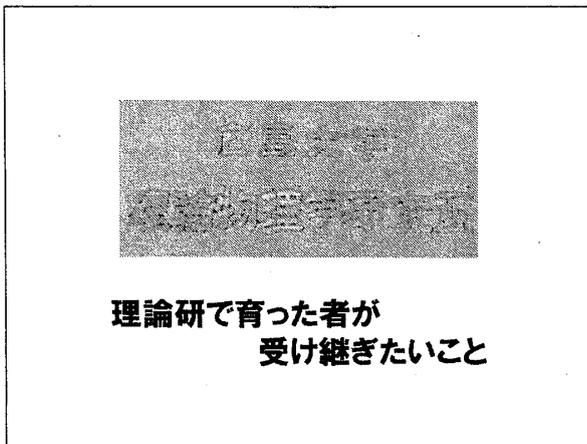


理論研で育った者が受け継ぎたいこと

大阪市立大学 石原 秀樹

佐々木: 午前の後半のセッションを始めさせていただきます。石原さんに、旧広島大学理論物理学研究所での研究について話していただきます。重力に非常に深いかかわりがありますが、現在の基礎の半分は実は、この理論研なのでして、そういう意味では、ここの片肺部分の歴史ということもあります。そういうことにも触れていただきながら、過去、現在、未来のお話をさせていただこうと思います。よろしくお願いします。

大阪市立大学の石原といいます。佐々木さんを通じて、今回の研究会ですごいタイトルをいただきまして、「広大理論研の果たした役割と相対論・宇宙論研究の現状と将来の展望」。それはとても私には荷が重くてできませんので、広島大学理論物理学研究所の過去を、私がおりましたのは短い時期なのですが、そのあたりの「窓」から見た理論研をご紹介します。それから相対論・宇宙論研究の将来について今日お話できることは、日本のこの分野の研究者がどういう方向を目指すべきか、ということとはほど遠く、理論研で育った私がこれからどういう方向を目指したいか、相対論・宇宙論研究者の中の一人として、どういうことをしたいかということについて、お話したいと思います。



[Slide 1]

[Slide 1] 私は、今、大阪市立大学におります。私と、あとで出てきます中尾憲一さんの二人が、5、6年前に、大阪市立大学に移りまして、宇宙物理のグループをつくらせていただきました。この二人は、ともに理論研で育ってきた者でありまして、理論研で育った連中がグループをつくと、こんなふうになるのかということ、最後にお話できたらと思います。

[Slide 2] まず最初に、理論研の略歴からお話したいと思います。最初昭和19年といいますから、戦中ですね、そのときまだ、広島文理大学だったそうですが、そこに付置研として、理論物理学研究所（理論研）が設置されました。これはどういういきさつで設置されたかということ、あとで出てきますが、学内に「波動幾何学」というのを研究しているグループができました。その波動幾何学がたいへんアクティブに研究されて、それを契機にこういう研究所をつくることを申請して、なぜか知らないけれども、戦中であるにもかかわらずそれが認められたということなのだそうです。

この研究所の目的は、物理学の基礎理論に関する総合的研究という、まことにこの名前にふさわしいタイトルで、当初は、戦争とはまったく無関係な目的で設立されたようです。

広島にある広島大学のキャンパスの中に、木造の建物として、理論研が最初発足したらしいので

理論研 略歴

- 昭和19年(1944) 広島大学理論物理学研究所、
広島文理大付置研究所として設立。
「物理学の基礎理論に関する総合的研究」を目的
- 昭和23年(1948) 竹原町(現在竹原市)で再建。
- 昭和35年(1960) 重力・時間空間理論および
場の理論・時間空間構造の2部門。
- 昭和40年(1965) 時間空間理論が部門増。
- 昭和48年(1973) 宇宙論研究部門増設。
重力理論、場の理論、時間・空間理論、
宇宙論の4部門教官10名体制。
- 平成 2年(1990) 基研と統合、閉所。

理論研の情報は基研ホームページに富田、木村両先生の書かれたものがある。また、素粒子論研究に「基礎物理学研究所の歴史」として公開されている。

[Slide 2]

すが、原爆によって建物が倒壊して、何名かのスタッフが殉職されたそうです。その後、戦後になります。研究所を再建する努力がなされました。理論研の最初の所長は三村剛昴さんという方でした。三村先生のご友人が、研究所再建の話聞きつけて土地を寄附してくださったり、三村先生ご自身の土地も使ったりして、先生のご出身地である広島県竹原町、いまの竹原市に昭和 23 年に理論研は再建されました。

最初は一つのグループで研究所が始まり、昭和 35 年に二つの部門、重力・時間空間部門と場の理論・時間空間構造部門、に増えました。昭和 40 年に時間空間理論部門が独立し、それから昭和 48 年に、宇宙論研究部門が増設されて、この時点で重力理論、場の理論、時間・空間論、宇宙論、この四つの部門が揃った、これが最終的な理論研の形です。スタッフは 10 名ということです。

ここからだいぶ年月が経ちまして、アクティブな研究がなされてきましたが、そのあと残念ながら平成 2 年に、残念かどうかは立場によるとおもいますが、基礎物理学研究所と発展的な統合がなされて、広島大学の理論研は閉所ということになります。

ここまで、本当に簡単に述べさせていただいたのですが、詳細な情報は、基研のホームページから辿れるところに、富田先生、木村先生の書かれた記事があります。それから『素粒子論研究』にも少し詳しい情報があります。



[Slide 3]

[Slide 3] これは竹原にあった理論研の写真なのですが、イタリアのトリエステにある ICTP と雰囲気がちょっと似ている、ICTP をだいたい 20 分の 1 か 30 分の 1 にした感じでありまして、瀬戸内海の海岸べりに建っております。ここには「釣り・遊泳禁止」という看板があります。ということは、釣りとか遊泳ができるということの意味しております。それからよく見ると、ここにグラウンドというか小さな空き地があるのですが、そこにネットを張って、毎昼休みに、スタッフも院生も事務職員も一緒になってバレーボールをしていました。これは多分、近くにある丘から富田先生が撮影された写真です。

こういう非常にのんびりとしたところに理論研はあって、東京とか京都からは非常にアクセスが悪い。広島市からも、呉線というのんびりとした電車で2時間かかりました。もちろんいまのようなインターネットとかeメールはありませんから、理論研は、アイソレイトされた、遠いところにあった研究所でした。

波動幾何

Relativistic Quantum Mechanics and
Wave Geometry.

By
Yoshitaka MIMURA.
(Received Dec. 10, 1984.)

•P. A. M. Dirac. "Generalized Hamiltonian dynamics". *Can. J. Math.* 2: 129-48 (1950).

•R. Arnowitt, S. Deser and C. W. Misner, "Canonical variables for general relativity," *Phys. Rev.* 117, 1595 (1960).

•B. S. DeWitt. "Quantum theory of gravity. I. The canonical theory". *Phys. Rev.* 160: 1113-48 (1967).
Journal of Science of Hiroshima University, Series A5 (1935)

[Slide 4]

波動幾何のスローガン

$$\left\{ \left(\sum_i x^i \frac{\partial^2}{\partial x_i^2} \right) \psi = m_0^2 c^2 \psi \right\} : \left\{ \left(\sum_i \gamma_i x \frac{\partial}{\partial x_i} \right) \psi \right\} = im_0 c \psi$$

$$= \{ ds^2 = \sum_i dx_i^2 \} : \{ ? \}.$$

$$ds\psi = (\gamma_1 dx_1 + \gamma_2 dx_2 + \gamma_3 dx_3 + \gamma_4 dx_4) \psi$$

Journal of Science of Hiroshima University, Series A

[Slide 5]

[Slide 4] この研究所がつくられた契機になったのは、波動幾何の研究なのですが、これは三村先生が最初に出された論文、タイトルはこのようなもので、1934年に出されています。これは、広島大学の紀要に投稿された最初の論文で、このシリーズの論文が合計60編ぐらい出されたそうです。

それらは重力と量子力学を統一する試みの論文でありまして、このテーマに関連した有名なほかの論文と比較してみます。例えば、これは([Slide 4] 参照) Dirac のコンストレイント量子化につながる最初の論文だと思いますが、1950年に出されています。それから重力理論を量子化するときには、まず理論を正準形式に書き直すということをするのですが、Arnowitt, Deser, Misner の3人、ADM とわれわれは呼んでいますけれども、による重力理論の正準形式化というのが1960年。それから、重力の量子化の一つのやり方として Wheeler-DeWitt 方程式を用いる方法がありますが、DeWitt がそういう道を始めたのが1967年です。これらに対して、この波動幾何 Wave Geometry という試みは、1935年に出された仕事で、驚くべき早さであるわけです。

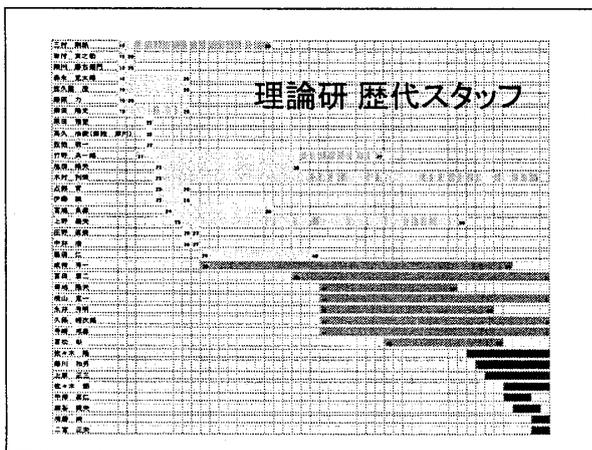
なぜこの時代に、こんなことを考える動機があったのか、まったくわかりません。私は理論研にいたおかげで、この紀要の一部分、写しを手にすることができたのですが、これは理論研のなかでは、禁断の書という感じでした。勉強することは許されない、とまでは言わないけれども、神棚に飾って置くようなものでありました。

[Slide 5] その波動幾何のスローガンとでも言うべき式が、論文のなかに出てきます。これは比例式になっていて、ここにくるべきものが波動幾何です。

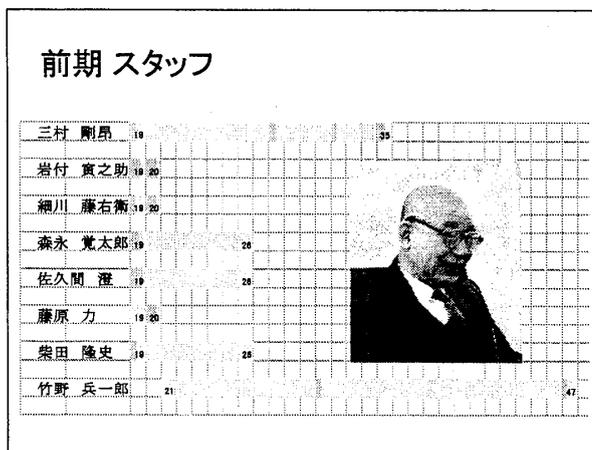
これを見ますと、左辺第1項は、相対論的に不変なスカラー場に対する波動方程式である Klein-Gordon 方程式です。これに対比されているのが Dirac 方程式です。Dirac 方程式は、この Klein-Gordon 方程式をルートに開いたという感じのものです。これに対して右辺第1項にきているのが metric theory です。時空間のなかの2点の距離 ds^2 を基礎にする理論です。これに対比するものが波動幾何になるのです。

この波動幾何の基礎方程式として、こういう形のものが提案されています。なるほどこう見ると、 ds^2 をルートに開いた ds というのが出てきて、それを演算子と見なして波動関数に作用させる、こういう基礎方程式を考えていたのです。

波動幾何は単なるお題目ではなくて、この理論に基づいてかなり具体的なことも調べられています。例えば波動幾何に基づくブラックホールというようなものも研究されているようです。



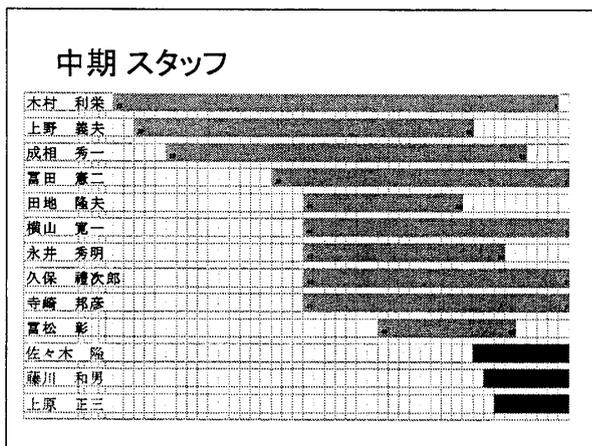
[Slide 6]



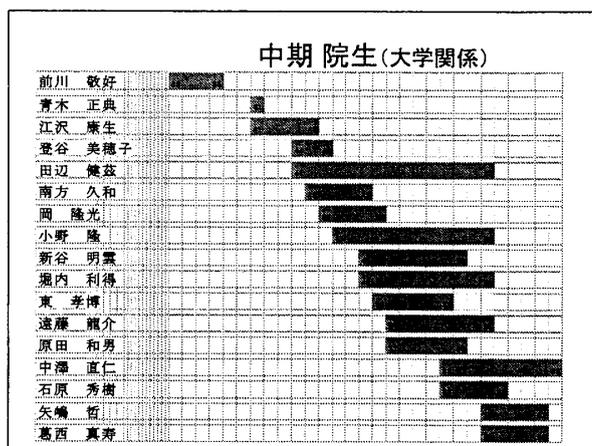
[Slide 7]

[Slide 6] この波動幾何を契機として、理論物理学研究所が発足したのですが、ここに書いたのは、歴代のスタッフです。小さくて見えにくいのですが、一番上が三村先生、初代の所長です。何人かの方がおられて、一段と在籍期間が長いのが木村利栄先生です。そしてずっと下ってきて、ここにあとから出てくる成相秀一先生がおられます。ざっと見ると、なんとなくこころへんが理論研の初期というか前期、このへんがなんとなく中期。この緑で書いたのが、この基研にもおられる佐々木隆さんです。それから藤川（和男）さん、上原（正三）さん、そして佐々木節さん、細谷（暁夫）さん、中澤（直仁）さん、須藤（靖）さん、二宮（正夫）さんがあとで来られる。こころへんが理論研の後期。平成2年で終わっているのは、基研と統合したということを意味しています。

[Slide 7] まず、理論研前期に注目してみます。三村先生をはじめとする数人の方が波動幾何を具体的に研究された。この方たちの研究のおかげで、理論研ができた。前期最後の竹野（兵一郎）先生という方は、ちよくちよく理論研においでになって、お元気な姿を見たことがあります。



[Slide 8]



[Slide 9]

[Slide 8] 次に、中期になります。木村利栄先生は、残念ながら昨年（2000年）の12月17日、ご旅行中にお亡くなりになりました。元気な頃を思い出すと、とても残念です。今日、ここで木村先生の話をしていただくわけなのですが、木村先生の怒った顔が目には浮かぶような感じがします。

中期のスタッフは、成相、富田（憲二）、田地（隆夫）、横山寛一先生、それから久保（禮次郎）さん、寺崎（邦彦）さんは基研に移られました。富松（彰）さんもおられました。このへんが中期という感じです。そしてここにちょっとギャップがあつて、佐々木隆さん、藤川さん、上原さん以下と続いている。このあたりから雰囲気が変わって、またアクティビティが上がった後期というこ

とになると思います。

[Slide 9] 中期にいた院生の一部で、現在、なんらかの意味で大学にかかわりあいのある方をピックアップさせていただきました。例えばここらへんに愛媛大の江沢（康生）さんとか元基研の登谷（美穂子）さん、いま座っていらっしゃいます。それから都立大の南方（久和）さんとか、プラズマ研究所の堀内（利得）さん、山形大におられる遠藤（龍介）さん。私は下から3番目ぐらいで、熊本大の矢島（哲）さんとか、弘前大の葛西（真寿）さん、こういう面々が、理論研から出て行った中期の卒業生です。



[Slide 10]

[Slide 10] これがその頃のメンバーの写真です。これはちょうどチャンドラ・セカールが理論研を訪ねてくださったときに集合写真を撮ったものです。背景が瀬戸内海で、これは木村先生、成相先生、横山先生ですね、富松さん、藤川さん、それから寺崎さんですね、ここに富田さん久保さんがおられます、こんな感じです。これが私が理論研にいた頃のスタッフメンバーです。

後期 スタッフ	
富田 兼二	■
横山 寛一	■
久保 禮次郎	■
寺崎 邦彦	■
佐々木 隆	■
藤川 和男	■
上原 正三	■
佐々木 隆	■
中澤 直仁	■
細谷 隆夫	■
須藤 清	■
二宮 正夫	■

[Slide 11]

後期 院生(大学関係)	
山本 寿 (同志社女子大学 生活科学部)	■
杉山 直 (国立天文台)	■
南部 保貞 (名古屋大学理学部)	■
早田 次郎 (京都大学理学部)	■
中尾 憲一 (大阪市立大学理学研究科)	■
鈴木 博 (理化学研究所)	■
渡辺 一也 (新潟大学理学部)	■
山本 一博 (広島大学理学部)	■
上田 晴彦 (秋田大学 教育文化学部)	■
松原 隆彦 (名古屋大学大学院理学研究科)	■

[Slide 12]

[Slide 11] 後期になりますと、中期からおられた富田、横山、久保、寺崎さん、そこに佐々木隆さんが入って来られました。理論研では、それまで重要な研究がなされてきたと思うのですが、やはり同じメンバーで長い時間ずっと続くと、ある意味の停滞というものがありまして、一番初期から中期に移るときにいろいろな人が入ってきた。それから中期から後期に移るときに、またいろ

いろな人が入ってきて、最後は非常にアクティブになったと思います。そのアクティビティを支えた人々が、佐々木節さんをはじめとする、このへん ([Slide 11] 参照) のメンバーであります。

[Slide 12] 理論研の歴史の最後のほうに育った院生が、ここにリストされています。一番最後は松原 (隆彦) さん、いま名古屋大学の理学部で宇宙の研究をされています。彼のホームページに、理論研を懐かしむページがありまして、そこに「理論物理学の分野でアカデミックポストを得ることはかなり難しい。しかし、理論研の最後のほうの院生は、アカデミックポジションに残った比率が極めて大きい」ということを書かれています。このことは、院生本人たちが優秀であったことはもちろんなのですが、その頃のスタッフたちがものすごくアクティブだったということ象徴していると思います。

最初に言いましたが、私と後期の院生だった中尾さんが、今、大阪市立大学におられます。後でちょっと宣伝をさせていただきます。

中期 重力理論・宇宙論スタッフ	
木村 利栄	
成相 秀一	
富田 憲二	
富松 彰	
(石原 秀樹)	

[Slide 13]

膨張宇宙における場の量子論 (成相-木村の共同研究)	
• ADM formalism in expanding universes	H.Nariai and T.Kimura, PTP 28('62)529. [L.Abbot and S. Deser, ('82)]
• Quantization of gravitational wave and matter fields in expanding universes	H.Nariai and T.Kimura, PTP 29('63)269; PTP 29('63)915; PTP 31('64)1138. [A.Penzias and R.Wilson ('63)] [L.Parker PRL 21 ('68)562] [S.W.Hawking, Nature 248 ('74)30]

[Slide 14]

[Slide 13] 今日のお話では、主に重力理論・相対論、それから宇宙論に関する研究を振り返ることが目的なので、私が在籍しておりました頃にオーバーラップのあった、木村先生、成相先生、富田先生、富松先生、このご四方のことに触れさせていただいていきたいと思ひます。

[Slide 14] まずこの理論研は、前にも申しましたように、非常にアイソレイトしたところにありまして、研究所発足の起源も、重力と量子論の統一というような非常に浮世離れた感じのことでした。その理論研における研究のなかで、一つの特筆すべき研究が、ここに挙げさせてもらったものではないかと思ひます。それは、膨張宇宙において場の量子論を考えるという研究でした。これは成相さんと木村さんの共同研究としてなされました。ここに挙げてある、『Progress』に投稿された四つの論文がメインの仕事です。

先ほどの Arnowitt-Deser-Misner の重力理論の正準形式、これが 1960 年に世に出たのですが、それは何もないフラットな時空の上に弱い重力場があり、それを正準形式にするというフォーマリズムです。それを膨張宇宙のなかで定式化した、というのが成相・木村の第 1 論文です。この仕事は 1962 年なのですが、その 20 年も後に、Abbot と Deser が de Sitter 宇宙、先ほどの藤井先生のお話にも出てきました加速膨張する宇宙に、このフォーマリズムを具体的に適用して、保存量だとか質量だとかを定義するという有名な仕事をしました。成相・木村はそのもとになっている基本的な仕事です。

ここに持ってきたのは、成相先生が還暦を迎えられたときに記念に出された論文集です。その中に成相・木村の論文も収録されていて、佐藤文隆さんが原稿を寄せられています。佐藤さんは、なぜこの 1962 年にこのようなことをやらなければいけないのか、このことが非常に特筆すべきことだ、とおっしゃっています。こちらを先に言うべきでしたが、第 1 論文に引き続き、曲がった時空

である膨張宇宙のなかでの重力場の摂動と物質場の量子論を考える、というのがシリーズの論文で、1963年、64年のあたりに出されています。

第1論文のなかには、膨張宇宙というのは曲がった空間なんだから、平らな空間ではなく曲がった空間という境界条件のもとで、場の理論をつくる必要がある、と述べられている。実際の物質は膨張宇宙の中にあるからだ、というイントロダクションなわけです。ところが、今この場におられなくて残念なのですが、佐藤文隆さんは、このようなイントロは一言で言えば物理を知らない人が書くことである。なぜならば、膨張宇宙の曲がり具合のスケールと量子論で問題にするスケールは極めて違う。量子論で問題になるスケールでは、時空は近似的にフラットだと思ってよろしい。原理的には成相・木村がおっしゃるとおりであるけれども、物理のセンスからいって、こんなことを考えるのは定量的にほとんどナンセンスである、とおっしゃっているのです。

ここに、時代を知るための論文をあげておきましたが、Penzias-Wilsonの3K宇宙背景輻射が発見されたのが1963年です。発表されたのは65年なのでしょうか、だから、宇宙膨張が、かなり過去まで遡れるという認識は、この頃までなかったのです。宇宙が膨張しているという認識はもちろんあったのですが、どこまで過去まで遡れるか。多分、銀河が押し合いへし合いするぐらいのスケールまでは遡れるのだろうけれども、それよりさらに宇宙がマイクロなスケールになるまで遡れるという認識は、多分、なかったのです。そういう時代に、膨張宇宙のなかでの量子論を考えるというのは、まことに驚きである、ということです。

…:Gamowもそういうことを言っているんじゃないですか？

石原:Gamowはそう言っていましたね。

3Kの宇宙背景輻射の存在が明らかになって、今では、時間を遡ると宇宙はPlanck scaleまで小さくなるということをみんな思っているわけです。そうすると、この膨張宇宙のなかの場の量子論というのが、一挙にリアリスティックになってくる。

そういう認識ができた後で、Parkerが68年に、膨張宇宙のなかで場の理論を考えると粒子生成が起こるということを言い出しました。Hawkingの有名なブラックホールの蒸発の仕事は74年です。曲がった時空での場の量子論のフォーマリズムは、これらよりかなり前に成相・木村により作られていた。

- In theoretical physics, “unrealistic and non-urgent work” happens to turn to a cardinal issue.
- We should not ask a physically reasonable motivation so urgently.
- Prof. Nariai has fortunately enjoyed both fairy tale and documentary of the universe.

成相先生還暦記念冊子の佐藤(文)さんの言葉より

[Slide 15]

[Slide 15] 成相先生の還暦記念論文集のなかで、佐藤さんがこういうことを書かれています。理論物理では、リアリスティックでないこととか、それほど緊急でないような仕事が、とても良い仕事になることがある。だから、モチベーションが物理的にリーズナブルかということを性急に求めない方がよろしい。

発展

- Gravitational anomaly
T.Kimura, PTP 42 ('69)1191;
PTP 44 ('70)1353
- Removal of initial singularity in a big-bang universe
H.Nariai, PTP 46 ('71)433,
H.Nariai and K.Tomita, PTP 46 ('71) 776

[Slide 16]

このことは、成相先生の還暦祝いの論文集に書かれていますから、佐藤さんが成相先生のこの仕事を尊重するために、ちょっとお世辞的に書かれたのか、本心で書かれたのか、ご本人に聞いてみたいところですが、私としては佐藤文隆さんの虎の威を借りてでも言いたいことであります。

さらに佐藤さんは、成相先生の研究人生は、「fairy tale」と「documentary of the universe」の両方のことをエンジョイしたものだたと書かれています。「fairy tale」とは、成相・木村のような仕事、「documentary」とは、本当にこの宇宙で起こっていることをそう呼ばれたのだと思います。成相先生が研究者としてアクティブだった時代に、3Kが発見されたりクェーサーが発見されたり、宇宙物理では大変重要な観測的発見が相次ぎました。

[Slide 16] この成相・木村の仕事は、のちに木村先生の有名な重力 anomaly という話に発展していく。一方、成相先生は、膨張宇宙の中の場の理論を用いて初期特異点のない宇宙モデルを作る話に進む。宇宙を遡って、3Kを通り越してさらに縮めば、相対論的には時空の初期特異点という時空の曲率が発散する点に至ります。そこでは物理法則が成り立たないという困ったことになるので、それをなんとか避けたい。膨張宇宙における場の理論のバックリアクションを考えることによって、初期特異点を避けるという、成相・富田の研究がなされました。

<p>富田</p> <ul style="list-style-type: none"> • Perturbation theories in relativity (linear, 2nd order) • Anti-Newtonian approximations • Gravitational lens <p>富松</p> <ul style="list-style-type: none"> • Black holes and solitons • Magnetohydrodynamics in black hole geometries • Accretion disk with a magnetic field 	<p>高次元宇宙関係の論文@理論研</p> <ul style="list-style-type: none"> • H. I., Prog. Theor. Phys. 72, 376 (1984). "Kaluza-Klein Inflation" • H. I., K. Tomita and H. Nariai, Prog. Theor. Phys. 71, 859 (1984). "Some Higher Dimensional Vacuum Solutions Of Einstein Equations With A Cosmological Constant" • H. Nariai and H. I., in A Random Walk in Relativity and Cosmology, ed. N. Dadich et al. (Wiley-Eastern, 1985), 164. "On The De Sitter And Nariai Solutions In General Relativity And Their Extension In Higher Dimensional Space-Time" • K. Tomita and H. I., Phys. Rev. D 32, 1935 (1985). "Entropy Production Due To Gravitational Wave Viscosity In A Kaluza-Klein Inflationary Universe" • H. I., Prog. Theor. Phys. 74, 490 (1985). "Towards Higher Dimensional Homogeneous Cosmologies" • H. I., A. Tomimatsu and M. Den, Prog. Theor. Phys. 74, 1045 (1985). "Pyrgon Annihilation In A Five-Dimensional Model Universe" • A. Tomimatsu and H. I., Gen. Rel. Grav. 18, 161 (1986). "Dimensional Reduction In An Oscillatory Kaluza-Klein Cosmology"
---	--

[Slide 17]

[Slide 18]

[Slide 17] さて、その次に、富田先生、富松先生の仕事について、ご紹介させていただきます。私がこのご両人の研究を一言で言うのは、たいへん僭越なのですけれども、あえて言わせていただくことにします。

富田さんは、宇宙の問題をいろいろな面から取り扱っておられるのですが、宇宙が非一様だということに着目された仕事が、一番印象的です。一つのアプローチは摂動です。先ほどの藤井先生のお話にも出てきましたが、宇宙の基本的モデルは Robertson-Walker-Friedmann Model、宇宙はつるつるでどこもかしこも一様で、どちらを向いても同じ、そういう仮定で宇宙を考える、これは一番簡単です。それで膨張という一番本質的なところが出てくるので、first step はもちろんそれでいい。だけれども、空を見てみれば、いろいろな銀河だとかがあるわけですから、実際の宇宙は非一様です。なぜこの宇宙に銀河というものがあるのか、これは大問題です。そういう問題に対するアプローチというのは、非一様性がどう発展するかということが重要なのです。これを相対論的に扱うことがとても重要になります。これはテクニカルないろいろな問題を含むのですが、一番最初にやったのは Landau-Lifshitz の Lifshitz だと思います。富田さんもそういう流れの研究をされました。

相対論的な摂動を線形から 2 次のオーダーまで進めて考えるところが富田さんのオリジナルなところで、これは今でも、セカンドオーダーの摂動をきちんとやった人はいないのではないかと。富田さんの仕事は、本当にパイオニアの仕事だと思います。

それからさらに、宇宙の非一様性を Anti-Newtonian という聞き慣れない近似で扱われました。これは相対論特有な性質を捕らえたものです。相対論では、もちろん光速が最高速度になるので、ある点から有限の時間内に情報が伝達する距離は有限です。つまり、ある有限の時間内にコミュニケーションできる領域は、有限です。宇宙が膨張しているとすると、逆に、宇宙を遡っていくと有限時間で宇宙の始まりである初期特異点に達します。宇宙が始まってからの時間は有限であり、宇宙初期にいけばいくほどその時間が短くなるのですから、その時刻までにコミュニケーションできた領域は、初期にいくほど、どんどん小さくなっていきます。ということは、宇宙の初期にいくと、自分の周りの領域の状態と隣の領域の状態は無関係だということに、だんだんなってくるのです。時間微分と空間微分を考えたとき、空間微分は隣との関係を表すものですから、宇宙を遡ると、時間微分に比べて空間微分の効果がどんどん小さくなるということなのです。

普通の Newton 重力では、重力場の時間変動が小さい。時間的には変動しないけれども、地球から離れると重力が弱くなる。だから Newtonian 重力では空間微分が重要です。一方、先ほど、相対論宇宙モデルで言ったことは、まったく逆で、時間微分が重要になるのです。だから宇宙初期では、空間微分を無視する、もしくはそれを摂動的に取り入れる。そういうアプローチが、この「Anti」という言葉に込められたフォーマリズムです。これを富田さんが、世界でオリジナルにやられた。

その後、これと同じ考え方の仕事が、Gradient Expansion Method for Relativity という名前で、世界的に注目されたことがあります。これはどうもネーミングの問題なのか、この富田さんのオリジナルな仕事はほとんど無視されて研究がなされたという、とても残念なことがありました。

このことは、教え子である我々に悪いところがあると思うのです。自分の先生が、どういう仕事をされたかということをお自身があまりよく勉強していなかったということがあって、視野が日本の中でなくて外ばかりに向いている。だから、外国でやられたことは新しくて良さそうに見える。私自身、とても反省しないといけないことだと思います。本当は自分の身の回りに、とても良い仕事があったのです。

それから最後に、重力レンズの仕事です。宇宙には、銀河などいろいろなでこぼこがあるので、光がやってくるときに、その重力で曲がるという効果が観測的にどのような影響を及ぼすか。実際、宇宙のでこぼこのなかを光が伝わることは、もちろん、一様な宇宙のなかを光が伝わってくることは違うわけです。そのことに対する研究、これもたいへん良い仕事だと思います。

Anti-Newtonian は宇宙の初めの話で、これはちょっと、お伽噺話的なところがあり、重力レンズの話は、観測と結び付いた“真面目”な研究だと思います。宇宙の非一様性ということに注目した、すばらしい研究がなされてきたと思います。

次に、富松先生です。富松さんは、もちろん有名な富松・佐藤解、これは京都での仕事で、Einstein 方程式の新しい厳密解を見つけられた。理論研に移られてからも、富松・佐藤解の数理的な側面を深く研究されて、それがソリトンと密接に関係があるという仕事をされました。私が理論研にいた頃には、Kerr ブラックホールを二つ用意して、それを釣り合わせる、それは実はソリトンから導かれる、という話をよく聞きました。

富松さんは、意外だと思われるかもしれませんが、相対論・重力理論以外に、磁気流体力学についての多くの研究があります。天体には磁場がだいたい付随していて、その周りにはいろいろな電離ガスなどがあるのですが、それがどういう物理的な性質を示すか、それをブラックホール周りで考える。

それから天体の周りにガスが存在すると円盤ができます。これを降着円盤、accretion disk と呼んでいます。その accretion disk と磁場の性質、これは本当の天体の話で、非常に地に足の着いた研究です。富松さんはこういう研究も、非常に精力的になされています。

[Slide 18] ちょっとここで私のことで恐縮なのですが、私が院生だった頃に、高次元の宇宙モ

デルについて、いろいろとやりました。当時、院生だった私がどこかから話を聞いてきて、面白そうなので始めた仕事なのですが、当時はとてもプリミティブなレベルで、先ほどの一様等方な Friedmann 宇宙モデルに余分な次元を付け加えたモデルを考え、等方ではなくて非等方な高次元宇宙モデルを考えるということです。これはとても幼稚なレベルの研究だといって差し支えないと思うのですが、ここでご紹介したいのは、そういう他愛のないことを私が研究所内で話すと、先ほどのそうそうたる仕事をされてきた成相先生とか富田先生、富松先生と一緒に仕事をしてくださるのです。こういうことが面白そうだと言うと、富田先生なんかは、「そうか」と言って、一晩すると「石原くん、計算できたよ」と持って来てくださる。逆なんじゃないか。「計算してきなさい」と言われるだろうなと思ったのですが…。

例えば高次元宇宙関係の論文だけ取ってきますと、これは全部、私が絡んでいるのですが、成相、富田、富松、先ほどのスタッフが全員絡んできて、どんなことでも興味を示していただいた。このときには、院生も先生も対等な研究者として接してくださるのです。それで私など、これなら将来研究者としていけるかもしれない、と勘違いして今に至っているということです。

In theoretical physics, “unrealistic and non-urgent work” happens to turn to a cardinal issue.

We should not ask a physically reasonable motivation so urgently.

But, it would be also necessary to keep a sort of soundness at each stage of research.

成相先生還暦記念冊子の佐藤(文)さんの言葉より

[Slide 19]

さて、われわれは…

[Slide 20]

[Slide 19] もう一度、成相先生の還暦記念論文集に佐藤文隆さんが寄稿された話に戻ります。そこには、リーズナブルな動機を性急に要求するものではない、という話がありました。けどその後、「しかし」ということが書かれていまして、やっぱりながしかの健全性というものが、研究の各プロセスに要求される、と。何をやってもいいということではない、ということをおっしゃっているのです。深く考えずに物理をやっている身としては、これはなかなかグサリとくるところです。

[Slide 20] 私達が置かれている状況のなかで、これからどうしていくのがいいのか、考えていることとお話します。初めに言いましたように、日本の宇宙論・相対論の研究者がこうあるべきだ、というつもりは毛頭ありませんで、私たちのグループは、こう考えているということです。

幸い、宇宙物理の分野では、重要な宇宙論的な観測がたくさんあります。特に最近では、観測技術の発展があって、ものすごく豊富なデータが提供されています。これはちょっと、素粒子の分野とは違うんじゃないかと、これはたいへん幸福なことだと思います。

[Slide 21] いろいろとあって私は全部レビューできないのですが、例えば Sloan Digital Sky Survey (SDSS)、これはものすごく遠方の天体をたくさん見る。遠方の銀河だとか、遠方のクエーサーをものすごくたくさん観測して、その距離と天球上の位置を測ることによって、宇宙の3次元地図をつくと、これがこのプロジェクトなのです。これを実際にやると、宇宙がどのような形で非一様なのかということがわかる、そういう重要な研究です。今、きれいな写真ができています。

宇宙論における重要な観測

- SDSS : 銀河とクエーサーで宇宙の3次元地図を作成
- WMAP : CMB の温度を全天サーベイ
- SN Ia : 距離-赤方偏移関係
-

[Slide 21]

人間は、確固とした拠所をもって考えると、
とてつもない力を発揮する。

物理学会2005年秋季大会市民講演会での
益川さんの言葉@大阪市大

[Slide 22]

それから有名な WMAP. これは何の略か忘れましたが、とにかくこれは、3K の宇宙背景輻射の全天分布を見る、昔はただある一方向だけを見てスペクトルを測るということをやっていたのですが、全天を見て、どこが温度が高くどこが低いということを詳細に調べる。

佐々木 : 一応、「Wilkinson Microwave Anisotropy Probe」です。

石原 : だそうです。

これもとてもきれいな絵が、ホームページでは出ています。それをもってきてここに張ると、著作権の問題で問題になるんじゃないかと思っ、あえてつけてきませんでしたけれども、とてもきれいな写真があります。

それから super nova type Ia (SN Ia), これを観測する。ハワイにある日本の「すばる」望遠鏡なんか、これからどんどんデータを出してくれると思います。Super nova は星の終末に一時的に非常に明るくなる現象で、遠くのものまで見えます。特にこの Type Ia というのは、super nova のなかのある特別なタイプで、ほとんどのこのタイプの星は、最大光度が一定なんだそうです。光度が一定であるということは、もし暗く見えたら遠い、明るく見えたら近いということなので、super nova type Ia の明るさを観測すると、それがどの距離にあるかがわかる。さらにこの super nova の赤方偏移を測ると、距離と赤方偏移の関係を見出すことができるのです。それを非常にたくさんのデータについて調べる。

もし、この宇宙が一様等方な Friedmann 宇宙であって、空間の曲率の符号、宇宙を満たす物質の割合、宇宙項の大きさ等モデルパラメーターがこれこれの値であると仮定すると、天体の距離と赤方偏移の関係はこうでないといけない、ということが理論的に予想されます。理論予想と観測データを比較することによって、宇宙モデルをセレクトすることができる。そのことが今、精力的にやられて、最近、話題となっています。それに加えて、WMAP や SDSS のデータも使うと、宇宙が現在加速膨張しているんじゃないかということが出てきています。これは佐藤 (勝) さんの初期宇宙のインフレーションじゃなくて、現在の宇宙の加速膨張です。

先ほど、坂東さんがおっしゃっていましたように、宇宙の中に、ちょっとおかしいものがないと、宇宙は加速膨張にはなりません。正のエネルギー、正の圧力をもったような物質があると、宇宙は必ず減速膨張になります。これは、万有引力であらゆるものはみんな引っ張りあっているから、ブレーキがかかるということなのです。だから、宇宙を満たすものが普通のものだったら、減速膨張になるはずなのです。ところが加速膨張ということは、例えば負の圧力、正のエネルギー密度は引力を引き起こすので、その引力に打ち勝つような大きな負の圧力がないと、加速膨張は起こらないのです。もし大きな負の圧力の物質の存在を認めるならば、そういう変なものかというのを物理的に調べる必要があって、これは物理に新しいパラダイムをもたらすのではないかと期待されているのだと思います。このような変なものの候補として一番典型的なものが宇宙項で、それは先ほど、藤井先生のお話にも出てきたわけです。

後でお話しますが、宇宙膨張の加速ということをどれだけ serious に捉えるかというのには、い

ろいろと立場があり得る。例えば、素粒子にはない貴重な観測データである、と真摯に捉えるならば、これを説明するために、先ほど述べたような期待をもって進む、というのが一つあり得るのですが、これが唯一の可能性かどうか、ここが問題なのです。

[Slide 22] 2005年の秋に、大阪市大で物理学会がありまして、一般市民向けの講演会を益川さんにやっていただきました。その中で「人間は確固とした拠所をもって考えると、とてつもない力を発揮する」ということを言われました。このとおりの言葉だったかどうかわかりませんが、そういう主旨のことを言われました。その「確固とした拠所」というのは、例えば実験的な根拠、観測的な根拠だと私は思います。理論物理では、理屈だけで、整合性だけで考えを進めるということをよくやるわけなのですけれども、いろいろな方向に可能性がある。自然の中に本当にある、本当に起こることは、そんないろいろな可能性のなかで、一番素晴らしいものなのでしょう。そういうものは、やっぱり何か拠所があって探すと、effectiveに研究を進めることができるし、そうでないと、考えるんだけど無駄に終わることもある。そういうことをおっしゃっていたのだと思います。それが非常に心に残っています。

<p style="text-align: center;">Fairy tale ? Documentary?</p>	<p style="text-align: center;">現在の相対論・宇宙論の御伽噺</p> <ul style="list-style-type: none"> • ブレーン宇宙 (大きなサイズの余剰次元) • 高次元ブラックホール (ブラックリング, 加速器による生成) • 加速宇宙 (観測的拠所) • ...
--	--

[Slide 23]

[Slide 24]

[Slide 23] 宇宙は非常にたくさんの観測があります。いまの益川さんの言葉を聞くと、心が揺れまどう。理論研は先ほどご紹介したように、むしろお伽噺的なところをやるという特徴がありました。

昨日、橋本さんの講演のときに、中西先生が「ブレーンには、その導入する根拠があるのか。それは単なるお話か」と厳しい批判がありました。ここで言う「お話」というのも、ここで言っているのは実験的・観測的な根拠が現段階であるわけではないけれども、理論的な推論の中での必然的な帰結であるとか、論理性はもちろんあっての上でのお話という意味です。

理論的な思考を自由に展開するような研究は、もちろんみなさんご存じのように、非常に楽しそうだし、しかしながらやっぱり、確固とした何かに寄り添う研究というのは、物理そのものである。どの道を選ぶか。もちろん宇宙物理全体の研究としては、この両面を兼ね備えるということが必要なのだろうとは思いますが...

[Slide 24] 現在、相対論・宇宙論の fairy tail のほうの典型的なものは、どういうものかというのをリストさせていただきました。

最初の「ブレーン(膜)宇宙」。橋本さんは、昨日、時間がなくてスキップされたところだと思うのですが、ブレーンというものがもし存在すると、宇宙に対する考え方が革命的に変わることが、まずあげられます。今まで伝統的には、高次元の時空モデルを考えたときに、余分な次元はだいたい Planck scale ぐらいに小さく丸まっている必要がある。これは物質に関する加速器実験との無矛盾性から、そういうことが要求されるのです。けれども、このブレーンというものは、ある意味ではとてもフェアでないもので、物質はブレーンの上には存在できない。だから余分な次元のサイズが大きくてもいいじゃないかということなのです。

ところが重力は、相対論では定義によって時空そのものですから、時空があるということは重力がそこにあるということであり、重力場は余分な次元の方向に propagate できます。だからブレーンが存在すると、物質場と重力場の存在できる空間が峻別される、そういう、ある意味では汚い考え方なのです。そうすると、重力場だけが余分な次元の方向の存在を感じる、だけれども、重力には $1/r^2$ の法則があるので、あまり勝手なことはできません。さっきの藤井先生のお話にもあったように、重力の法則に関する観測というのは、非常に初歩的なところで止まっていて、現在の重力の観測によって余分な次元のサイズに制限をつけようとする、これは極めて緩い。余分な次元のサイズは、多分、0.1 ミリぐらいがあっても良いということになっています。

このブレーンの考え方を認めるとすると、余分な次元のサイズはかなり大きくて、そこでは幾何学的な意味の重力がまだ生きているのです。古典的な意味での高次元の重力、高次元の相対論、そういうものを考える余地が出てくる。そうすると、例えば、高次元ブラックホール、これが古典的な意味のブラックホール幾何学として、この世の中に実現するかもしれないというお伽噺をつくることができます。

こういう研究は、最近盛んにおこなわれていて、例えば、4次元のブラックホールでは、事象のホライズンは2次元の球面に限られるということが証明されますが、高次元にいくと、ブラックリングという別のトポロジーをもったホライズンが許されるという、定性的な違いも明らかになりました。

それから昨日のお話でもちよつと出てきましたが、加速器のなかでブラックホールがつくられるかもしれない。もし余分な次元のサイズが大きいと、高次元の基本的な Planck energy scale というのが、もともとは、いま思っている4次元の Planck energy scale よりずっと低いということが出てきます。余分な次元のサイズと、高次元の Planck length の比の何乗かが高次元の Planck scale にかかることによって、4次元の Planck scale が出てくるので、もともとの Planck energy scale は小さい。

そうすると、近未来の加速器で到達できる energy scale で、普通の高エネルギーの物質が、重力半径より小さくなる可能性があるのです。そうすると加速器のなかで、ブラックホールがつくられるのです。これはお伽噺としてはよくできていて、もし本当にブラックホールができたとしてもエキサイティングです。

それから先ほどの加速膨張宇宙。加速膨張宇宙が本当だとは、少なくとも今の私には信じられませんけれども、観測的な拠所がこれにはあります。

こういう状況をまずふまえて、大阪市大の宇宙グループは、いま、こういうことをやっているということをお話して、最後にまとめたいと思います。

[Slide 25] いま出てきたお伽噺の一つめが、高次元ブラックホールですね。4次元のブラックホールは、長い時間をかけてよく研究され、蓄積があります。今、問題となるのは、高次元ブラックホールは4次元ブラックホールと同じなのか違うのか。この世の中が本当に高次元だったら、もちろん高次元ブラックホールを研究することはとても意味のあることだし、世の中が高次元でないとしても、4次元の時空というものを深く理解するために、これはきっと意味のあることだと思います。

最近、われわれのグループでは、大域的に非自明な漸近平坦性を持つ5次元ブラックホールというものを調べています。0.1 ミリぐらいの大きさに余分な次元がコンパクト化されていて、そのような5次元時空にブラックホールがあるとします。

ブラックホールの漸近平坦性というのは、ブラックホールから充分離れると時空がフラットになるということで、ブラックホールが他かの物体から孤立しているということ、理想化して表現したものです。でも、余分な次元がコンパクト化されているのだったら、そちら方向には漸近的に平坦になる必要は必ずしもありません。だから、コンパクト化された余分な次元をもつという漸近性

のなかで、高次元ブラックホールを考えるということを研究しています。

市大グループの取り組み

- ・ 高次元ブラックホール
 - 4次元ブラックホールはよく研究されてきた
 - 高次元ブラックホールは4次元ブラックホールと同じか

大域的に非自明な漸近平坦性をもつ5次元ブラックホールの構成
H.Ishihara,M.Kimura,K.Matsuno,S.Tomizawa (*06)

その合体
 $S^3 + S^3 \rightarrow L(2;1)$

[Slide 25]

Randall-Sundrum model

重力波は見かけ上光より早く伝わる
H.Ishihara,I.Tanaka(*05)

[Slide 26]

こういうことから、どういう面白い定性的な結論が出てくるか、これがこの研究の間われるところだと思うのですが、例えば次のような非自明な漸近構造をもつ5次元ブラックホールの厳密解を構成して、そのブラックホールの合体を調べました。

5次元時空のブラックホールは、時空次元が1次元上がっているので、ブラックホールのホライズンも1次元上がって、今度は3次元球面になります。そこで、3次元球面のブラックホールを二つ合体させるというプロセスを考えます。これはちょうど、まん丸いシャボン玉を合体させると、くっついて大きなシャボン玉ができるプロセスと似ています。数学的には、連結和と呼ばれていて、球面と球面の連結和は球面であることが示されます。4次元ブラックホールの合体では、まさにそうなっていて、2次元球面のブラックホールを二つ合体させると、必ず、ひとつの2次元球面のブラックホールができます。

ところが5次元でブラックホールの合体を考えると、必ずしもそうはならないのです。3次元球面のブラックホールを二つ合体させると、レンズ空間のトポロジーをもつホライズンのブラックホールになるというプロセスが存在します。3次元球面は、2次元球面と異なり、等長変換群が特別な性質をもっているため、固定点をもたない等長変換群の離散的な部分群で球面上に同一視を入れることによって、局所的な幾何構造が同じでトポロジーが違う空間を考えることができます。そういうことが効いていて、大域的に非自明な境界条件をもつ5次元ブラックホールの場合には、二つのブラックホールが合体するとホライズンのトポロジーが変わるといって、4次元には見られない高次元時空での定性的な性質があることがわかりました。これはとても面白いことだと思います。

[Slide 26] 先ほど、ブレーン宇宙のお話をしましたが、Randall-Sundrum model というブレーン宇宙モデルが脚光を浴びました。ここに、ブレーンの絵を描きましたが、ブレーンも何かエネルギーの塊だと考えると、相対論によれば、そのエネルギーは周りの時空を曲げることになります。そして、ブレーンがものすごく薄いものであるならば、ちょうどデルタ関数的なポテンシャルが存在するために量子力学の波動関数が折れ曲がるように、時空がブレーンを横切るところでカクッと折れ曲がる、そういう感じの宇宙モデルです。

そして余分な次元も含めた全時空が反ドジッターという負定曲率の時空だとすると、実はこの余分な次元のサイズが有限でなくても、ブレーン上に effective に4次元の重力理論が再現できるということを、Randall と Sundrum が提唱して、非常にセンセーションを起こしました。

我々のような物質は開いた弦で構成されているので、ブレーンの上にはしか存在できない。ブレーンを離れることはできないのですけれども、宇宙は我々が住んでいるこの宇宙だけではない、ということを示唆するわけです。ブレーンのような部分空間は、全体の高次元時空の中には、何枚あつ

てもいい。今までは、我々の住む universe は言葉どおり唯一で、世界全体である。全体である宇宙は、自分自身の中に自分の情報を全部もっていると思っていたのですが、もし、ブレーン宇宙が本当だとすると、我々の住む宇宙は時空全体のほんの一部なのですから、我々の住む宇宙の情報だけで、我々の宇宙が完全には決まらないということになってしまうのです。

高次元時空に基づくブレーン宇宙モデルというのは、4次元の標準的な宇宙モデルとはとても違うので、本当に我々の住む宇宙がブレーンなのかどうかということを探ることが、一番重要なことです。それを探るのは、このブレーンから外に出られる自由度を使うしかないわけです。それは重力場です。ですから、重力場を使うことによって、本当に我々の住む宇宙はブレーンなのか、それともやっぱり普通どおりなのかは、我々の宇宙から重力波が出て行けるのかどうかポイントなのです。

もしブレーンが高次元時空の中でへこむように曲がっているとすると、重力波がブレーンから一旦外に出て、また戻ってくる。すると、ブレーンの上を伝わる光より速く、重力波が別の点に伝わることも可能になります。ブレーン上に正のエネルギーと正の圧力をもつ普通の物質が存在していると、ブレーンはへこむように曲がるのが示せます。大阪市大では、そういうことに関しても研究しました。

“加速宇宙”にはダークエネルギーが必要か？

“加速度”は

- 天体の見かけの明るさ(距離)
- 赤方偏移
- 宇宙モデル

からきまる。

非一様宇宙モデルでの“加速度”

T.Kai,H.Kozaki,K.Nakao,Y.Nambu,C.Yoo ('06)
C.Yoo,H.Kozaki,K.Nakao,R.Takahashi ('06)

[Slide 27]

受け継ぎたいこと

宇宙は物理法則が実現する現場

- 定性的現象論, 理論的現象論(Fairy tale)

基本法則にフィードバック

[Slide 28]

[Slide 27] 最後に加速膨張宇宙。加速膨張を引き起こす物質は、一般に「ダークエネルギー」と呼ばれているのですが、これは前に申しましたように、圧力が負で、特にその大きさがエネルギーより大きい、見たことがない怪しいエネルギーというものです。ダークエネルギーはいったい何なのか、宇宙の加速膨張は観測に基づいているので、非常にやりがいのある研究です。しかし、ちょっと反省してみると、宇宙膨張の加速度というのは、これを測る「加速度計」というものがあるわけではないので、ある別の観測量から宇宙膨張の加速度を計算しているわけです。

まず一つの観測量は天体の見かけの明るさです。これは天体の距離を与える。遠くの天体までの距離を測るにはどうするかというと、遠くにあるものは暗く近くにあるものは明るい、こういう非常に簡単な考えに基づいています。天体の見かけの明るさによって、その天体までの距離を決めているのです。もともとの天体の光度が天体ごとに違っていると、こういう考えができないので、同じ光度の天体をセレクトして使います。それが先ほどの super nova type Ia なのです。

次に赤方偏移。これは、この宇宙において、同じ原子は同じ振動数の光を出すという仮定に基づいています。

宇宙膨張の加速度を求めるには、宇宙モデルを仮定します。天体の距離と赤方偏移、この観測量を理論的な宇宙モデルから得られる結論と比較して、加速しているかどうかを決めるわけです。ここで用いている宇宙モデルというのは、先ほどの一様等方 Friedmann モデルです。観測と宇宙モデルを全部認めると、宇宙は加速膨張しているということになりますが、宇宙膨張の加速度という

のは、非常に間接的なものなのです。

先ほど、宇宙論には観測的な事実があるので、素粒子論よりはちょっといい面があると申しましたが、宇宙の観測量にはいろいろな要素が混ざっていて、実験室の実験のように、理想的な状況を人間が手で設定することはできません。ですから、宇宙論には観測はあるのだけれど、観測量を慎重に捉えないといけないのです。素朴に捉えたものが、そのまま事実かどうかは非常に疑問です。

例えば、今、大阪市大では、宇宙モデルに関していろいろな可能性を考えています。理論研の富田さんの研究の血筋を引いているわけですが、実際の宇宙は非一様なのです。目で見える宇宙の姿は確実に非一様です。重力的な source として、宇宙が非一様かどうかはまだ研究の余地があると思うのですが、もし重力的に非一様だとすると、天体の観測は、遠くのほうからやってくる光を見るわけですから、非一様な宇宙の中を通ってくる光で天体の見かけの明るさというものを考えないといけないはず。宇宙の非一様性を考えたとき、天体の見かけの明るさと赤方偏移の観測が加速膨張を意味するか。そういうことを、今、大阪市大のメンバーで研究しています。

[Slide 28] 以上のように、大阪市大で、今、取り組んでいる研究例をお話ししてきました。最後にかっこいい言葉でまとめたかったのですが、なかなかいい言葉が思い浮かびません。まず、宇宙というのは物理法則が実現する場であって、宇宙の研究そのもので fundamental な物理法則を見出すということは、なかなかできないと思います。今までやってきた宇宙論の研究の一つの典型は、素粒子論などで第1原理が提案されると、それを宇宙の現象に適用する。そこでどういう面白い現象が起こるかということの研究する、そういうスタイルがとられてきました。

しかしながら、ここで言う宇宙で起こる現象というのは、その現象を、すぐに観測量と比較することができるものとは限らないのです。我々は宇宙を物理的に研究するのですから、原理的には最終的に観測量だとか実験でその真偽を確かめることができるものを研究しないといけないと思うのですが、それがすぐにできるかどうかはわからない。それで、現象なんですけれども、定量的に現実と比較できるわけじゃないので、定性的な現象論。もしくは、実際に現象が存在しているところから研究を始めるのではなくて、第1原理から出発して、どのような現象が起こるのかということの研究するので、原理的現象論。

これは良い例かどうかわかりませんが、Hawking 輻射というのは、一般相対論の上に曲がった時空の場の量子論を適用して出てくる結果ですが、Hawking 輻射を実際に観測することは、定量的には不可能です。けれども、光すら吸い込んでしまう天体が輻射を出す。定性的な現象としては、非常に興味深い。そしてこの現象は、ユニタリー性のような基本法則がもつ性質にフィードバックをかける可能性がある。そういうところが面白いわけです。

我々が目指したいのは、すぐに観測できるかどうかはわからないけれども、定性的に面白い現象を探る。病的なものか本当に面白いものか。そういうことを、もともとの基本法則にフィードバックする。そういうことができるような面白い現象を探る。そういうことを目的に掲げて、研究しています。それはやっぱり、お伽噺の部類の入るのかなと... これで終わります。

佐々木：どうもありがとうございました。それでは質問なりコメントを。

中西：先ほどの extra dimension は、実験的に僕はマクロなスケールではあり得ないということ証明できていると思うのですが、余談になりますけれども、ずっと前に素人の方から質問がありまして、「ブラックホールというのは、すべての作用が出られないのに、なんで重力だけ感じられるのか」という質問がありまして、それは非常に大事なことなのです。重力とか電磁力とかクーロン力ですか、クーロン力とニュートン力だけはブラックホールから逃れるのです。これはどうしてかというのは、量子論的に考えると、出ている作用量子がゼロノルムなのです。だからこれは、ブラックホールですら閉じ込められないのです。実際、実験的にも簡単なプロジェクトでやっていて2次元、横波フォトンが束縛されている系

でも、クーロン力はやっぱり $1/r$ potential なのです。これでやらないと、実験が合わないわけです。

だからそのクーロンの $1/r$ potential というのは、単なる D ブレーンを、先ほどのブラックホールがどうなったって、知っているわけです。これは閉じ込められないのです。だからそういうクーロンを、D ブレーンの上に乗っけるといえるのは、実験的に否定されているかと思っっているのですけれども、いかがでしょうか。

石原 : いまのは Randall-Sundrum の D ブレーンモデルのことに、言われているのでしょうか。

中西 : いやいや、一般的に。

石原 : 一般的に、スカラーモードとか、そういうものが閉じ込められないというのは、そうだと思いますが、その距離依存性がどうなっているかが、今の問題です。今の問題は、閉じ込めてはいないのだけれども、その距離依存性が 5 次元から推測される $1/r^3$ なのか、4 次元から推測される $1/r^2$ なのか、実はその問題とする距離によって違うのですけれども、いま観測できる距離においては、effective に $1/r^2$ になるということが、理論的に示せるということで、スカラーモードを閉じ込めるといえることとは、ちょっと違います。

中西 : ブレーンの中に閉じ込めてしまわないと、クーロンポテンシャルになりませんよね。

石原 : 5 次元の重力場をモード分解するのですけれども、あるモードがブレーン上では一番 effective になるというモデルなのです。

中西 : それはだから、異方的になるわけですね。

石原 : 異方的になりますね。

中西 : それはちょっとおかしい。そういうことは無理なことですよ。

石原 : そうですか。

不明 : 実際に、実験的にできるわけですよ、現実に。2 次元 quantum hall effect の場合は。

佐々木 : ひょっとしたらこれは、先ほどの藤井さんにコメントしていただいたほうが、いいんじゃないですか。

藤井 : それはちょっと。

佐々木 : 違いますか。距離依存性の問題だと思いますが。

藤井 : 僕は、そんな深いことは知りません。測れることを言っている。本当に測れないものであれば、これはまた別なのですけれどもね。僕はそれを、石原さんに聞きたいですね。石原さんはやっぱり測れると。実際にその意味があると。

石原 : ええ、意味があると。

藤井 : ちょっと僕はよくわかりませんね。それから、僕から石原さんに聞きたいんですけど、益川さんの言ったことで、確固たる論拠があったら、もっといろいろなことができるって言うんだけど、例えばハッブルの法則で、ハッブルさんは、確固とした論理を本当に持っていたのかなという。間違った論拠を持っていたんですよ、どうやら。

石原 : そうですね、いまおっしゃったハッブルの法則というのは、宇宙膨張の決め手になる有名な観測で、天体の赤方偏移から得られる後退速度と距離の比例関係です。ハッブルの時代のデータというのが、今、いろいろなホームページで見ることができて、それと現代的な観測のデータを比べてみると、ハッブルがああデータで後退速度と距離が比例関係にあると断言するのは、とても勇気のいることだと思うんですね。理論家から見ても、とても勇気のいることだと思いますね。

藤井 : しかもハッブルが、論拠と自分で思っていたのと、いまのとは違うんでしょう。理論的な解釈が違うわけだから。

石原 : 解釈は違うかもしれませんがね。

藤井 : だからなかなか、一筋縄ではいかないというのもあるんじゃないですかって言っているですね。

中野 : 高次元中で重力波が伝わる時は、何がどう伝わっているんですか。それと、あれは光速より速く伝わる場合があれば、それを実験で調べられたらという話をされたんですけど、状況によっては、遅く伝わる場合もあるんですか。遅く伝わるときのほうが、実験では見つけやすいような気がします。

石原 : まず、今、5次元の Einstein 理論から出発していますが、重力波とっているのは5次元の Einstein 理論の線形化で出てくる普通の重力波で、ブレーンのあるところだけではなくて、5次元時空全体を普通の波として伝わります。ただし、ブレーンというのは、そこにエネルギーとかモーメンタムがあり、背景時空が折れ曲がっているので、重力波にとっては、ある境界条件が与えられることになります。

もう一つ重要なのは、このブレーンが5次元時空の中で曲がっているということなのです。5次元のなかで、もしブレーンが平板であるならば、この平板のブレーンに沿って伝わる重力波は、ブレーンの中を伝わる光と同じです。

ところがブレーンが凹にへこんでいるとすると、重力波はべつにこの曲がったブレーンに沿って伝わる必要はないわけですね。一旦ブレーンを出て、5次元を伝播し、またブレーンに到達するという可能性があります。

これを計算するのですけれども、もしこのブレーンが凹に曲がっていれば、重力波のほうが、このブレーンに沿った光の速さよりも、速さという言い方が正しいかわかりませんが、因果的に早く到達することができます。速いか遅いかは、ブレーンが凸に曲がっているか凹に曲がっているか、そういうことで決定されます。

ところで、ブレーンの中に普通の物質、エネルギーが正であるとか、圧力も大きな負ではないとか、そういう普通の物質があるときには、このブレーンは凹に曲がっているということが、5次元の Einstein 理論から帰結されます。故に、重力波は光より速く到達するという結論になるという理屈です。

藤井 : 重力波ね、出て行くやつも、普通に考えると、ちょっと違ってもいいはずなのです。バイナリー・パルサーからの観測から、 G が時間とともに変化している、Dirac という問題ね。それについて、そういうことになっていないという話があるでしょう。あんなことと何か関係があり得ますか。

石原 : それはすぐに即答できないのですけれども、一つ言えるのは、いま私が申したことは、定量的にはブレーンがどれぐらい、きゅっと高次元のなかで曲がっているかということに依存します。もしこの宇宙の現在の平均的な密度でブレーンが曲がっているとすると、いま私が言っている効果はものすごく小さくて、問題にならない量です。ところがこの宇宙が非常に高密度である状況、宇宙の初期とか、もしくは物質の詰まった天体の中を考えると、その中を伝わっている重力波に関しては、これはきゅっとブレーンが曲がっているところを伝わっているとみなすことができるので、そこでは重力波の伝達に差が出てくる可能性があります。

藤井 : それはだから、今度は見つけるのが難しいね。

坂東 : 先ほど、「確固たる根拠」というのを、実験事実みたいに言われたのですけれども、それは違うと思うんですよね。というのは、素粒子論なんかを見ているとわかるけれども、やっぱり理論的な整合性が一つの武器になっていると思うんです。どう考えても、こうあるべきだということで、プレディクションして、それがあとで見つかったということがいっぱいあります。そのとき、やっぱり確固たる根拠というか、そういうものがあつたんだと思います。

もちろんそれも実験事実に基づいてなのですけども、その、あるかないかとか、そういうこととは違う次元の、確固たる根拠、それがやっぱり、物理学の一番面白いところだと思うので。いま、宇宙の実験はいっぱいあると思うんですけど、実験事実だけ見ていたら、表も低くなることある。素粒子も実験がいっぱいあった時代があって、それに目がくらんで、本当のものを見分けられなかったという時代もあるので、注意されたほうがいいんじゃないかと思います。実はこれ私自身の反省でもあります...

石原:確かに私も、個人的には今、坂東さんがおっしゃったことが、そのとおりだと思います。そのときに、理論的な確固たるものというのは、例えばさっきのハッブルの例がありましたように、研究者個人の感覚というか、個人の価値判断なのか、あるいはこういうコミュニティの共通した価値判断になっているのか。

坂東:そうとばかりではないと思います。ちょっと違うでしょうね。例えば膨張宇宙だってそもそも、やっぱりオルバースのパラドックスとか、いろいろとあって、やっぱりどう考えても、閉じているのも困るし、定常宇宙だったら困るというのがあったんだと思うんです。そういう事実を、やっぱり突き詰めていって、どうあったらいいかという方向をつきつめるというのは、新しい考え方だと思うし、だから例えばインフレーション宇宙でもそうですよね。あんな話が本当にできるのかと、昔は思っていましたけれども、それでもやっぱり、そのときにはいろいろな原理的な矛盾、それをやっぱり、flatnessとかそういう矛盾を、どうあったらこれは解決できるかということで考えたことで、実験事実には基づいているけれども、ちょっといわゆるその実験とは違うような気がするんです。

それからもう一個。重力というのは、stringで考えても、輪っかになっていて、ブレーンの上にへばりついていないわけですよ。ですから中西先生が言われたみたいに、もっとほかの次元のところに飛び出すことが一番できやすいのが、重力だと思うんです。ですので、たとえ我々のすんでいるbraneでない余次元にひろがっているbraneがそのすぐそばにあっても、やっぱりわれわれ、そのbraneの存在を重力でしか感じないようなものが、いっぱいあるかもしれないわけですよ。

石原:そうですね。

坂東:私は先ほど気になったんですけど、物質は、ブレーンの上にあるって言われたんですが、私は反対やと思ってまして、物質が局在しているところがブレーンなんだと。物質って言うてもいけないけれども、もっと一般にエネルギー、そういうエネルギーが局在しているところこそ、次元が勘定できる場所なんだという時空観というか、そういう新しい見方でできなのではないでしょうか。アприオリに時空があって、そのなかにいろいろとブレーンができるんだというのではなくて、物質が局在しているところを、われわれは次元勘定することができるんだというふうに解釈したほうが、いいんじゃないかなと。

石原:ちょっと、いまおっしゃったところには、必ずしも同意できないのですけれども。

佐々木:これは非常に哲学的な話のようなので、やはりあとで、懇親会の際にでも、していただくのがいいのではないかと思うのですが。

石原:次元を勘定できるというのには、同意できないのですけれども、物質があるところが宇宙なんだというのは、同意できますね。

坂東:そこは一緒ですね。

佐々木:ほかにどなたか。

大久保:さっきの坂東さんの質問とも関係しているのですけれども、拠所が実験事実だというのは、実証科学としては大事だと思うんですが、私は原子核の理論研究をやっているんですけども、ただ非常に大きな困難にぶつかったときに、理論から見て実験がおかしいというような

場合もあるわけですね。しかもそういう実験事実がいくつもあるという場合も、あると思うのです。

やっぱり理論屋というのは、論理の整合性をと思うし、美しさというのも求めると思うのですが、そのときに、実験が正しいか理論が正しいかというのは、ものすごく難しいわけで、人の考え方とか価値観とか、いろいろとあると思うんですけれども、やはり局面にもよると思いますけれども、実験だけに頼るといえるのは、理論研究者としては、あまりよくないと思います。

石原：まったくそのとおりです。なんか私が実験に基づかないといけないと言ったのかしらと思ってしまうのですが、私個人としては、理論が研究をリードするということはもちろん重要だし、特に宇宙は、観測事実と呼ばれているものは、むしろとても慎重に考えなければいけないと思います。観測というのは非常に多様で、さっき坂東さんもおっしゃっていましたが、すべてを事実だと捉えると、それではあまり物理にならないと思うのです。そのなかのエッセンシャルなところをどう引き出してくるかというのが、物理のやり方で、そのなかに本質がある実験であるならば、そういうことができるし、そうでない実験もあるかもしれないし、それはとても難しい問題だと思います。むしろ、理論の整合性とか、今おっしゃったような美しさとか、そういうものがリードする局面ももちろんあって、個人的には、それは望ましいというか、理論家として、そういうことに立ち会いたいと思っています。

田中：坂東さんや大久保くんのおっしゃっていることは、もっともだと思うんですけれども、ただ論理的整合性というものは、論理的に演繹可能な、演繹されるものというよりは、そこに理論家の思い込みも割合入っているということ、よく考えなくちゃいけないかとは思いますが。

佐々木：みなさま、それぞれおっしゃるとおりなのですが、なかなか難しいですね。ほかにどなたか、コメントなり質問なり。よろしいでしょうか。そうしたら時間も過ぎましたので、午前中のセッションは、一応ここで終わらせていただきます。どうもありがとうございました。

坂東：先ほどから私の書いたメモが座長や講演者に回っておりまして、こんなのは書きすぎだという文句もいっぱいあるのですが、実際には講演でたくさん過激な意見が出てくるので、どうせ同じですのでコピーを下に用意します。特に大野先生にはだいぶ勝手なことを書くなて言われましたが、先ほど、どうせぼくは好きなこと言うてきて追い出されたんだから、僕は見ないから、勝手に書いてもよろしいということでしたので、メモにいっぱい間違いもありますが、参考になればと活性化するために用意しました。お話しがでた段階で、出させていただきます。