうが、僕より知っていると思いますので、彼に聞いてください。

川崎：素人なんですけど、さっき流体モデルがよく合うとおっしゃったんですね。それから流体力学というのは、いろいろなレベルのもの、例えば水なんかでも、厳密には五つのフィールドがあるわけでしょう。流体。それはいろいろな場合を考えてもっと減らすとか。

だけどどういう性格の流体力学モデル、流体力学を考えていращやるかというのを、ちょっと。

松井：専門家にそういう質問をされると、答えにくいんですけど、非常にナイーブな話で、Landau の流体模型と同じなんですけども、エネルギー運動量テンソルを相対論的につくることができんですけども、それはある静止系があつて、そこでは圧力とエネルギー密度で書けるとします。対角線成分がエネルギー密度と圧力で表される。ローカルにそういうふうに分けるとするのが前提になっています。もしヒートフローとか粘性とか、いろいろな散逸過程があると、そう簡単には書けないわけですが、その場合、どういうふうに系を選ぶかという問題がでてきます。国廣さんのほうが、私よりよく知っていると思うので、彼はむずむずしていると思います。ここで言っている流体模型というのは、Landau が最初に考えた、局所平衡が成り立っていて、散逸がなく（流速ベクトル場以外に）圧力とエネルギー密度（の場）だけで記述できるものを指します。

川崎：だから、ものとか全部、保存則は取り入れなさいということ。

松井：そうです。保存則だけです。結局、保存則と状態方程式で記述するというのが、Landau の流体模型です。

川崎：散逸項をどうするかということ。線形の散逸項でいいのかどうか。一般に非線形でもかま

わないけど。

松井：それは一般論としても非常に問題ですし、特にこういう特別な場合、ゲージ理論でどうやって計算するかというのは、難しい問題だと思います。

田中：ほかにありますでしょうか。

九後：基研はいま、クォークハドロン科学の研究拠点というタイトルの予算要求を出しています。そのとき、文科省の担当者に、クォーク・ハドロン科学の面白さですね、そういうことを説明したんです。いまま松井さんがこういう分野で、「スリルとロマン」とおっしゃったんですが、一方、具体的に今日お話しになったのは、例えば J/ψ の production が減るとか、あるいは mass が shift するとか、さっきの jet pair が mono jet になるとか、わりと地味なことばかりでした。そういうこと等も起こるだろうけれども、そのどこにロマンがあるのか、そこがどうも、伝わってこないのです。

特に素粒子論の志向がある人というのは、「そんな複雑なことをすれば勿論いろんなことが起こるだろうけれど、それでどうなの？」という感じだと思うんです。素粒子論の人は、基礎法則というか、どんどん単純なほうを志向していますから、そういう複雑なことを考えるときには、一体どこにロマンがあるのかということですね、そこを訴えないと、何か非常に細かいことをやっているという印象を与えると思うんです。

いまの司会の田中一先生が、「非常に面白かった」とおっしゃったんだけど、僕は逆の印象を受けて、どこが面白いんだろうと。むしろ僕は、その面白さを知りたいんです。やっぱり文部科学省に説明するときに、これが物質の基本的なあり方を明らかにするんだと言いたいんです。QCD という基本法則はわかったんだけど、実際にそのダイナミクスはどう発現するのか、それを解明するんだと。

それが宇宙の創生のときの問題になるし、あるいはクォークスターとか極限状態のところではどうなっているか、本当のところは未だ分かっていない。そういうことを理解するために必要だとか、いろいろと私が説明に行っているわけですが、やっぱりもっと専門家に、そこをぴしっと言っていたきたいのです。いまの話では、本当にロマンがあるのか余り良くわからないと思うんですが、どうでしょうか。

松井：厳しいですね。何とお答えしていいかわかりません。九後さんのほうが、もっと説得力をもって上手に説明されているように思います。

坂東：そんなこと言うたら、あかんじゃないですか。

松井：いえいえ。私の今日の話は、基本的な問題についてはとばしたところがいっぱいあります。最初のところ、ファンダメンタルなところで何がわかっていないかとかという問題です。今日は、実際に実験と結び付くようなところを主に話させていただきました。私が省いたところの話に、九後さんがもっと強調されたいことがあるのかもしれませんが、いまとなってはちょっと遅いですね、すみません。

田中：ここでフォローするのは私かもしれないけれども、ロマンっていうのは、だいたい対象と、どう感じる主体的なものと、両方が決めるものであって、自然は、深さにロマンを感じる人もあるけれども、広さにロマンを感じる人もあって、広さにロマンを感じないというのは、あるいは対象はロマンを感じるべきだけれども、それを受け取る感性の問題かもしれません。

松井：一言だけ言いますと、ロマンとリアリティというのは、かなり違う。今日はどちらかというと、リアリティのほうを強調しました、私も、学生の頃は、ロマンに惹かれていたと思います。中性子星とか、ちょっと手の届かないものに非常にロマンを感じました。

しかしアメリカに行って、そんなことだけではだめなんだという考えになりました。現実

というか、実際にどういうふうにならに語りかけるというか、自然と対話をするか、そこまでいかないと物理じゃないと思うんですよね。最初のモチベーションとしては、ロマンだけでもいいと思うんですよ。だから物質の極限状態というのは何なのか。それはモチベートするときに、必要だと思うんですね。それはロマンだと思いますけれども、実験的にはまだ検証されていないことが多いわけです。実験的に検証されていない、手の届かないものをいろいろと考える、そこにはロマンがあると思います。だけど実際に物理にしていけるには、それだけではいけないと思うんです。

早川さんは宇宙物理に行かれて、いつまでも手の届かないところの研究をされていたように見えます。それは一つのロマンですよね。しかし、早川さんは、いつも桁で勝負されていたみたいですが、やっぱり現実とも対峙されている。自分が言っていることが正しいかどうか（実験や観測によって）確かめることはスリルがあります。ロマンとは違いますが、それも必要だと思います。物理の発展というのは、そういうものだと思います。

田中：たいへん豊かな議論になりましたね。

早川：ロマンを感じるかどうかというのは、一般的な人に対してはどうかっていうのは置いておいて、僕は非常に面白いと思ったのです。

というのは、まずいろいろとテクニカルなことなのかもしれないですが、川崎先生が質問されたことと関連して、いま、流体力学が成り立っているというのは、理想流体ですよ。散逸が全然ないですね。実際に非平衡現象として、非平衡物理として考えたときに、輸送係数をどう決めるのかとか、それだけで済むのか、本当に流体も、もっと普通に流体力学が成り立つか成り立たないかっていうのは、少なくとも線形非平衡まで入れて、それを解いて、それが出発点ですよ。ナビエ・ストークスも線形非平衡ですから、拡散項があるのも、熱拡散があっても、線形非平衡で、それは流体力学の枠の中ですけども、それよりももっとごちゃごちゃしているわけだから、非平衡現象として見たときに、どうなっているか。そういう quark matter とか、quark gluon plasma とか、そういう状態を、わりと平衡っぽい話で、うまくいっちゃっているけれど、ちょっと考えると非平衡っぽい話なのに、なぜうまくいくのかということが、ちょっと物性の興味としても当然あるし、Gordon Baym とか、三宅さんの話も出てきましたけれども、上羽さんも物性の人ですけども、そういう意味では、境界領域というか、新しいところはあると思うんですよ。

ただ、ちょっと九後さんの言われるのもわかって、まったくの素人に、そういう面白さが伝わるかというと、ちょっと疑問なところもあって、松井先生が真面目すぎるかなという気も、ちょっとしました。

松井：実は、今年の夏の七夕のときに、高校生に駒場で話をしたんです。高校生向けの講義を。会場はぎっしり座っていて、けっこう反応は良かったですよ。あとで聴講者にアンケートをして、その回答を読んだんですけども、すこし感動したのは、ある女の子なんですけど、「いま、受験勉強で大変なんだけれども、頑張る。この話を聴いて勇気が出てきた。」と書いてくれた人もいました。その時はちょっと話の仕方を変えましたけれども、もう少し夢のある話をしたのかもしれない。

早川：高校生向きにどうやってアピールするかというのは、やっぱり大事だと思うんですよ。そのへんが原子核と物性の境界領域みたいなのを、どう考えるかということで、将来的にはそういう概算要求とかかわってくるんじゃないかという気がします。

田中：ほかに。

中野：実験家なので、さっきの九後さんの質問に対して代わりに、ちょっと分野は違うのですけども、答えさせていただきます。

この前、ブルックヘブンに行ったときに、やっぱり DOE に、どうして RHIC の物理が面白いかということを説明しなくちゃいけない人がいて、誰から聞いたか、ちょっといまは思い出せないのですけれども、jet quenching の話で、jet quenching を現実の世界で例えるなら、1 枚の薄い紙で、鉄砲の銃弾を止めるようなものだ。それぐらい stopping power が強いという話をすれば、「それはすごい」ということになったそうです。

物理屋の世界だと、そんなことはすごいと思わないかもしれないのですけれども、一般の人にわかりやすく、どういうふうに話すかというのは、やっぱりそこでも実験屋と理論屋と、協力して、実験屋の、普段のわれわれ、一般の人たちとの付き合いも多いわけですから、そのへんのところを協力したほうが、うまくいくんじゃないかと思います。

国廣：まったく言わずもがなのことなのですからけれども、早川さんがいいフォローをしてくださったと思うのですけれども、九後さんの質問に対する、部分的な答えをします。一番最初の naive な quark gluon plasma というのは、漸近的にほとんど自由な quark と gluon のスープというイメージだったのですけれども、そういうピクチャーで実験もやったし、解析もしていたんですが、RHIC のデータが示したことは、あにはからんや、流体模型が、ある側面については、システマティックに非常にうまく記述している。

しかも粘性がほとんどないというオイラーでいい。粘性がないというのは、非常に mean free path が、小さいわけですね。ということは、非常に strongly coupled の、しかも内部自由度のいっぱいある、しかも相転移が、dissociation が起こるような、そういう意味で、新しいタイプの物質ができたかもしれない。それは素粒子、場の理論から、非平衡統計物理のフロントとして、基礎物理として解明すべきことがいろいろとまだあるということで、わりとエキサイティングしているのではないかと思います。

川崎：昨日、ちょっとビールを飲みながら言いましたけど、ミクロからマクロまでの自然認識ね、階層性があるということを、ちょっと昨日言いましたけど、これはやっぱり、ミクロなところは QCD ですか、マクロのところは宇宙までいくと。だからそれはいろいろな階層性が、流体力学もその一つかもしれないけど、それでも、どういうふうにシステマティックにやるかは知りませんが、それはやっぱり、われわれ物性の、魅力がある問題だと感じています。

国廣：いまの場合も、ばあ一つと膨張して、宇宙の膨張の場合と同じなんですよ。それで、この QGP の重イオンの衝突でも、フリーズアウトという、宇宙でいう晴れ上がりという現象があつて、そのあたりでは、流体ではなくて、ボルツマンでいかないといけない、kinetic equation でやらないといけない。で、初期は Liouville でやるべきですよ。その Liouville が、すぐに実は、流体で良さそう。それからさらにばつと膨張して、晴れ上がり近辺になると、ボルツマンでやらないといけない、そういう、川崎先生が言われたような、dynamics の階層性みたいなものも built in されているのです。

坂東：リアリティっていうか、現実性っていうことなんですけどね、いま、高温高圧下っていうのは、異常な状態にともかくするわけですよ。それが、いまさっきの話では、地上の実験で実現して、わざわざそういう状態をつくってやるということと、それから宇宙のなかでは実際には、本当に現実そういう状態があるんだと。どっちがリアリティに近いかというのは、わからないけど、地上で実験するというのと、それから宇宙にある自然の状態のなかで、そういうのが、ここでは実現しているかもしれないと思って、やってみるとうまくいくとか、そういうことと、どっちが現実性があるかといったら、どう。

松井：どちらも現実性があると思います。宇宙の話でも、これから佐藤さんが話をされると思いますが、藤井先生の話でも、自然（現実）と対話しなきゃいけないということがポイントで、ただ単に、理論的にやっているだけではだめだということです。地上の話でも、同じこ

とが言えると思います。それだけです。言いたいのは、リアリティというのは、そういう自然って、やっぱり存在しているわけで、われわれはそれを認めて、それを研究しているわけなので、それを忘れちゃいけないっていうことだと思います。

ちょっと偉そうなことを言いましたけど、そういう点では皆一緒だと思います。佐藤^勝さんや藤井さんとも。

田中^一：先ほど、九後さんがおっしゃったのは、確かにその悩みはもつともだと思うんです。ですけども、これはささやかな僕の経験ですけども、私自身がどういうことについても興味、ロマンを持っているときにはやっぱり、相手にそれが伝わるものだと思うんです。なぜかっていうと、実際同じ人間が、例えば宇宙の広がりだとか、そういうことについて、ロマンを感じて、面白く感じるわけですから。そういう人がたくさんいるわけですから。ですからたとえ相手が文部官僚であっても、普通の人間ですから。特別の人間じゃなくて、普通のやっぱり人間ですから、自分がもしロマンを感じるならば、そのロマンは相手に伝わると思います。

ですからまずは、もし相手がロマンを感じなければ、自分がロマンを感じていないんじゃないかと思うことも、一つの考え方です。

これ以上、議論をすると面倒ですから、ストップいたします。じゃあどうもみなさん、ありがとうございました。



ph11 岩倉 (メ)/松井//国広/大野/佐藤^勝//国広, 松井/佐藤^勝