

Non-Newtonian gravity から加速宇宙へ

早稲田大学 藤井 保憲

佐々木：おはようございます。今日の午前中は、藤井さんと石原さんに、宇宙論分野といっても、主にこのタイトルを見ていただくとわかるように、重力とか相対論に関係したお話をさせていただくことになっております。

まず最初は、藤井さんに「From non-Newtonian gravity to accelerating universe」というタイトルで、ではよろしくをお願いします。

おはようございます。こういうタイトルで話をさせていただきます。内容はこのようなわけなんです。

yukawa, 17 Nov 06

From non-Newtonian gravity to accelerating Universe

Yasunori Fujii

1. Non-Newtonian gravity
2. Scalar-tensor theory (STT)
3. Brans-Dicke model
4. Lambda cosmology in STT

[Slide 1]

1. Non-Newtonian gravity

Scale invariance and its spontaneous breakdown
⇒ massless scalar (Nambu-Goldstone) field "dilaton"
C. Chiu, Y.F. & W. Wada, Lett. Nuovo. Cim. 1(71)110

Participates in gravity?

$$V_{eff}(r) = -G \frac{m_a m_b}{r} (1 + a e^{-\mu r}) \quad \begin{cases} a = O(1), \\ \mu^2 \sim G m^4 \sim \frac{m^4}{M_{Pl}^2} \sim (10^{-9} \text{eV})^2, \\ \lambda = \mu^{-1} \sim 100 \text{m} \end{cases}$$

intermediate (medium)-range force

Called for phenomenological searches for deviation from $\sim r^{-1}$, helped by S. Ueda, C. Tsuboi, J. Beams, ...

Y.F. Ann. Phys. (N.Y.) 69(72)494; Nature Phys. Sci. 224(71)5

Experiments: Upgraded Cavendish exp, natural and artificial environments of unconventional geometry, by W.-T. Ni, V. Panov, H. J. Peik, H. Hirakawa, K. Kuroda, D. Long, R. Newman, F. Stacey, P. Boynton, D. Eckhard, J. Faller, E. Adelberger, ...

Experimental gravity due to R. Dicke, L. Schiff, ...

[Slide 2]

[Slide 1] 実は私は、去年のこの会には来ていません。どういう雰囲気か、あまりよくわからなかったのですが、坂東さんがお書きになったレジュメを、来る直前になって、プリントアウトして見まして、新幹線の中でそれを読んできまして、ちょっと愕然といたしました。これは何か、少なくとも副題ぐらいつけなくちゃいけないだろうと思って、副題を考えました。いま、ここにちょっと、間違うといけないうので読みますが、こういうわけです。「既成の分野から、遠く離れた場所に迷い込んだ結果、何が見えるようになったか」というわけです。よろしいでしょうか。これでこれからの話を、予断を持っていただいてけっこうですから。

もう一つ言い訳なのですが、これからお話するのは、重力理論、cosmology というわけですが、そのなかのごく一部だけです。この分野のプロの方は、もっとほかのことをいっぱいやっておられるわけですが、その一部であっても、準備を始めた段階で、もっとほかの方々のことや、それを時間的にも並べて整理して、お話ししようと思ったのですが、それを書いていくと、時間の関係で、どうも自分のことを話す余裕がなくなりそうな気がしましたので、だんだんそれを削って行って、少し削りすぎた感じがいたします。

しかも昨日、亀淵さんと大貫さんの話をうかがいまして、これまたショックで、ううんというわけですね。ますます困ったのです。

それともう一つ、やはりノンエキスパートの方がたくさんいらっしゃるわけで、そういう方々に、できるだけ何か理解していただきたいと思うので、少し内容を変えました。それでここに書いたとおりにはいかないかもしれませんが、それはお許し願いたいと思います。それだけ、最初に言い訳をしておきます。

[Slide 2] これはほかのところに書いたりしたものを、借用したりしたので、英語になっていてすみません。最初は「Non-Newtonian gravity」というわけです。たいへん古い話で恐縮ですが、1970年の夏、私はアメリカのシカゴの近くの、Argonne National Lab というところにおりまして、そこでこういう論文を書いています。

この論文の著者の Charles Chiu というのは、中国人で、当時、Cal. Tech. におりまして、Regge Trajectory をやっていた人です。それから Walter Wada というのは、いわゆる日系三世で、日本語はほとんど話さない人ですが、当時、Ohio State University の教授だったと思います。この3人で、いろいろと趣味が一致したのは、素粒子で、ある程度はやっていた、ものすごくはやっていたわけではないのですけれども、scale invariance ということがあって、これは何か、素粒子の high energy limit みたいな、parton が流行っていた頃で、High energy limit みたいなものを書いたのです。

多分、ご存じでしょうが、scale transformation, あるいは dilatation と言っていましたが、それは4次元の座標を一斉にざあっと伸ばしたり縮めたりする、そういう変換なのです。素粒子が質量を持たないとすれば、そういう変換に対して不変である。だけど実際には、質量があるので、これは破れているわけです。そんなものは考えなくてもいいけれども、当時からいまに至る、素粒子の人の悪い癖で、いま存在しないものを、対称性があると考えて、それが破れているのが現実であるという、ひねくれた考え方をするわけです。

そもそもその破れ方に、spontaneous symmetry breaking というのは、非常に面白いというわけです。これには Nambu-Goldstone boson が必要なのです。massless の scalar なのです。それを当時から「dilaton」という名前がついていました。ただし、これは本当に massless かというと、例えば pion というのも、chiral invariance の Nambu-Goldstone boson なのですが、ある程度 mass がありますね。ですからこれも mass があってもいいと思うのですが、しかしそれにしても、何も候補が見つからないのです。

この Chiu さんは、Regge trajectory をいろいろとやっていたわけですが、trajectory には属するけれども、pole ではないというような、変な mechanism をいろいろと考えたりしていたのです。僕もそれはいいなというのは、物性的に。論文も書いたのですが、3人でいろいろと話し合っているうちに、これはハドロンについては現れなくてもいいかもしれないけれども、重力については現れる可能性が高い。それでなぜか、このあとの、夏が終わってみんな、それぞれ家に帰ったわけですが、この二人は僕に向かって、「日本へ帰ったら大学院の学生を雇って、重力のことをやらせるんだな」と言うのです。なぜ僕がそう言われるかは、そのときはわからなかったのですが、僕はヨーロッパを回って、この話をあちこちでしながら、帰って来たわけです。その途中で、やっぱりこれは学生にやらせるなんて、risky なことはできない。やっぱり自分で考えてみようと思うようになりまして、帰ったら早々に、ある種の非常に簡単な理論的モデルを考えました。

その結果、ここにあるような、こういうポテンシャルを考えました。第1項は、これはまさに Newton のポテンシャルです。それにこういう湯川 term が加わる、こういうもの、これを「Non-Newtonian gravity」と称しました。

この a という定数、これは relative な強さなのですから、これはだいたいオーダー1だと。単純なモデルではそうなる、特に最初に考えた、うんと簡単なモデルでは、 $\frac{1}{3}$ という値になったのです。なぜかという、これは理由があって、あとからわかりはしましたが、適当なことを考えたのです。

それから問題は、この dilaton の mass, μ ですね。それがいくつぐらいかと言うわけで、それについて、このようなことを考えました。

まず、これは当時から unification, gravity と microscopic physics を unify するという考えです

から、これは当然、 G に比例するだろうというのです。それから、 $\bar{m}$ と書いたのは、これは何か、particle physics の mass. ですから例えば、ハドロンだったら当時は α' 、いまだったら quark mass とか、supersymmetry の破れであるとか、そのあたりの mass を入れたらどうかというわけです。

この G は、Planck mass の square の反対ですから、これはちょっと書き換えると、いわゆるシーソーメカニズムのようにもなるわけです。そんなことも考えたりしまして、いずれにしろ、この μ の大きさは、こういうふうにしますと、だいたいのところ、 10^{-9}eV ぐらい、非常に軽いのです。しかもこれの逆数を取ると、これがこいつの force range になるわけですが、だいたい 100 メートルと出ます。

もちろんこのやり方からわかるように、uncertainty がいっぱいあるので、この答えが数桁ぐらい、どっちに変わってもいいわというふうに思っていたわけです。いずれにしてもこれは、macroscopic な distance でありまして、こういう種類の unification に関係したような context で、こういうわりと身近な range が出てくるというのは、ちょっとした驚きでありました。

これは誰も多分、そういう意味で認識した人はないみたいだから、どうしようかと思ったのです。このまま放っておくのは、正直言ってもったいないと思ったのです。ただし、これはもうちょっと踏み込むと、さっき、副題のところで言いましたように、わけのわからない領域に踏み込んで、困ることになるかもしれない。だけれども、それはいい。やってみよう。あとで決して後悔はしないと決心したというわけです。それが当時の自分の心境を、いまになって自己分析してみると、そういうことになるのではないかというわけです。

それから昨日は、亀淵さんと大貫さんの話をうかがいまして、これまたショックで、こういうことを語る会であったかと。そういうところで話をするのは、たいへん気が引けると思わざるを得ませんでした。もちろん私も、こういう大先輩に関して、尊敬と憧憬を抱くという点では、人後に落ちないつもりですけれども、同時にある種、反発を感じるのです。これは私の、子どもの頃からの悪い癖なのです。そういうわけでいま、僕は自己分析と言いましたけれども、これはどう考えても、ある種、場当たりのとか、ゲリラ的とか、まことにみつともないことであります。

でも、仕方がないから居直ることにしまして、こういう人間もいてもいいだろうと居直って、しばらく話を聴いていただきたいと思うわけです。

本題に戻りまして、Newtonian potential というものの歴史は、非常に古いわけです。300 年もあるかもしれません。いろいろなことが調べられていて、いまさらここに何か、modification するなんて、畏れ多いことは多分、できないだろうとちょっとは思いましたが、少し考えてみるとそうでもない、かなり調べられていないこともあるのだということにも、気がつきました。

それで、こういう macroscopic なものが出る、重力の macroscopic な影響という、まず地球物理というものが考えられます。それで僕は、地球物理の方にコンサルタントになってもらおうと思いついて、偶然知っていた上田誠也さんという人、この方は当時、東大の地震研でプレートテクトニクスか何かをやっていたと思います。その人のところへ行ったら、こういう場があると考えたけど、どうかねといろいろと言ったら、いろいろなことを言ってくれました。そしてその上田さんの師匠であった、坪井忠二先生ですね、「ツボチュウ」と言っていましたけれども、ツボチュウ先生、このときにはもう東大を退官していましたが、彼が持っていたオフィスへ、上田さんに行って、いろいろな話をしました。大変面白かった記憶があります。

ちょっとここに書いておきますが、この程度のこと、これは僕がつけた名前じゃないのですが、ほかの人が intermediate range だとか、medium range だとか、そういうふうに言っていることもありました。

こういう $\frac{1}{r}$ からのずれというのが、いままでに Cavendish の実験で、search されたことがあるかどうか、これもまったくわからなかったのです。それについては、J.Beams という人に手紙を出し

ました。書く手が震えましたね。この J.Beams を知ったのは、この数カ月前に『Physics Today』の表紙に顔が出ていて、この実験をやっている、真ん丸の球の写真が出ていたのです。それで彼に手紙を書いて、こういうことを考えたんだけどどうかねって言ったら、力の $\frac{1}{r^2}$ からのずれなんて、考えたこともないと言うのです。彼の関心は、もっぱら G の値をできるだけ精密に測る、当時はおそらく、二桁も精度がありませんでした。いまでも続けられていますが、そういうことだというわけで、これは言ってもいいのだろうと思いました。

それで書いたのが、この Ann. Phys. とか、『Nature』に書いた論文なのです。ある程度は、こういう用心深さは持っていたつもりなのですが、こういうことを書いたのです。

そこでは、理論のことも少し書きましたが、主に現象論的なことで、どういうことをやったら、こういう力があるかないか、試せるかということで、当然ですが、Upgraded Cavendish experiments.

それからこの次に書いてあるのは、自然の環境でもいいし、人間の関係でも、とにかく普通の geometry じゃない、例えばものすごく高い塔で、重力をどんどん測っていく、それから地下へ潜ってもいいです、穴を掘ってずっと調べる。それから大きい貯水池の周辺で、重力が非常に、どれぐらい精密かって、僕はまったく知りませんでしたが、当時から重力系というのは、ものすごく精密で、いろいろな工夫があったのです。それは驚きました。水位が変わるごとに、重力がどう変わるかということから、原理的にはこういう、ある程度 intermediate range なことがわかるはずなのです。そういうことをいろいろと提案したわけです。

そうしたら、例えばそのことは、かなりの人が興味を持ってくれたらしくて、例えば『Physics Today』の 1972 年の 1 月号ですか、僕が頼みもしないのに、ある囲み記事が出たのです。こういうことを言っている馬鹿なやつがいるけど、試してみてもどうかということがありました。

それで、いろいろな人に、僕は実験のことは自分ではできないので、いろいろな人に頼んだり、いろいろとしたわけです。身近なところでは、東大にいた平川さん、平川さんは当時、かに星雲から重力波がやってくる、そいつを捉えようというので、レゾナンス型アンテナという、独特のものをこしらえて、いろいろとやっていたらっしゃったのですが、僕が行って話しまして、平川さんは、じゃあその装置をそのまま転用して、これぐらいの length で、 $\frac{1}{r}$ からのずれがあるかどうかを試してみようということでは何か初めてくださいました。

それで、この平川さんのグループの若い方、いまや年寄りですけども、黒田さんとか三尾さんとか、いろいろな方と親しくなるチャンスもあったわけです。

それから、平川さんは、ほかの方も紹介してくださいました。例えばここに書いてあります、H.J.Peik というのは韓国人で、当時、Stanford で学位を取ったところだったと思います。Maryland に職を得て、まもなくだったような気がしますが、その人が韓国に帰って、それからまたアメリカへ戻っていくという途中に、東京に寄りまして、平川さんのところでセミナーをする、平川さんが、この Peik も Non-Newtonian gravity には興味があるらしいから、会わせてやろうと言って、セミナーに呼んでくださいました。ところが何かの都合で、僕は少し遅れたのです。で、僕が行ったらもう、Peik の話が始まっていたのですけれども、しばらく聴いていたら、Non-Newtonian gravity の話を始めて、彼がずっと見渡して、「Is Mr.Fujii present?」と言っているのです、はいいますよとか言うわけで、いろいろな話を始めたわけです。

それに類する記憶としては、ずいぶん昔のことですけども、R.Newman という人は、University of California の Irvine に、いまでもいますけれども、この人とどこかでちよつと会ったときに、こんなふうに言いました。「You finally convinced me that」なんかかんとか。つまりおまえさんの論文をちよつと見たら、怪しいと思ったけど、読んでみると、これはやっぱり試してみないといけないんだということがわかったから、これからこういう実験をするよということを話してくれたのです。

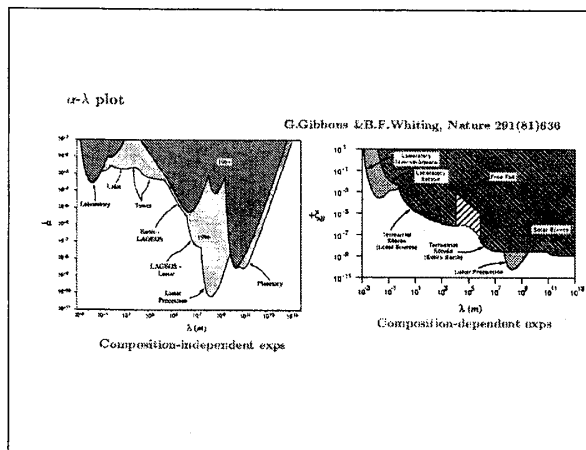
そのほかにも、たくさんの人にお世話になっているというか、僕は直接会って話した人も、会ったこともない人もいっぱいいます。こういう人がたくさんいるので、ここに書けるわけではないのですが、一応、このように「」というのがあります。憎たらしい人もたくさんいました。

それから、例えばここでちょっと言っておきたいのが、僕は数年前、1964年から66年にかけて、Stanfordにしばらくおりました。そのときのボスが、このL.Schiffで、多分、量子力学の教科書を書いたことで、みなさんもお存じだと思いますが、この人は当時から、素粒子やら物性やら、原子核や、いろいろなことをやっていました。特に当時は、Experimental gravity というものを始めるために、いろいろと努力をしていました。R.Dickeとか、L.Schiffとか、何でもいいのですけれども、要するにEinsteinがやった実験的なこと、光の曲がりとか、いろいろとありましたね、そういうものをもっと現代的な、実験物理の路線に乗せてやろうということです。これはずっと、いまでも続いているわけです。

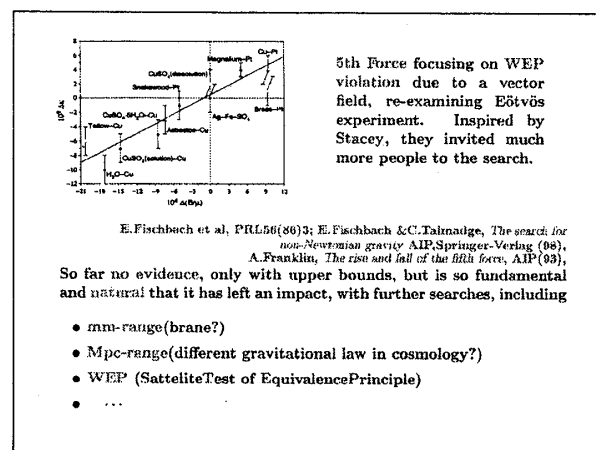
僕がいた当時は、僕は重力のことをほとんど知らなかったですし、Schiffがそういうことをやっているということは、もちろん知っていましたが、たいして関心を持たなかったのですが、こういうことを始めるようになって、やっぱりこのExperimental gravityのなかに入れてほしいなと思って、当時、Eメールはありませんでしたから、手紙を書きました。

そうしたら、しばらくしたら返事がきたのですが、秘書からでした。その秘書からの手紙には、Schiffは亡くなったと。多分これもよく覚えていないのですが、数日前だか数週間前だったか忘れましたが、わりと最近亡くなったのです。思い出してみると、Schiffはあの当時、40代だったと思いますけれども、健康に留意してまして、毎週何日間か、泳いでいましたが、水泳中にHeart Attackに見舞われて、亡くなったということで、たいへんショックであった記憶があります。

そんなことがありまして、いろいろな人がいろいろとやってみたのですが、なかなかEvidenceというものになかったわけです。



[Slide 3]



[Slide 4]

[Slide 3] そのうちに、こんな論文が現れました。G.GibbonsとB.F.Whitingという人が書いた論文で、Gibbonsという方は、のちにHawkingと共同の仕事をしている、あのHawking-Gibbonsですね。この人が $\alpha-\lambda$ プロットを提案しました、ここに α とか λ とか書きました。それから μ 、あるいは逆数が λ ですね、これは2次元の、二つのパラメータを持っているわけですから、そいつをこういうプロットの中を書くわけです。

ちょっと解説します。例えばここにこんなカーブがあります。それからここに「Composition-independent expts」「Composition-dependent expts」と書いてある、これは $\frac{1}{r}$ からのずれを検出する方法、これはweak equivalenceからのずれを検出する方法で、ちょっと別になっています。このことはあとで説明しますが、例えばこれを見ますと、このカーブの下は、 10^{-2} メートルですから、

だいたい1センチメートル、これは何を意味するかと言いますと、例えば1センチメートルのところで仮に何かの実験をしたとします。そうするとそれは、ここで言いましたこの、湯川フォームですが、 λ がちょうど10センチぐらいのところを detect するのに一番センシティブティが高い、そこからずれますと、短いほうでも大きいほうでも、センシティブティが落ちるというわけです。もし何も観測されなかったら、結局、こういうかたちの、strength に対する Upper bound が出るというわけで、それがずんずんというふうになるのです。

これ以後、ほとんど、ありとあらゆる現象論的な研究、実験的な研究は、こういう絵の中に書かれるようになったのです。これはいまや、Gibbons と Whiting が初めにこういうことを考え出したということを誰も知らない。だけどこういう絵をみんな描きます。で、最初、Gibbons から、何かこういうものを描いたよといってもらったときに、ふーんと思っただけでしたけれども、みんなが使うようになって、どうしてこれを自分で発明しなかったのかと悔やんだのです。

一つは、亀淵さんはちょうどいらっしやらないのですけれども、名古屋大学で大学院生になったときに論文をいろいろと読む、そういうときに付き合ってくださいったなかに、亀淵先生もいらっしやったわけですね。亀淵さんがあるとき、Dalitz の論文をみんなで読みましよう。いわゆる Dalitz plot という、みなさんご存じかどうか、charged K meson が3個の π に decay するのです。それをたくさんの実験データで表すのに、正三角形を描いて、その中に点を打つ。そこから辺に、いまは絵がありませんが、垂線をおろす。その垂線の長さの和は一定ですよ。それはエネルギーを保存して、K meson になっていることを表す、非常に便利なのです。

現象論というのは、こうあるべきだというような、僕は正確に覚えていませんけれども、亀淵先生がおっしゃって、そのことは僕はずっと、なにか頭のなかにあって、Gibbons がこういうものを描いたときに、やっぱりこういうのを図に表すことは、必要なんだな。さっきも言いましたけど、どうして自分で考え出さなかったかというふうに思った記憶があります。

いずれにしろ、evidence はありませんで、どちらにもこういうものなのです。

そうこうしているうちに、Fischbach という人が、突如 5th Force というものを出して、世間を騒がせました。「5th Force」という名前は、新聞社がつけたものだそうですけれども、物理学者のなかには「5th Farce」だと、「o」じゃなくて「a」なのです。おわかりかどうか、「馬鹿話」というぐらいの意味でしょうね。という悪口を言った人もいましたけれども、この人は、やはり、これはグループなのですけれども、前に私が言いました、この [Slide 2], intermediate range, medium range か、それぐらいのものがある、彼はスカラー粒子じゃなくて、ある種のベクトル粒子を考えて、それがハイパーチャージだかバリオンナンバーかなんかで couple するというような彼の理論があったのです。

[Slide 4] それはいいのですが、彼が特に人を驚かせたのは、ここにある、前世紀の初めにおこなわれた有名な、Eötvös の実験なのです。Eötvös はご存じのように、いろいろな物質のペアを、彼の非常に、当時としては精密な、トーションバランスに対してどれぐらい回転するか、それがいわゆる、当時は単に equivalence principle です、等価原理の検証になるかどうかということ、ずっとやったのです。Einstein はそれを利用して、一種の踏み台にして、一般相対論をつくったといわれています。

そのもとの論文の結論というのは、ここに縦棒で書いてある、こういうもの、そのなかには Tallow と Cu、この「Tallow」というのは何だかよくわからない、何かある種の樹脂、クジラの油だか知りませんが、そんなものでできたいろいろなもの、アスベストもありますね、試しています。

Eötvös たちが得たのは、この縦棒の集合でありまして、これは全体としてはプラスもあるし、マイナスもあるし、ですから全体としては、等価原理が成り立っているということを証明したことになるのですが、Fischbach たちがやったのは、自分たちの理論に合わせてやると、それぞれ

の物質のペアに、Baryon number が含まれている割合が違う、だから何か、ものが同じ加速で落ちないということになるわけです。そういうものの理論的な、予言というものを書いたのは、この直線です。それとよく合うじゃないですかって言ったのです。これを見ると、Eötvös は equivalence principle が破れていると、そういうことを発見したという、ちょっと聴くとみんな、驚くようなことを言ったわけです。

それで、いろいろな人たちが、こんな実験だったら俺でもできるという人が、いっぱい現れたのです。それでそれなりに、いろいろと工夫を凝らして、精密実験をやったのですが、実はこの理論的な予言というものが、実は間違っていたのです。それがありましたし、それから Eötvös の実験というものを、ブタペストの大学の地下室でおこなわれたのです。ところがその地下室の周りには、当時としてはおそらく知るよしもなかった、変な mass distribution, unknown なものがいっぱいあった。要するにエラーバーがこんなに短くはなかったということなのです。

それからもちろん、いろいろな人が集まって、よってたかってこの種の実験、あるいは前に言ったこんなものをやり直してみたのです。

結局、数年にして、このアイディアは、この範囲のアイディアは潰れたわけです。そのことを詳しく書いた本があって、A. Franklin って、これは 1993 年に出ています。『The rise and fall of the 5th Force』という意地の悪い本ですが、これはなかなか面白い本なので、できたら読んでいただきたいと思います。この本の主旨は、仮定はともかく、非常に物理について健全な実験がおこなわれて、正当な判断ができるようになった、非常にいい例だということなのです。

Fischbach 自身も、のちに本を書きました。その本には 5th Force は何であるかという定義も書いてあるのですが、表題は『The search for Non-Newtonian gravity』。『The search for the 5th Force』ではなくて、これ [Slide 2] になっていまして、この Non-Newtonian gravity というのは、僕がここに書いてある、『Nature』に書いた、僕がつくった言葉なのですが、それが表題になっているのです。

いずれにしても、いままでだと、この evidence はありません。ですからこれは失敗だというわけですが、とにかく、最初提案した理由は非常に fundamental というところもあるし、自然でもあるから、それからある意味で、いろいろな人が実験をするのにもものすごく難しいわけでもない、ものすごくやさしくもない、うっかりするとすぐにエラーをしてしまうようなところがあって、実験家たちが面白いと思ったのでしょう、それでいろいろとやって、ある意味でインパクトがあったのだと思います。それで、いまでもいろいろと。

僕自身は、前も言ったこの [Slide 3], Upper bound の少し下にあると、これが見つかるのだと思う、なぜ strength があまり小さくなくて小さいか、それにも理由があるのです。そういうこともありますので、まだ僕は、ちょっと待っているわけですが、ほかの range でもいろいろなことを調べられたのです。例えば millimeter-range でこれを調べる、これは特に University of Washington の人たちが、非常に一所懸命やっているわけですが、これは昨日のお話ではないですが、宇宙論やなんかをやる人たちの意味のブレーンというイメージでしょうが、そういうものに、これはある程度、役立っています。

それからもっと、長い Mpc-range ということで、調べている試みがいくつもあります。これはうんと長いところで、重力の法則が変わるかもしれないという期待を込めている。

それからこの weak equivalence principle は、ちょっと説明いたします。WEP と書きますけれども、いまではこれを weak equivalence principle と、「weak」という字がついているということは、「strong」というものもあるということなのですが、weak は何かというと、昔ながらの等価原理で、ガリレオの斜塔のように、ものが同じ加速度で落ちるかを調べるわけです。Strong はもうちょっと違って、それはみんなが混乱するので申しませんが、いまではこれは weak equivalence principle

と言っています。

それからさっき言った Piek が中心になって、Sattelite Test of equivalence principle という STEP という計画、ヨーロッパで宇宙に持って行って、何かをつくってやると。これがどうなっているのか、実は僕は知らないのですが、いろいろなところでおこなわれています。こういうものがいろいろとあります。ですから、まだある種、このほうが続いていくというわけです。

こういう現象論的なことのほかに、私は最初からちょっと疑問に思っていた点があつて、それを次に申します。

2. Scalar-tensor theory (STT) Can the gravitational scalar field massive? Yes, in STT J.O'Hanlon, PRL29(72)137; R.Acharia & P.A.Hogan, Lett.N.C.6(73)668; V.Wagoner, PRD1(70)3209; (E.Pechlaner & R.Sexl, in higher-derivative theory, Comm.Math.Phys. 2(68)105) Since then I have been obsessed with STT P.Jordan, <i>Schwerkraft u Weltall</i>, Friedrich Vieweg u Sohn (55); C.Brans & R.Dicke, PR124(61)925 coming to the book Y.F. & K.Maeda, <i>The scalar-tensor theory of gravitation</i>, Cambridge U Press (93) Thanks due to H.Nariai, R.Utiyama, J.Niedra, T.Nishioka, F.Hehl, T.Saito, S.Kitakado, M.Morikawa, T.Ikegami, Y.M.Cho, C.Wetterlich, T.Yoneya, A.Tomimatsu, T.Damour	Despite one of the best studied alternatives to GR, many important features have been left poorly understood in connection with • WEP violation • Constraints from solar-system expts • Conformal transformation and possible variability of constants Accelerating Universe will be the area in which STT lives a new life
--	---

[Slide 5]

[Slide 6]

[Slide 5] さっき Non-Newtonian potential と言って、dilaton の exchange するほうは、有限な force range であると言いましたが、もし重力であるならば、これは何か、もっと深い理由があつて、force range は無限大しかあり得ないということもあるんじゃないかと思つて、ちょっと気になっていたのです。どうやって調べたらいいか、よくわからなかったのですが、それに対して、それはいいんだよということを書いてくれたのが、この O'Hanlon だとか Acharia だとか Hogan、これは当時、ダブリンにいた人たちです。

そのときに、いいという答えの根拠になったのが、scalar-tensor theory というやつです。scalar-tensor theory というのは何かといいますと、簡単に、まったくご存じない方もいらっしゃると思いますが、普通の一般相対論は、テンソルの metric が重力場だというわけなのですが、そのほかにスカラー場というものがある。両方混在しているというところがミソなのですが、最初に言い出したのは、量子力学で有名な Jordan です。Jordan というのは、非常に論文をたくさん書いた人で、僕はあまりよくわかりませんが、いまで言う Witten とか、そういう人のようだが、よくわかりません、ものすごくたくさんの論文を書いています。この人が最初に、1955 年頃、そういうことを言い出したのです。その数年あとに、Brans と Dicke という人が現れて、世の中では Brans-Dicke 理論とも通っていますが、Jordan は多少怒ったみたいです。

この一つのモチベーションは、これまた 1930 年代ですが、Dirac が G というものは、決してコンスタントじゃなくて、時間とともに変わっていると言いました。それが consistent な理論である、そういう理論をつくりたいという一つの、明らかに目的があつた。Jordan はそうなのです。Dicke も何か、いろいろな理由を並べて、同じようなことを考えていたわけです。

これ以来、重力の世界では、一般相対論に対する alternative に、純粋な一般相対論ではない、代替品の代表として、非常によく調べられた理論だということになっていると思います。

僕はそのことで、初めて scalar-tensor 理論というものを知ったのですが、これ以来、非常にこれに心酔するようになってしまったのです。

実はあとで見ますと、1970 年には、この V.Wagoner がつて、下のほうに書いてある人ですが、こ

の人が一般論を書いて、スカラー場が mass を持ってもいいということを、やっぱりちゃんと言っていますし、それから Pechlaner, Sexl, これはウィーンで有名な先生で、亡くなってしまいましたが、この人がまったく別の理由で、scalar-tensor 理論じゃなくて、higher order derivative の理論で、やっぱり、さっき僕が言ったような Non-Newtonian gravity を出しています。この人はしかも、force range が macroscopic な場合も、何か検討しているのです。けども、そういう macroscopic な force range, こういうような [Slide 2] 何か意味を持っているかもしれないということは、Sexl 先生は考え及ばなかったようで、ですからここで僕は、なんとしてでもこれを捨てるのはもったいないと思っているのは、それなりの理由があったと思います。ですから言うならば、この式と、それからこの estimate を組み合わせて、ある種の特許みたいなものだと思っていますけれども、こういうものです。

scalar-tensor 理論に、僕は凝りまして、いろいろと調べて、ごく最近になって、前田さんと一緒に、こういう本を書いていますので、ここに持ってまいりましたが、この本の欠陥は、非常に高いことでありまして、イギリスの値段を、そのまま日本円にすると 1 万円を超えるのです。で、たいへん残念なんですけれども、まもなく paperback で出まして、半額以下になりますので、そのときはぜひ買っていただきたいと思います。これから言いますのは、この本に書いてあることなんですけれども、少し述べたいと思います。

そういう理論のことについては、いろいろな方に、これもまたお世話になっています。内山先生にも非常にお世話になりました。内山先生というのは、これについて、最初は例によって、非常に cynical なことをおっしゃいました。ちょっと思い出しますのは、内山先生はその当時、素粒子では、一般相対論などというのはずっと古い骨董品みたいなもので、そういうことを、秀才がやるべきことじゃない。したがって内山さんは、自分は素粒子論の秀才として認めてもらいたいから、一般相対論の勉強は隠れてやっているとおっしゃっていました。これが一つの、もしご存じない方があったら、お伝えしておきたいと思います。

それから、こういうことがありましたので、内山先生が創設された general relativity の会、GR7 というのは、1974 年にテルアビブでありました。それに僕も行ったのですけれども、そのときに、旅行中だったこともあるのかもしれませんが、内山先生は僕に、例えば、「おまえは私（内山先生）のやったことというのは、Yang-Mills にちょっと毛を生やしたようなことだと思っているんじゃないか」と。僕はそう言われて、うーんとか何とか。本当はそうじゃないんだとおっしゃるのです。そのプライオリティのことについて、だんだんその頃から、僕が初めての人じゃないと思いますが、いろいろな方におっしゃるようになったみたいでした。そんなこともありました。

それからもう一つ、これについて別のことを申しますと、Yang-Mills の Yang なのですが、僕がこういうことをやるようになってしばらくしてから、何か知らない、いつだったか覚えていませんが、東大でお会いしたことがあります。昼食をしながら、Yang はそのときにちょうど multiple production というか、非常に現象論的なことをやっていたので、その話をしていたのです。

僕は、Yang-Mills というのは非常に原理的なこと、こういう現象論的なことと、どういう関係があるんですかねて、無駄話をしていたのです。

そのときに Yang 先生がおっしゃるには、Yang-Mills というのはみなさんご存じだと。 $F_{\mu\nu}$ というなかに A が余計に入っているのです。ですから FF のなかに A の 3 乗の項、4 乗の項とあるでしょう。そういう nonlinear の項ですね、これをどうやって見つけるのか、自分はあそこでどうやったらいいか、わからなかった。

あるとき、Mills が、こういう項があればいいんだよと言ってきて、ははんというわけで、それで道が開けたと言っていました。だから Yang-Mills の理論は、そんなものは当然だとして、みなさんがゲージ理論をやっていたらしゃいますけれども、生まれたときの、heuristic な苦労というの

があったんだということを、初めて知りました。内山先生は、そういうこととはまったく別に、一般相対論, Riemann geometry のほうから、接続場という概念が初めからあったからまったく違ったわけで、内山先生はやっぱり、どうしてもプライオリティを主張なさりたかったのだと思います。

そんなこともあって、ここにいろいろな名前を書いておりますが、このなかには僕にポジティブなことを言ってくれた方もありますし、最後まで意見が合わずに、でも僕としては、それからいろいろな、発展のネタになったようなことを提供してくれたから、ここに書いてあるのです。これだけじゃないです。いろいろとありました。

[Slide 6] Scalar-tensor 理論というものに興味を持ったわけですがけれども、さっき言いましたように、非常によく知られた alternative theory なのですからけれども、よくよく見てみますと、ものすごく、poorly understood というようなことがたくさんあるのです。ひとつがいま言いました、WEP violation. weak equivalence principle が一般的には成り立たない、scalar を exchange すると、そういうものが破れるということがあります。もしこれが破れていたら、一般相対論も Einstein の相対性理論も、根幹が破れるんじゃないかと思った人もいっぱいいるのです。でもそういうことはないと。これはあとで、時間があつたらちよつと述べますが、そういうことではないと思います。

そういうことも、なかなかはっきりしない、いまでもしていない。論文を見てもそうですね。それからこれはあとで、ちよつと詳しく見ますが、solar-system experiment というのがあって、これで scalar-tensor 理論は死んでしまったと思っている方も、たくさんおられます。それからこれは非常にテクニカルな論争ですが、これも、あとちよつとだけ言いますが、この comformal transformation というのがあって、これはいま、いろいろと議論されています、 α というような定数、あるいは G という定数が時間とともに変わるかどうか、これが comformal frame をどう選ぶか、あとで詳しく言いますが、そういうことに深く関係しているということも、あんまりよく認識されていないみたいです。そういうことで、poorly understood と書いたのですが、この言葉自身は、僕は最初、1970 年にアルゴンヌにいましたが、そのまた数カ月前に、あの近くの、中西部といいますか、大学の物理学会なんかがありまして、Gell-Mann が講演をしまして、それが scale invariance だったのです。Gell-Mann がそれについて、深くやったかどうか、南部先生はご存じかどうか、僕はよく覚えていませんけれども、僕が覚えているのは、彼が壇上に立って最初に発した言葉が、「I'd like to talk about poorly understood subject」. poorly understood subject というのが scale invariance なのです。カッコいい言葉だなと、僕はそれだけ覚えています。機会があつたら、言ってやろうと思っていたのです。

ちよつとだけ、scalar-tensor 理論の話をいたします。scalar-tensor 理論というと、みなさんのなかには、それは Brans-Dicke 理論のことかとおっしゃる方が、かなりいらっしゃいますね。僕に言わせると、それはちよつと違う。Brans-Dicke Model というのは、scalar-tensor 理論として考えられる大きな枠のなかの、非常に一部分をやっている。どうして一部分かと、いますぐに申し上げますけれども、とにかく、でもやっぱり広く議論されているやさしい理論ですから、これについてちよつと言いたいと思います。

[Slide 7] Jordan が最初に提案したのは、こういった Lagrangian です。ここに ϕ というものがある、これがスカラー場。R の前にこれがかかっている。普通はここが、Einstein-Hilbert というわけで、ここはコンスタントで、ここに G があるのです。それが ϕ ですから、要するにこの理論では、 G というのは本当の定数ではなくて、スカラー場で与えられる何か、変動するようなものでかまわないのです。 ϕ というスカラー場がここに kinetic term. この分母に ϕ なんて現れて、気持ちが悪いのですが、ここに ω というのがあって、これがこの理論の唯一のパラメーターというわけです。で、matter があります。

3. Brans-Dicke model

$$\mathcal{L}_{\text{BD}} = \sqrt{-g} \left(\frac{1}{2} \dot{\phi}^2 - \frac{1}{2} g^{\mu\nu} \partial_\mu \phi \partial_\nu \phi + L_{\text{matter}} \right)$$

$$\varphi = \frac{1}{2} \xi \phi^2, \quad e\xi^{-1} = 4\omega, \quad \epsilon = \text{Sign}(\omega), \quad \xi > 0$$

$$\mathcal{L}_{\text{BD}} = \sqrt{-g} \left(\frac{1}{2} \xi \phi^2 R - \frac{1}{2} g^{\mu\nu} \partial_\mu \phi \partial_\nu \phi + L_{\text{matter}} \right)$$

nonminimal coupling term (NM)

Reduced Planckian units $c = \hbar = M_{\text{P}} (= (8\pi G)^{-1/2}) = 1$
 $8.07 \times 10^{-33} \text{cm}, 2.71 \times 10^{-43} \text{sec}, 2.44 \times 10^{18} \text{GeV} (13.7 \text{Gy} \approx 10^{10.21})$

Variable G due originally to Dirac $\sim t^{-1}$

$$\mathcal{L}_{\text{EH}} = \sqrt{-g} \frac{1}{16\pi G} R \Rightarrow \frac{1}{8\pi G_{\text{eff}}} = \xi \phi^2$$

$\phi \left\{ \begin{array}{l} \text{coupled} \\ \text{decoupled} \end{array} \right\} \text{ to matter for } \left\{ \begin{array}{l} \text{J} \\ \text{BD} \end{array} \right\} \text{ model} \Rightarrow \text{WEP} \left\{ \begin{array}{l} \text{violated} \\ \text{valid} \end{array} \right\}$

No mass term assumed $\sim \phi^2$

[Slide 7]

Major consequences of BD model

- The only interaction of the scalar is NM which includes a mixing between the scalar and spinless part of the metric $\Rightarrow$ the scalar-matter coupling occurs only through the tensor-matter coupling, $\Rightarrow$ Metric theory featuring WEP, or UFF



matter coupling
 $\sim \zeta^2 = (6 + e\xi^{-1})^{-1} = (6 + 4\omega)^{-1}$

Also the condition $\zeta^2 > 0$ for the diagonalized σ to be non-ghost, even if $\epsilon = -1$

- After the completion of GR, (heuristic) WEP was elevated to the higher, more abstract level (Utiyama), Ultimate Equivalence Principle (UEP), including comma-goes-to-semicolon rule, rather than a confusing concept, Einstein EP (C.Will).

- Solar-system exps The theory appears almost dying. Can it be resurrected?

[Slide 8]

このままではちょっと気持ちが悪いので、ちょっと書き直します。 ω の sign を持つてきて、 ϵ と書く。 ω の代わりに ξ^{-1} を書く。 なぜかという、この理論では、あとからもちよつと言いますが、このスカラー場が完全に decouple して、general relativity の limit になるのは、 ω が無限大になるところというふうになつちゃう。 なにかそれは、coupling と反対みたいになって、そういう意味で、ただこの inverse を ξ と書く。 ここに ϵ をつけて、 ξ は常に正、こいつをこういうふうに書くと、これがもう少し普通の場合の理論の方に理解しやすいかたちになって、ここがこう。そしてここに ϵ が現れる。

ϵ が正だったら、この ϕ は kinetic energy で正。 そういう convention です。これは ϵ が負だったら、それはマイナスになる。だからこれは ghost なのです。ghost はどうしても避けたい。だけれども、ここが ghost だからといって、全体が悪くなるわけではないということも、認識していただきたい。すぐに申します。

このことを nonminimal coupling といって、これが scalar-tensor 理論の一番重要な点なのです。

あとの式で言いますときに使います。 c とか $\hbar$ とか Plank mass, あるいは $G^{-1/2}$, こいつを 1 とするような体系を、よく取ります。普通の単位で表すと、この長さの単位は 10^{-33} センチメートルとか、いろいろとありますけれども、ちょっとだけ覚えておいていただきたいのは、現在、宇宙の寿命だといわれているのは、ほぼ 14 Giga year です。それをこの unit, Plank time で測るといくつになるかというと、 10^{60} になるのです。これは記憶に値するものだと思います。あとでまた出てきます。

Jordan が最初に言ったことと、Brans-Dicke は特別なものだと言うのですが、何が特別かといいますと、これは、この ϕ field というのは、一般論として、例えば Jordan はこの中に入っているとも思っていた。ところがこの Dicke たちは、この中に入っているはいけないという仮定をしたわけです。なぜかという、そうすることによってのみ、weak equivalence は破れないと。一般相対論と同じになる。scalar を exchange したところでは、weak equivalence というのは、ものを落とすときに、そいつが組成に依存するというやつです。binding energy がどうだとか何とかによらないというのが weak equivalence です。そのことのためにこいつがある。

もちろん、これもご存じでしょうが、Dicke という人は本来、実験家です。それで特に、Eötvös の実験の精密化をやっている、そういう点から言うと、やっぱり weak equivalence principle を保存したかったのだらうと、心理的なものですね。

これは非常に大きな仮定で、あとから言いますのは、ここから離れる、今の accelerating universe もここから離れることを意味しているのだらうと思うからです。

それからもう一つの大きな仮定は、ここに ϕ について mass term がない。これは大きな仮定で

す。こんなことがあります。

もうちょっと進めますと、weak equivalence principle というのを守って、Brans-Dicke model がどういうことになっているかという、簡単に言いますと、metric theory になっていると、これは普通、言われることです。

[Slide 8] というのは、スカラー理論があると、確かにもとの Einstein の理論と違うんだけど、それは必ず metric を通じて変更になるというわけです。これは必ずしも、自明のことではないのです。こういう Brans-Dicke の仮定のもとで、そうなる。weak equivalence も成り立つ。

それからもう一つは、こういう組み合わせというのは、しょっちゅう出てくるわけです。この組み合わせというのは、Brans-Dicke の場合には、scalar との matter との couple の強さを計れると、いうことがあります。

もう一つは、これはこの理論では説明は省略しますが、ある種、スカラー場とほかのもののミックスになりまして、そいつを diagonalize しないといけない。それで、diagonalize した結果のスカラー場が、ghost であるかないかというのは、この ζ^2 の sign で決まるというわけです。 ϵ が -1 であっても、これ自身全体として positive になることはあり得ます。それならば、negative energy に悩まされることはないわけで、これでいいのです。そういう理論でなくちゃいけないと思う。だけどここが -1 であるからといって、hesitate してはいけない。これはときどきやっぱり今でも、いろいろな人が誤解していることなのです。こういうことが、さっき言った poorly understood の一つなんだと思います。

これについて、さっきから何度も言っています、weak equivalence principle がなくなると、本当はいいんだと言いましたが、それについては内山さんに教えていただいた記憶がありますので、申しますと、内山先生がおっしゃるには、weak equivalence principle は、確かに Einstein が一般相対論をつくるとき、大きな柱の一つになった、例の自由落下するエレベータに乗ったときの経験というようなわけです。

でもそれに基づいてつくった一般相対論においては、equivalence principle というのは、もっと数学的で abstract なものになっている。つまり普通言いますのは、曲がった Riemann space の tangential space を考えて、これは Minkowski だというわけです。重力の入っていない、Minkowski. これになっているというのが、equivalence principle の数学的表現になって、それがそうであっても、いわゆる weak equivalence principle がなりたたない場合もあり得る。そういう意味で、例えば comma-goes-to-semicolon-rule という、非常に便利なあれもあつたり、そういうことさえすれば、Einstein の時空というのは、それで正しいというわけです。

ですから、そういう意味で、僕はこの本では、ultimate equivalence principle と言うのですが、例えば Willさんは、こういうのは Einstein equivalence principle と言うけど、ちょっと書いているところを見ても、誤解があるんじゃないかなと、いつも思うのです。

それからもう一つ、この理論特有の流れとして、solar-system experiments がある。これについて、ちょっとお話をします。Solar-system experiments というのは、例えば Einstein のやつで、水星の近日点移動とか、太陽の周りを光が通るときに曲がるというのがありますね。こういうのはみんな、ある種、solar-system experiments です。Einstein が言ったときは、experiment したわけではないけれど、近代になると、いろいろな実験をしています。そういうものを含めて、solar-system experiments と言われていました。

[Slide 9] これは Dicke が最初、自分ではそんな実験はしなかったが、こういう制限が出てくると。

それからもう一つ、scalar-tensor 理論などもある。そうすると、ちょっとこれはテクニカルなことになりますが、こういう metric を通じて現れるのですが、ここに γ というものがある、これはある種のパラメータです。エディントンのパラメータの一つ。 $\gamma = 1 - 4\zeta^2$ 、というのが、いま

言いましたスカラー特有の coupling を表しているわけです。

PPN approximation for solar-system experiment (..., time-delay)

$$g_{rr} \approx 1 + \gamma \frac{a_g}{r}, \quad \gamma = 1 - 4\zeta^2, \quad \zeta^{-2} = 6 + \epsilon\zeta^{-1}, \quad \omega = \epsilon(4\zeta)^{-1}$$

Source	$\zeta^2 \lesssim$	$\xi \lesssim$	$\omega \lesssim$
BD (61)	0.03	0.04	6
Viking (79)	2.5×10^{-4}	2.5×10^{-4}	1,000
VLBI (99)	7×10^{-5}	7×10^{-5}	3,600
Cassini (03)	0.5×10^{-6}	0.5×10^{-6}	500,000

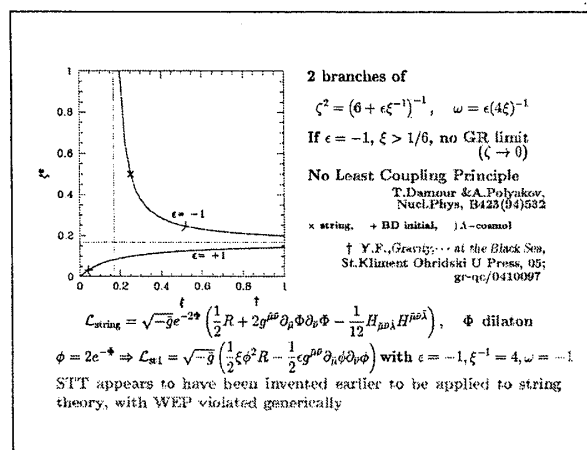
unnaturally too small ?? too large ??

$$\gamma - 1 = (2.1 \pm 2.3) \times 10^{-5}$$

B. Bertotti et al, Nat, 425(03)374

Is STT dying? But isn't σ massive? No immunity against acquiring a self-mass $\Rightarrow$ Free from solar-sys constraint?

[Slide 9]



[Slide 10]

Solar-system experimentsというのは、結局この metric をちゃんと測っているわけです。そして γ も測れるということになったのです。そういう意味で、Dicke が最初に考えたのは、evidence はないから、この upper bound, あるいは ω の lower bound. これは最初は 6 とかという値でした。ところが年代を経るにしたがって、例えば Viking, 1979 年に Publish されたのですが、これはアメリカの Mars lander というのが火星に何かを置いて、それを使って全太陽系のパラメーターを計り直したというわけです。そうすると、もう ζ^2 は、途中もあるのですが、これぐらいになります。 ω の下限にすると 1000.

僕はこの本を書いている途中に、VLBI の 1999 年というのがあるって、あまりよくわからないのですけれども、こんなところ。

それからごく最近、Cassini、これはイタリア人のグループがやったわけで、Cassini という衛星が、いまも飛んでいて、まさに土星の近くに行っています。そこへ太陽の半径の 1.6 倍のところでぴゅーんと光を通して帰ってきて、そして time delay を測るという、これがいまのところ、一番成果があります。

これは解釈上、ちょっと問題がありますが、一番大きい値を出そうとすると、500,000 です。こちらはちょっと、 ξ でみると 10^{-6} 、こういうのを見ると、だいたいこんな値って、小さすぎるのではないかな。unnatural ではないか、これは unnatural よりも大きいんじゃないか、これも Dirac が嘗て言った、何か理論の基本的なパラメーターはオーダー 1 じゃないか、 $\sqrt{2}$ とか π だとか、そんなものでできているんじゃないかと。基本的なパラメーターでなく、何か derive されたものなら話は別ですけれど。こんなことがありました。

こういうものを見て、とにかく scalar-tensor 理論はもはや死につつ、あるいは死んでしまったと思う人がいっぱいいます。だけど、ここで僕が言いたいのは、この解析で一番大事な仮定は、スカラー場が long range だという仮定なのです。もし有限の range だったら、このところに $\exp(-\mu r)$ がくっつく。で、もし force range が、前に言ったように何百メートルと macroscopic だけでも、太陽の半径に比べたら、はるかに小さいということがあると、このところの exponential factor が 0 になっちゃうわけですから、いくらこれを精確にやっても、スカラー場のパラメーターを決めることにはならないのです。そういう逃げ道もあるわけです。そうすると、それで scalar-tensor 理論が生き返るかもしれないというわけです。

[Slide 10] ここでちょっとだけ、 ζ^2 の性質を調べてみました。 ζ^2 はこちらに書いておきました。 ϵ というのが、+1 の場合と -1 の場合、いずれにしても全体は正でなくちゃいけないということは、前に言いました。そうすると、こういう図で二つあります。この図は、この本に書いていない

のです。あとから考えて、やっぱり図を書かなくちゃいけないというのは、さっき言ったことのように、これはこういう本に書いてありますよ、この本はあまりありませんので、これを見ていただければ、あります。

これを見ると、 ϵ が 1 だったらこうです。これは $\frac{1}{6}$ より小さくなくちゃいけない。ここが $\frac{1}{6}$ で、 ϵ が -1 だったらこうですね。ここに書いたのは、Brans-Dicke が最初に言った「6」というもの [Slide 9] に相当するのがこれです。以下、どんどん unnatural にどうかなってしまったのがこれです。ずっとこちに近づく。で、unnatural に ξ が小さいですね。

これは ϵ が +1 でないといけない。もし、これは自然な値ですと、このへんにくる。特に ϵ が -1 というのが、理論的に意味があるかということを考えるのです。そうすると、ないとは言えない。例えばみなさんがご存じの string, closed string というのは、26 次元で考えて、26 次元の metric のほかに、明らかにスカラー場があるのです。それは dilaton と呼んでいます。ほかにもありますが、これはどういうふうに含まれているかというのは、ここに書いてあります。これは例えばあの厚い本、グリーンなんとかというやつを見ると書いてありますが、ここでちょっとだけ変数変換すると、こんなふうになって、これは前に書いた scalar-tensor 理論とまったく同じなのです。

正確にこれを identify しようとしめすと、 ϵ が -1 なのです。そういう理論があるのです。それから ω が -1 なのです。こういうもの、sign なんてしよつちゅう間違えるんじゃないかということ、これはいろいろとやってみるより仕方がない。

もう一つ、ちょっとそういう印象を言いますと、こういう統一理論としては、要するに多次元時空、これじゃなくて、Kaluza-Klein も、なぜかこうなっているのです。これもよくわからないけど、こうなっているのです。それでちゃんと、全体として positive になるようになっています。

これを見ますと、string theory が流行るのは、1970 年代、80 年代だと言うべきかもしれませんが、scalar-tensor 理論はその 20 年か 30 年も前に出ているのですが、あたかも string theory で、こう使ってくださいといわんばかりの格好にも見えます。それはよくわかりません。

僕はもう一つ、こういう理論 dependent じゃなくて、もう一つ別のことも言いたいので、それをちょっと言います。もうそろそろ時間がきちゃったので、終わりに近づけようと思います。

4. Lambda cosmology Prompted by W.Wada's argument Unification program $\Rightarrow$ Today's cosmological constant problem (Observed upper bound) $\sim 10^{-120} \times$ (theoretically natural size) $\sim M_{\text{Pl}}^4$ Worst record of disagreement despite many efforts expecting that physics thrives on a crisis S.Weinberg, RMP 61(80)1 $\mathcal{L}_{\text{BDA}} = \sqrt{-g} \left(\frac{1}{2} \xi \phi^2 R - \frac{1}{2} g^{\mu\nu} \partial_\mu \phi \partial_\nu \phi - \Lambda + L_{\text{matter}} \right), \quad \Lambda > 0$ Soln in spatially flat FRW Without } a scalar field $\rightarrow a(t) \sim \begin{cases} \exp(\sqrt{\frac{1}{3}} t), & \text{inflation} \\ \text{const}, & \text{no inflation but } G \sim t^{-1/2} \end{cases}$ With } A.Dolgov, in <i>In the very early Univ.</i>, Cambridge U Press (82)	Conformal transformation, (Weyl rescaling, Local change of units) $g_{\mu\nu} \rightarrow g_{\mu\nu} = \Omega^2(x) g_{\mu\nu}, \quad \text{or} \quad ds^2 \rightarrow d\hat{s}^2 = \Omega^2(x) ds^2$ Why important? First because it allows you to move to the Einstein conformal frame (ECF), by choosing $\Omega = (\xi \phi^2)^{1/2}$ $\mathcal{L}_{\text{BDA}} = \sqrt{-\hat{g}} \left(\frac{1}{2} \hat{R} - \frac{1}{2} \hat{g}^{\mu\nu} \partial_\mu \sigma \partial_\nu \sigma - V(\sigma) + L_{\text{matter}} \right), \quad 8\pi G_* = 1, \quad \zeta^2 > 0$ $\phi = \xi^{-1/2} e^{\zeta \sigma}, \quad V(\sigma) = \Omega^{-4} \Lambda = \Lambda e^{-4\zeta \sigma}, \quad a_*(t_*) \sim t_*^{1/2} \text{ expanding!}$ We have come from BDCF in which $m = \text{const}$ (standard of units). Choose CF according to which stay constant and which vary with time. But which CF is physical? $3H_*^2 = \rho_\sigma + \rho_*$ $\text{with } \rho_\sigma = \frac{1}{2} \dot{\sigma}^2 + V(\sigma) \Rightarrow \begin{cases} \Lambda_{\text{eff}} = \rho_\sigma = \frac{3}{16} \zeta^{-2} t_*^{-2} & \text{Dark energy} \\ \rho_* = \frac{3}{4} (1 - \frac{1}{4} \zeta^{-2}) t_*^{-2} > 0 \Rightarrow \begin{cases} \zeta^2 > 0.25 \\ \zeta = -1 \end{cases} \end{cases}$ Scenario of a decaying cosmological const without fine-tuning $\Lambda_{\text{eff}} \sim t_*^{-2} \sim (10^{60})^{-2} \sim 10^{-120}$ Y.F., Proc Gauge theory & gravitation, Nara, Springer(82); PRD10(82)2580 Major success of STT (!!) beyond quintessence approach
---	---

[Slide 11]

[Slide 12]

[Slide 11] Lambda cosmology という考え方です。というのは、cosmological constant というのは、昔から Einstein の有名な話があって、一生の不覚であったという説があるわけですが、それとはまったく違った意味で、いま unification を考えると、みなさんを悩ませている問題があるわけです。

それはどういうものかと言いますと、Planck mass の 4 乗ぐらい、少々小さくたっていいのですが、これぐらいの cosmological constant がいろいろな unified theory で出てきちゃう、これを退治

するというのは大変なのです。そのために、Weinberg が言うように、いろいろな人がいろいろな苦勞をして、宇宙の初めの初めの初めでは、Euclidean geometry になっていてどうのこうの、いろいろありますけれども、それでこの 120 桁小さいというのが、いまの実験的な upper bound です、こういう小さい数を出す、それはほとんど不可能、で、それを 0 にする保証もなかなかないし、もっと深刻なのは、これぐらい小さくて、しかもノンゼロということになる。それを出すのは至難の業で、これはおそらく、多くの秀才が大変苦勞したのは、ほとんど、いまでは無駄なんじゃないかと、僕は思います。

どう解釈するかは、いま申しますが、仮にそういう cosmological constant があつたとする。よく新聞なんかには、cosmological constant というのは repulsive な force だを書いてあるけど、力というのは、Newton potential のところで言いましたように、何か二つのもの、あるいは三つのものの間にはたらく力。ところが cosmological constant はそうじゃありません。宇宙全体に瀰漫しているものが、ただひゅんと宇宙の膨張を助けるかどうかということなので、力と言ってはだめなんですけれども、そういうものだと思って、ただただ普通の理論に、スカラー場なしで Λ を入れるとどうなるか。

普通、スケールファクターって、宇宙がどういうふうに膨張するか、時間とともにどうなるか、それが exponential に爆発してしまう、 Λ の効果。これはインフレーション。佐藤さんがおっしゃるインフレーションは、まさにそうなのですけれども、僕がここで言っているのは、佐藤さんがおっしゃるインフレーションが終わっちゃったあと、ずっと全体の宇宙、例えば現在、exponential に大きくなっているか、それはないわけです。それが無いということが、この 120 桁、あるとしてもこれより小さいよと言っているわけです。そのことを理解できるかというわけです。

スカラー場があつたらどうなるか。そういうことを最初に調べたのは、おそらくロシア人、いまイタリアにいますが、A. Dolgov だと思います。Dolgov さんが言ったのは、単にこういうようなものの考えです。これの spatially flat FRW universe、これは cosmology 以外の人には、あまり親しみがないですけど、一番簡単にできることだと思ってください。spatially flat に、いろいろなへんてこりんな dependence をできるだけ小さくして、エッセンスだけ。

こういうものでやってみますと、Dolgov の結果は、 $a(t)$ がスケールファクターです、時間無限大で、コンスタントだったのです。宇宙は膨張も何もしていない、こんな馬鹿なこと、それでおしまいになるかということ、そうでもないのです。

この Weinberg の本に、Dolgov のことが書いてあって、悪口も書いてあるのです。どういう悪口かというと、constant は別として、 G が時間変化して、どんどん小さくなっちゃう。 G がなくなったら、重力がなくなると。そんなときに cosmological constant なんて、意味があるだろうかということです。だけど、これは僕は考えて、これで終わりじゃない。さっき言いました、scalar-tensor theory には、comformal frame を選ぶという、ちょっと普通、なかなか理解できないことがあるのです。

[Slide 12] もう、時間が来ましたがけれども、comformal 変換というのは何かというのを、ちょっと説明します。これはこういう metric を全体としてばんと、local に scale 変換する、 x の関数だということがミソです。あるいは線素というものを、こういうふうに変える。

Weyl の rescaling と言ったり、Dicke 自身はこういうことから考えて、local change of units、時計が時間とともに変わるとか、spacetime のものさしがそういうふうに変わるかとか、そういうことだというわけです。

これがなんで重要かということ、こういう変換を適当にやって、特に適当に選ぶと、これは G_* に変わるのです。前に書いた [Slide 11]、同じラグランジアンですね、スターで書き直すと、この前はまったく constant になってしまうことができるのです。これは Pauli が最初に言ったそうです。

これはまさに Einstein-Hilbert で、 G は constant なのです。だから前のところでは G が時間とともに変わる、今度は変わらない。ある定数が変わるとか変わらないという、こういう comformal な frame をどうとるかによるというわけです。

ここがコンスタントになる、Einstein-Hilbert になる、これを Einstein comformal frame と呼ぶ人は呼びます。じゃあ、引越してくる前のは何だかというと、これは Jordan frame と言ったりする人がいるけど、僕は Brans-Dicke comformal frame と呼ぶのが一番いいだろうと思います。

変更はこれだけじゃなくて、いくつもあります。まず第一に、ここに現れるスカラー場、前は ϕ と書いておきましたが、これは書き直すと非常に複雑なかたちになるのですけど、こういうふうに書き直すと、ちゃんと canonical なかたちになるのです。これで ghost じゃないというようになるわけです。

それからもう一つは、前には Λ というのは、ほとんど constant みたいなものだったのですが、この項は、こういう σ の exponential の potential なのです。しかももっと驚くのは、scale factor です。スターつけて、 t にもつけないといけない。詳しいことは言いませんが、ちゃんと expand してくれる。だから comformal frame の選び方によって、宇宙はまったく膨張しないとか、膨張するとか、変わるわけです。これの方がはるかに、われわれの現実に近いのだろうと思う。

こういうもので、いろいろとやり直してみますと、例えば Einstein 方程式の 00 成分というものを見ますと、右辺は density です。この density に、普通の、matter density の変換したものほかに、 ρ_σ と、これは σ というやつの kinetic energy とここに書いた potential energy の和です。しかも、これはだからある意味で、いま言っている dark energy というやつ。これは dark matter じゃなくて、pressure が negative で、そしてどこかにクランプしてなくて、世の中全体。

こういう dark energy とかいうふうに言ったのは、1980 年代に、ある人たちなのですが、ここで出てくるのは、これが effective な cosmological constant と呼んでいいのです。それが t とともに、この -2 乗で小さくなっていく。僕はこれは、scalar-tensor 理論の、いままでの歴史の中で一番大きな成功だと思います。

これは decaying cosmological constant scenario と言っていいと思う。この言葉は、Peebles が誰かが前に発明したのだと思いますけれども、Peebles が何を言ったか、いまはちゃんと覚えていませんけれども、これはまさにそれになっていて、しかも前に言いました、いまのこれ、特別の reduced Planckian unit をとっているから、ここに G だの何だの、何にも現れないのです。そういう unit system で見ると、現在の age は、 10^{60} だと言いました。ここは 2 乗ですから、 -120 乗です。120 桁の何のかんのって、たくさんの人を悩ませている、恐ろしい fine-tuning ということが考えられて来ましたが、そんなものじゃ全然ないということを言っているわけです。120 桁小さいのは、単にわれわれの宇宙が歳を取っている、それだけなのです。fine-tuning は何もしなくていい、そういうふうに理解するのがいいんだと。

だから cosmological constant が小さいのは、宇宙のはじめのはじめの量子論か何かに関係があるんじゃないで、classical field のずっとあとの振る舞いだというのが、scalar-tensor 理論の言うところだと思います。

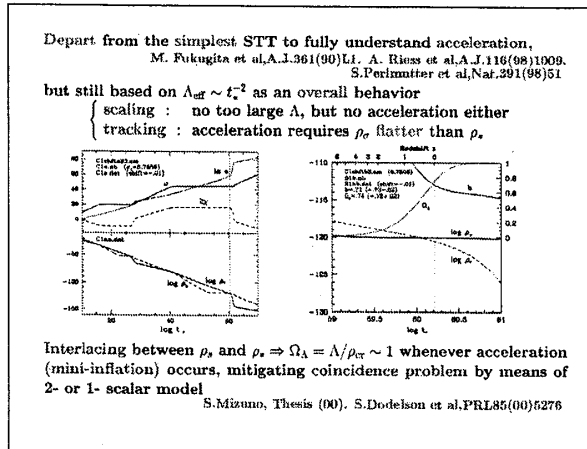
こういうことは、個人的なことですが、内山先生が帝塚山に移ってまもなく、こういうコンファレンスをおやりになりました。そのときに僕はこれを話しているし、こういう論文を書いています。

そこに書いてあることは、いまの dark energy と言っていることとほとんど対応しているわけですが、これはあの論文に書いて、しゃべったのは、ちょっと変な、完全な解ではないし、表現の仕方でも単位系の取り方も、CGS の単位を使って書いたので、このことがはっきりしないのですけれども、こういうふうにと書くと、120 桁というのは、いかにも簡単に理解できます。

もう一つ思い出すことを言いますと、多分この基研に来て、僕はなにかある部屋で無駄話をして

いたら、ちょうど益川さんがいらっしやいました。今日は益川さんはいらっしやらないのですが、この話を益川さんにしたら、「あ、そうなのか」と言って、たいへん益川さんに感心していただいた記憶があります。

ですからこれは、そういう意味で、さっき、現在の宇宙の age は 10^{60} 、これは覚えておいてくださいと言いましたのは、こういう意味です。



[Slide 13]

Is ECF a physical CF? No, because $m \sim t_*^{-1/2}$ instead of the required constant m , which is true in BDCF.

$\Rightarrow$ Another reason for departure from BD model, to be replaced by scale-invariance (except for Λ) with its violation spontaneously and then explicitly in terms of quantum anomalies, which provide us with the matter-non-Newtonian coupling exhibiting composition-dependence - WEP violation

• Locally massive while globally massless scalar field? Related to no quantum origin of Λ ?
Y.F., PTP110(03)433

• Relevant to $\dot{\alpha}/\alpha$?
Y.F. et al, NPB573(00)377,
Y.F. & S. Mizuno, JMPD14(05)677, Y.F., PLB610(05)141

• A new playground for nonlinear dynamics or dissipative structure?

Many theoretical advantages over the phenomenological quintessence approach

[Slide 14]

ただもう一つ、普通の matter density の方を見ると、こうなると、これも t_*^{-2} 。同じで、ここがちょっと問題なんですけど、これは positive でなければいけないというふうに思うのです。普通の energy ですから。そうするとこれは、 ζ^2 が $\frac{1}{4}$ より大きくなちゃいけない、こういう不等式が出るわけです。これを前のこの絵 [Slide 10] で見ますと、このへんにあたって、これはだから ϵ が -1 でなくてはならないということになっているのです。

これは string theory とか Kaluza-Klein とはまた無関係で、ある種、Lambda cosmology、これがどのくらいいいかということですが、こういうこともあるのです。

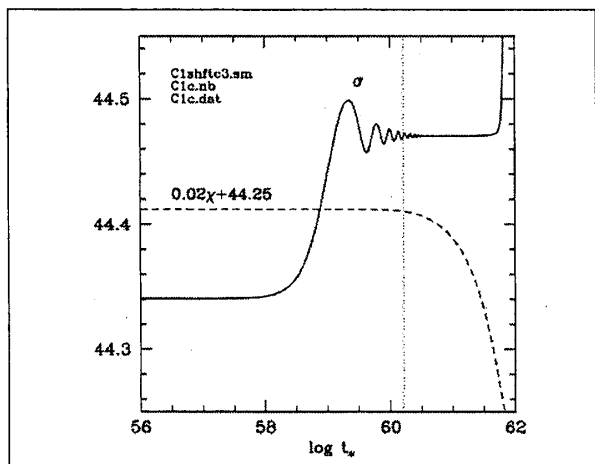
ですから、これは ϵ が -1 になると、前から言っているように、とにかく ζ^2 が $\frac{1}{6}$ より大きくなっちゃうのですから、こんなのはだめで、実験値がこのへんにあるとしたら、これはもう、おそらく scalar field は long range ではなくて、有限の range を持っているというふうに考えなくてはならない、そう考えれば、scalar-tensor theory は生き返ることができるだろうと思います。

あと、これについて、実はいま、accelerating universe と言っています、cosmological constant は、小っちゃいけどあると。もう、時間まもなくですね、もうやめますけど。

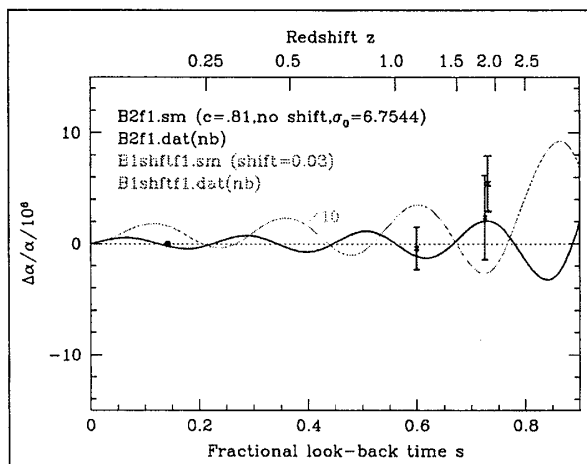
もっともっとやらなくちゃいけない。これは一番単純な scalar-tensor 理論より、少し進まなくちゃいけないのです。そうすると、cosmological constant problem にはいろいろと問題があって、いわゆる coincidence problem というものがあるとか何とかかんとか、いっぱいあります。けども、どうも僕が考えるに、この scalar-tensor 理論というのは非常にいいのだと思います。世の中では、ある人たちが、accelerating universe、cosmological constant があるというのがこういうことです。だけれども僕たちは、その少し前の福来さんたちがやった、少し別の方法で考えました。1990 年にありましたね、galaxy counting といいます。これは日本でもいろいろとケチがついちゃったと思いますけれども、でも結局は、正しかったと思って、この頃、僕は大学院の学生の西岡君と一緒に、少し考えたことがあって、それは結局はいいのではないかなと思うのです。

一方、ある人たちは、quintessence という。quintessence というのは何かというと、本当に constant の Λ じゃ、coincidence problem、あまりにも不自然だよ、だからそれはスカラー場があって、変動しているんだよと考えなさい、簡単に言うとそういうことです。

ただそういう人たちは、スカラー場があるのだったら、僕だったら scalar-tensor 理論を考えるけど、それはあまり考えたくない、あまり好きではない。



[Slide 15]



[Slide 16]

なんでかという、いろいろと理由があるのです。まずあまり理論的はことは、やばいから近づかないようにしようという心理もあると思うのですが、いろいろな人と話すと、もう一つは solar-system experiments で、あれはもう死んでしまった、それはだから有限の force range があるとすればいいわけだし、それから comformal frame のチョイス、これもほとんどの quintessence な人たちは、非常に曖昧にしたままですね。これが非常に有効な考えだよ、string theory とマッチさせるにはこうしたらいいと僕は思いますけれども、なかなかそう思ってくれない、そういうことがこの本に書いてあります。

そのほか、ほとんどの人がそういうことで、あまり scalar-tensor 理論を支持してくれないので、この本の売れ行きも悪いわけです。値段の点については、これから安くなると思うので、楽しみにしててください。ということで、一応。

佐々木：どうもありがとうございました。ちょっと時間を超過していますが、いろいろと楽しいお話だったので、つい長くお話いただきました。コメント、質問、その他、何か歴史的なことにに関してでも、何でも。

川崎：そこに dissipative structure と書いてありますが、それはどういうことなんですか。

藤井：これはいま話さなかったのですが、もうちょっと、一段進めたやつなのです。それもこの本に書いてあるのですが。そうすると、harmonic oscillator が二つ以上あるのです。そうすると、この系は、時間だけの関数だとしては、chaotic な behavior を示す条件を備えているのです。宇宙には、膨張しているために、自然に dissipation があるのです。それで Prigogine の言う dissipative structure が非常に特別なのは、potential がミニマムじゃなくて、マキシマムを通過するときに、いろいろな面白いことがいっぱいある、そういうことも、この本に書いてある。

坂東：cosmological constant については、昨年いろいろと議論があって、結局、これは宇宙の年齢と関係しているということですね。

藤井：そうです。

坂東：ということは、もっとわれわれが歳を取れば、そういう意味じゃないと。宇宙の年齢のスケールということ。

藤井：そうなるけれども、もうちょっと詳しく言うと、 Ω_Λ というパラメーターがあって、それはちょっと、前に書いたのですが、要するに問題は、cosmological constant といわゆる critical density

の比なのです。

佐々木：そのところは、一番最後で藤井先生がおっしゃった、conformal frame の話が非常に関係しています。もともとの出発点での cosmological constant が、例えば conformal frame を変えると、 $1/t^2$ で落ちてしまう。そうすると、それを cosmological constant と言えるか。新しい frame では明らかに定数ではないので話が変わります。だからそのへん、いろいろと、ちょっとややこしいのです。

実は私もその点に関して質問したかったのですが、conformal frame をどう選ぶかは、確かに理論としては勝手なのでしょうが。

藤井：勝手じゃないですよ。

佐々木：理論は勝手じゃないんですか？

藤井：理論は勝手だけでも。

佐々木：そうですね。実験的に conformal frame を決める手段というのは、あるはずなんですね。

藤井：それはありますね。例えばいまは、atomic clock を使っているでしょう。そして宇宙の過去を見るにも、atomic spectra を見て、red shift で測る。ということは、時計の基準が atomic clock で、それは本質的に electron の mass なのです。 α もかかりますけど、大部分は electron の mass。それが constant になるような conformal frame を選びなさい。conformal frame の選び方によって、mass が時間 dependent になることが、いくらでもある。

佐々木：electron の mass が時間とともに変化するような宇宙論を考えたらいかんということになりますね。

藤井：いかんですよ。

佐々木：そうですか。

藤井：いや、いいけれども、その変数を変えてやればいいのです。

坂東：そんなオブザーバブルなものが、そんな frame を変えて、... ?

藤井：いいんですよ。オブザーバブルなものなんていうのはね。これは conformal frame を選ぶのはね。

坂東：その対称性って、何なんでしょう。

藤井：対称性じゃない。conformal frame の変化に対して、理論は不変じゃないんですよ。まったく不変ではありません。

坂東：ということはそもそも、それは dilaton が、mass を持っているからですか？

藤井：それとも違いますね。

坂東：どうもこれは、なかなか難しいです。

藤井：ちょっと複雑です。

坂東：佐藤さんが来てたら、もっと面白くなるかなと思うんですけども、佐藤はあれは嘘だと。

藤井：夕べはお話できませんでした。

佐々木：佐藤文隆さんのほうですね。

坂東：はい。あ、どっちもだけど。いやいや、文隆さんです。文隆さんのほうは、そんなぶさいくな cosmological constant があるはずがないと。

藤井：そんなことはないですよ。

坂東：そう言ったはりますので、いろいろとまたあとで。懇親会の議論ですね、これは。

佐々木：そうしたら時間も押していますので、もしもう一つぐらい、どなたかコメントなり質問なり、ございましたら。よろしいでしょうか。

坂東：もう一個すみません。私は新しい分野を、若い人がやるべきだという話はよくあるのですが、年寄りがやるべきなのかなというのは今日聴いてよけい思いました。年寄りといい

ますか、去年もちょっと、そんな話が出たのですけれども、やっぱり一応、何か仕事をした人は、ちょっとは余裕があるんです。若い人はいんです。

藤井：だから例えばね、すみません、ちょっとだけ。[Slide 16] このことは、 α が時間 dependent かどうかというのと関係があるのです。

佐々木：そちらの話ですか？

藤井：だから若い人がやってもいいんだという。

坂東：ああ、そうですか。

藤井：Stringをやっている方が、この α の time dependence にまったく興味を示さないなんて、僕は理解できないなと思います。そういう発展は、いくらでもあり得るわけです。そういう意味です。

坂東：今日は、もっと若い人に来てほしかったですね。すみません。

佐々木：未だいろいろと質問もあるとは思いますが、懇親会やお昼の時間、これからちょっとコーヒブレークもありますので、その時間にしていただくということで、午前前半のセッションは終わりにします。どうもありがとうございました。



ph06 藤井/石原/藤井//大久保/藤井/石原//日置, 川村/中西/佐々木