

量子情報 —湯川・朝永のやり残し—

京都大学名誉教授 佐藤 文隆

九後：次のセッションは、佐藤文隆先生です。最近、佐藤文隆先生の話ばかりを聴いております。実は佐藤さんに聞きますと、去年、世界物理年のはきは、もっと多かったとおっしゃっていたので、すごかったんだという感じです。今日はご専門の宇宙ではなくて、「量子情報 —湯川・朝永のやり残し—」というタイトルでお話いただきます。よろしくお願いします。

坂東さんに引っ張り出されて、まとめをやれということでしたが、そんなことはできないのでこういう題で。いま「湯川・朝永記念行事」で忙しくしています。昨日もこの会に出られなかったけれども、平均年齢 65 歳ぐらいの集団を 40 人ほど連れて下に来ていた。世の中にはここの基研を見たいという奇特な人もいたので、博物館の展覧会を見学したあと連れてきた。サロンの黒板に数式が書いてあったので、「あれは湯川・朝永のを残してあるんですか？」とか言うから、そのへんのしょうもない人が書いたんですよと。

量子情報：湯川・朝永の遣り残し

佐藤文隆

湯川 1939 年

1939 年 4 月初旬 招待状

Solvay conf. (Oct.), 独物理学会 (Sept.), Int. Conf. Phys. (Sept.)

5 月 京大教授

6 月 30 日 神戸港出航 靖国丸

8 月 2 日 ナポリ上陸 ローマに

6 日発、7 日 ベルリン着

25 日 ハンブルグに退出、靖国丸乗船

9 月 4 日 ベルゲン出航

9 月 14 日 ニューヨーク入港

上陸

10 月 13 日 サンフランシスコ出航 鎌倉丸

10 月 28 日 横浜上陸

[Slide 1]

[Slide 2]

[Slide 1] いま、どこの大学も、同窓会組織をつくらうとしています。京大も同窓会組織をつくらうというので一所懸命。ちょうど「湯川・朝永展」をやっていますので、卒業生が久しぶりに京大に行ってこれをみるツアーを本部の社会連携課が計画したのです。それで私が頼まれて、来た人のツアーガイドをして、基研を見たいという人はここへ連れて来たということ。昨日もだから、湯川部屋を見せたあと、お年寄りだからみんな座ったらここにすわって休憩、そこにコーヒーがあって、飲んでいいもんだと思って飲んだら、遠藤(理佳)さんがやってきて「それはいかんだ!」と。衝撃を受けて心臓でも止まるんじゃないかと心配した、そういうご高齢の方々でしたから。

その夜は懇親会で、乾杯をやった人は 93 歳、それでも卒業生では 3 番目だとか言っていました。大阪京大同窓会です。93 歳の方が京都帝国大学を卒業したのは昭和 13 年。私は昭和 13 年生まれなのですが、そのときに京都大学を卒業した人が、まだ生きているのですね。

明日の朝はまた、甲南大学の市民大学で、お年寄り向けに話さないといけない。

みなさん今日はお疲れでしょうから。

[Slide 2] 私と江沢さんと小沼さんが中心で、基研の九後、野尻さん、あと、筑波の宇川氏とか、阪大の高杉氏とかが入って、展覧会の文章とか写真を、全部つくったので、いまはもう、湯川・朝永の戦前の話は、誰よりも良く知っているくらいです。今日の話はその一端です。そのうち、僕も忘れるので。

湯川にとっては、この年 1939 年が特別だったというのは、みなさんよくご存じだと思います。それを in detail にちょっと見ますと、まず 4 月に Solvay 会議の招待状がくる。ヨーロッパでは連動していたようで、Solvay 会議と一緒に、ドイツ物理学会で講演してほしいとか、スウェーデンかのある町でやるヨーロッパの物理の International Conf. の招待状を受け取る。その頃は「物理」は全部一緒です。それが Solvay 会議とひっついて、その前に講演してほしいというようなことが一緒にきます。

この年に湯川は京大教授になります。この年は、湯川にとっては最高に忙しいものです。

神戸を発って 6 月の 30 日にはもうローマに上陸してます。そこから鉄道で動きまして、ベルリンに行ったとき、ライプツィヒに留学している朝永が会いに来る。Heisenberg に会えるかもしれないといっただけけれども、夏休みで不在で Heisenberg には会えなかった。

そのうちに、このへんでナチスのヒトラーがポーランドに侵攻いたしまして、第 2 次世界大戦が始まって、中欧の日本人は全部、とにかくヨーロッパを引き上げるということで、行くときの船に乗って帰ります。

ドイツ留学中の朝永も、一緒に乗って帰ります。最終的に、ヨーロッパのほかの国からもいっぱい集めて、これ（ベルゲン）はノルウェーからかな。

行くときは、インド洋を通って行ったのですが、帰りはなぜかアメリカ周りで帰ります。

それでニューヨークに着いて、湯川はその後 1 カ月、アメリカを縦断旅行します。この時もう、湯川は物理の世界では特別な人です。日本でも特別な人でした。朝永は、まだ、ただの人です。ですので、朝永は同じ船でニューヨークまで来るのですが、乗船したまま延々と船に乗って、パナマ運河を通って帰ります。お金的にもちょっと余裕のある人は。

坂東 : お金って。

佐藤 : ものすごく金がかかる話ですよ。1 カ月間の滞在だし、予約も何もなく急に行って、いろいろなホテルに泊まるのだから。

1939年10月13日、日本郵船の
「鎌倉丸」はサンフランシスコを
離れ、10月28日横浜港に着いた

[Slide 3]

[Slide 3] 今回の一連の展覧会などの記念行事に触発されて、いろいろな情報が入るのですが、そのうちのひとつで、野依良治さんが「うちの親父とお袋が、湯川先生と戦前、船でずっと 1 カ月ほど一緒に旅行した写真が残っているんだ」と言われたのです。自分も歳を取ったから、またお母さんが最近亡くなられたとかで、名古屋の家を引き払ったらしいのです。その時にあるアルバムが出てきた。それであるとき「親父から湯川秀樹とのことは聞いていたけれども、写真というのは僕も見ただことなかったが、写真が出てきた」とのことで、その写真をいただきました。

[Slide 4] 野依先生がノーベル賞をもらったのを機に、あの人の出身は灘高なので、灘高で話したんだか、中学生か高校生に話したときに使ったパワーポイントを僕のところに送ってくれたんです。だから写真の説明文は私が書いたんじゃないくて、野依さんが神戸で話したとのものです。



途中ハワイに立ち寄った
左から二人目 湯川秀樹博士 (32才)
三人目 野依金城 (父, 28才)
四人目 野依鈴子 (母, 24才)

[Slide 4]

そうでしょう。確かにこれ（左から2人目）は湯川秀樹です。

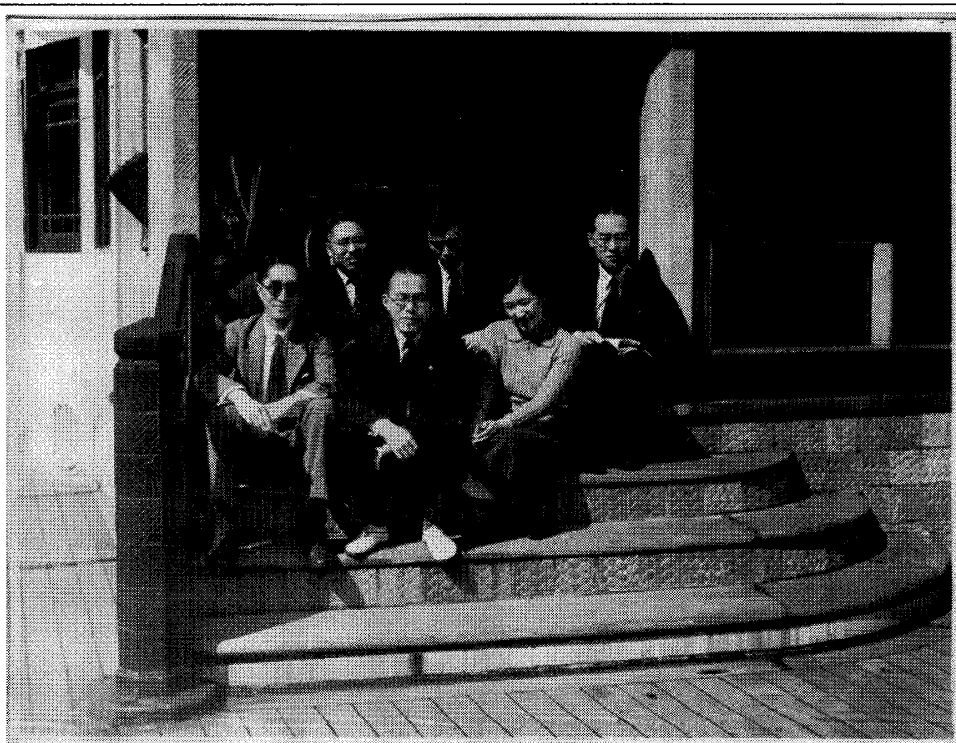
この人（左から3人目）が野依さんのお父さん、「かねき」と読むらしいのですが、新婚間もない時期のようです。こっちらが若いお母さん、24歳。これは昭和14年。その頃、ずいぶんハイカラな人がいたんですね。これはハワイでの写真です。だからサンフランシスコから日本に来るときのもの。

[Slide 5] 京大の展覧会ではこの1枚だけ展示しましたが、ここは船の甲板のようです。これ（右端）は湯川秀樹、これ（前列右側二人）がお父さん、お母さんです。

行くときも一緒だったらしいのですが、帰路、特にサンフランシスコから横浜に着くまでのときに、非常に親しくなったらしいです。行くときも、神戸で一緒に乗ったので知っていたようです。野依良治さんから聞いた話ですが。

[Slide 6] その頃でもハイカラなものですね。鎌倉丸でのパーティとかの写真でしょうね。

[Slide 7] この集団写真もたいへん面白いです。湯川と野依がこのへん（左奥）にいますし、奥さんはちょっと離れています。これなんかは面白いな。ここ（右端奥）に突っ立っているのが、のちの社会党委員長、浅沼稻次郎。彼がなぜここにいるのかというのは、さすが、私もまだ調べていないのですが。



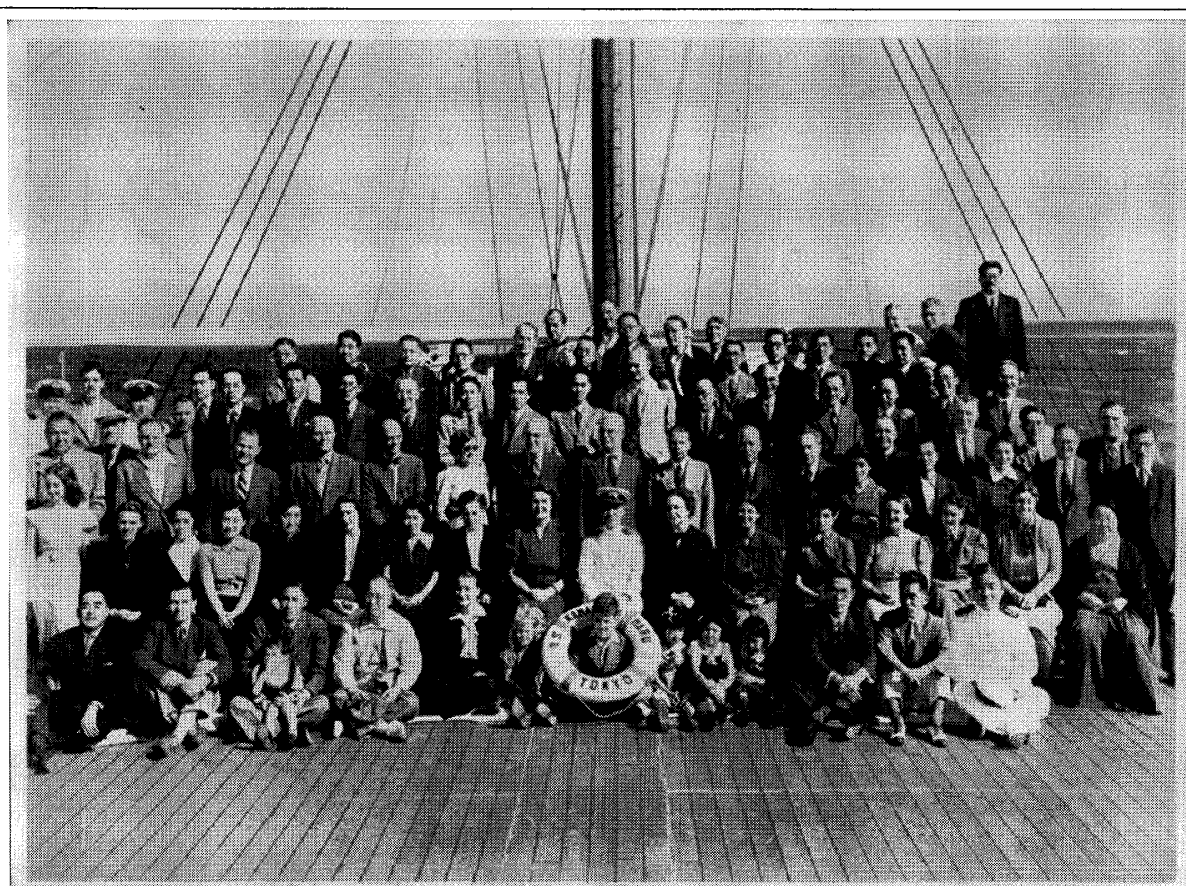
鎌倉丸にて、「靖国丸」組（同船は同年6月30日神戸港発、8月2日ナポリ港着、そして8月26日ハンブルグ発、19日後ニューヨーク着
右端、湯川秀樹博士
二人目 野依鈴子、三人目 同金城

[Slide 5]



鎌倉丸にて、ティーパーティー

[Slide 6]



鎌倉丸乗船客記念撮影

二列目左から四人目 野依鈴子
四列目左から五人目 野依金城、六人目 湯川秀樹博士
最後列右端に後の社会党委員長・浅沼稻次郎が見える

[Slide 7]

湯川「アメリカ日記」 ローマから、アメリカ毎日

コロンビア Fermi, Rabi, Stern, Nordsieck, Urey, Szilard

プリンストン Einstein, Wigner, Wheeler, Neumann, White, Ladenburg

ジョージワシントン Tuve, Gamow, Teller

Harvard Van Vleck, Furry, Street, Kemble

MIT Slater, Morse

シカゴ Rossi, Compton, Dempster

ミシガン Laporte, Ulenbeck, Goudsmit, Crane

CalTech Neddermyer, Anderson

UC-B Oppenheimer, Lawrence, Schiff, Kusaka, Brode

セミナー様子

[Slide 8]

[Slide 8] この辺で、だんだん今日の物理の話に入っていくんだけど、湯川はローマに着いてから様子を記した「アメリカ日記」というのを公表している。特にニューヨークに着いてから

サンフランシスコを発つまでは、毎日、相当のボリュームの内容を日記を書いているのです。それを見ると驚かされます。急に Solvay 会議がキャンセルになって、旅行スケジュールが滅茶苦茶になったのですから、何のアポイントもなくアメリカに行ったわけです。日本を発つときから、いろいろなところに手紙を出して準備した旅行じゃない話です。それでいて、各地の大学を訪問して、これだけいろいろな人に会うわけです。

コロンビアでは Fermi, Rabi, Stern, Nordsieck, Urey, Szilard, プリンストンでは Einstein, Wigner, Wheeler, Neumann, White, Ladenburg,... Tuve, Gamow, Teller, Van Vleck, Furry, Street, Kemble, Slater, Morse, Rossi, Compton, Dempster, Laporte, Ulenbeck, Goudsmit, Crane, Neddermyer, Anderson, Oppenheimer, Lawrence, Schiff, Kusaka, Brode. どうですか。これ全部、次の訪問先を次々決めて行ったんです。行った先の学者が次の訪問先に口を利いてくれたのかもしれないが、とにかく自分の滞在予定にこれだけ効率よくアレンジしてある。このとき湯川はまだ 32 歳です。最初のアポイントメントとりには、船の中で友だちになった、英語の達者な商社員とかを使って電話をさせているんです。だって初めて外国に行ったときですから、僕らでも初めて外国に行ったとき電話は特に難しいんですよ。それを全部、アポイントメントを取って、わっと乗り込んで行って、重要人物に全部会っている。

この大胆不敵な実行力に驚くのもさることながら、要するに世界の物理学者がみんな、無理してでも、ユカワとはどんな人物か見たかったということ。それだけ名前が轟いていたということです。みんな都合をつけて、それで湯川と会うのです。このなかには、その頃もう学部長をしているような人間も、若いのもいますけれども、これだけ多くの人間が会う為に彼の前に出て来てるのです。そこでどういう会話をしたか、実験の見学をしたか、全部書いてあります。これはぜひみなさん、読んでください。(湯川秀樹著作集(岩波書店) 7 巻 156-211 頁、この全集は生誕百年記念で 2007 年に再販された)。

特にパークレーでの Oppenheimer のときなんて、いっぱい人を集めてセミナーをやっている。Oppenheimer はこの頃まさに中間子論に興味を持って研究やっていた。Oppenheimer は原爆の父として戦後直後から超有名になったから、いち物理学者というだけでなく歴史上の重要人物としていろいろな伝記が書かれている。その中にはこのときに湯川が来た場面を書いたものもある。この頃は湯川は英語があれなので、湯川が話し始めてもたもたしたら、あとは全部 Oppenheimer が引き取って、今日の話はこういう話だと話してしまってた終わったという。Oppenheimer が主人公の伝記本ですから、それぐらい頭の回転の早い男だったみたいなことを物語る挿話として、湯川のこの時の訪問がだしに使われたりしている。

とにかくこういうふうに歴史の残る旅行なわけで、当時の名だたる物理学者と会っているということは世界のユカワに脱皮する重要なものだった。

この訪問先の一人が Einstein です。そこが今日の私の話の始まりなんだけど、1939 年 9 月 21、22 日、ニューヨークから 2 回プリンストンに行きます。2 回目はそのままワシントンに行きます。

朝早く、7 時 15 分に起きて、Pennsylvania Station に行き、蓮沼君と一緒にプリンストンに行く。初めての海外で英語も十分でないから、船で友達になった商社員とか外国になれた連中の助けをうまく使っているんです。プリンストンに着いて、昼食を済ませて、ファインフォールに行き、プロフェッサー Wheeler を訪ねると。しばらく待つうちに、昼食から帰ってきた Wheeler が、早速 Einstein, von Neumann, Weyl, Wigner に電話をかけてくれた。

なんかもう、わけがわからない程のビッグネームです。想像するに、ナチスによるヨーロッパからの亡命で、これだけの大学者がプリンストン辺りにはコンデンスしていたということなんですね。すごいですね。

しかも、これらがみな湯川を見に会うんです。

それで云々かんぬんで、他の大学でもそうだが、けっこう実験装置なども案内されておりますが、そこは省略。

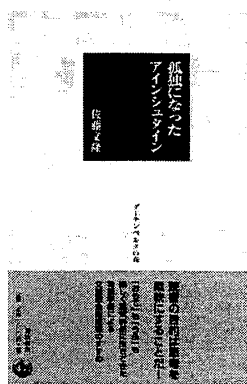
Wigner は人を出迎えに行ったが、Wheeler は Einstein の私宅に電話をかけてくれて、すぐ会うことになり、ファインホールから、とにかくマーサストリートの家に行ったと。たいして立派でもない家の 2 階の書斎に通された。そこはなんとか、もう一人客がいたけれども、自分のほうが先で、あいつは待たされたと。

Einstein の風貌は写真で見た通りであるが大分老境に入ったように見える。Prof. Okaya の事や、日本へ来た時の思い出などを聞く。彼に相対性理論と量子力学との関係を聞くと彼は相変わらず後者が *incompletely described picture* に過ぎぬという。例えば dynamics から acceleration という概念を去り position と velocity だけを考えると、statistical law しか得られない、などと語る。何だか遠い昔の世界へ引戻されたような不思議な気持ちになる。しかしその眼には何ともいえない親しみ深みがある。

(1939年9月21日 曇後晴 ニューヨークープリンストンの一部)

若き日に忘れしはずの老荘のよみがえりくるわれを怪しむ
下鴨の家に移りて、1957年

[Slide 9]



2004年2月発行

[Slide 10]

[Slide 9] 「Einstein の風貌は写真で見た通りであるが大分老境に入ったように見える。Prof. Okaya の事や、日本へ来た時の思い出などを聞く。彼に」。ここが私の今日の話の主題であります。湯川が Einstein に「相対性理論と量子力学との関係を聞くと彼は相変わらず後者が *incompletely described picture* に過ぎぬという。例えば dynamics から acceleration という概念を去り position と velocity だけを考えると、statistical law しか得られない、などと語る。何だか遠い昔の世界へ引戻されたような不思議な気持ちになる」、ここが面白いところですね。若い 32 歳の湯川ですから、まだ量子力学に文句を言っているような奴がいるんだと「不思議な気持ち」になったのでしょうか。

ここで Einstein に質問した「量子力学と相対論」というのは、何も場の量子論の発散の困難とかじゃなくて、ましてや一般相対論とかではないです。あとで言う EPR のことです。物理の作用が c 以上では伝わらないのに、遠隔的に、瞬間的に量子状態が correlate しているという、あの話です。相対論というのは、 c 以上で伝わらないという意味です。

逆に言うと、後でも触れますが、湯川はそういう問題をちゃんと知っていたということです。Einstein に会ったら、それを聞いてみようと思っていた。

「何だか遠い昔の世界へ引戻されたような不思議な気持ちになる」という表現の裏にある気持ちは「このおっさんは遅れている」ということで、アインシュタインを哀れんで、馬鹿にしているわけですね。そういうことでしょうか。「遠い世界に引戻された」。「遠い」と言っただけで、湯川はまだ 32 歳ですよ。湯川、朝永が学部に入るのは 1926 年です。ちょうど量子力学がカミングアウトするという時代でした。学生として必死に量子力学を学んで、量子力学を使って必死に世界のフロントにやって来たのです。そして物理学の神様アインシュタインの前に立ったのです。

しかし、「しかし」と言っているんだから、これは Einstein に哀れみを持って見ているわけです。「しかしその眼には何ともいえない親しみ深みがある」。遅れてはいるが親しみのあるいい人だったと。ちょっとずれているけれども、湯川のこの出会いはその頃の Einstein を describe した証言としては、第一級のものなんじゃないかと思います。

次の日、またニューヨークのホテルにいたまま、プリンストンに行きます。この日に Wigner と Neumann に会います。伏見、中山、角谷君などの噂が出るという。フシミ関数ですかね、伏見さ

んの名前を、Wigner, Neumann というあたりが知っていたみたいです。

Einstein はこのとき、1939 年にはすでにこういうふうに物理学主流から外れた状態だったわけです。

[Slide 10] そうだったのか、初めて知った、知らなかったと、いう人は、私の本を買って、ちゃんと読んでください。

孤独になったアインシュタイン

- ユダヤ人、ナチスドイツ
- 無国籍(コスモポリタン)者として第二次大戦での科学者と国家
- 原爆、愛国者ブランク
- 家族
- 物理学上のずれ
- 量子力学の不承認
- 原子、核、素粒子物理学への不参加

[Slide 11]

[Slide 11] Einstein が量子力学に反対していた。もっとも「孤独になった」のには、僕は三つほど理由があると「孤独になったアインシュタイン」という僕の本に書いてあります。一つは亡命して慣れ親しんだドイツ語の付き合いから遠ざけられた。英語はできたようですが、やっぱりストレスだったでしょう。ベルリン時代の友人もなくなったわけだから。こういうナチスドイツにの時代に巻き込まれた孤独がまずあります。

次には家族問題的にも彼は晩年、非常に孤独です。離婚していて、最初の奥さんとの子どもである長男はアメリカのバークレーに移住していましたけれども、絶対に会わなかった、憎んでいたわけですから。離婚したミレーバと次男が、晩年、悲惨な生活で苦勞するのですが、欧州大戦であれだけの社会変動があったわけだから仕方ないともいえるが、それを十分カバーしなかったとして、長男はアインシュタインを憎んでいたということもあります。

こういう時代に翻弄された「孤独」もあるが、「孤独になったアインシュタイン」というときの孤独の原因は物理学の学界主流からの「ずれ」による孤立をさせています。アメリカ人の若い人は誰も彼の回りに来ないわけです。若い人は量子力学を必死で勉強し、就職して、量子力学で食っていけないといけないのに、Einstein のところに行ったら、「お前は、あんなものを信じるのか」と言われたらどうしようもないから、寄り付きにくいわけでしょう。

[Slide 12] 時代はずっと下がって 1965 年、もう自身晩年ですが Oppenheimer がプリンストン研究所のあるセレモニーで、「アインシュタインの晩年 25 年ほどの間、彼が従った伝統は彼を誤らせた」と言っている。「晩年 25 年」というのはアインシュタインが 50 歳以後ということなのです。「50 歳以後、もう呆けていた」、間違っていたというわけです。「それは彼がプリンストンで過ごした時代のものであり、悲しいことだがそれは内緒にしておくべきことではない」。確かに、この当時、一般相対論が流行りだす前ですから、物理のヒーローといったら Fermi や Heisenberg とかで、Einstein というのはなんとなくずれていた。アインシュタインの名は量子力学の「隠れた変数」説とかと引っ付いていた。「彼は自分のやり方で考える権利があった」という Oppenheimer の発言は当時の雰囲気をよく伝えている。

具体的にどういう意味で、Einstein はずれていたかということ、一つはこれです。なにしろ当時は素粒子、原子核にあらずば人にあらずみたいな時に、それにそっぽ向いて統一場の理論みたいなこ

オッペンハイマー 1965

「しかしアインシュタインの晩年 25 年ほどの間、彼が従った伝統は彼を誤らせた。それは彼がプリンストンで過ごした時代のものであり、悲しいことだがそれは内緒にしておくべきことではない。彼には自分のやり方で考える権利があった」と語っている。

「誤り」は

1) 核・素粒子物理学を無視した統一理論

2) 量子力学への反対の態度

しかし

1) は 70 年代末のゲージ理論で逆転劇

2) も EPR の entanglement が、反転した意味で、再興

アインシュタインの論文で最高のサイテーション！

[Slide 12]

とを言ってる。もっとも、結局はこの Oppenheimer の発言以後十年ほどして、統一場理論がゲージ理論の先覚者だったみたいで、逆転劇になるのですが、それは当時は見えなかった。

誤りの次はやっと本題のこの EPR です。最近の研究評価は論文の引用度数サイテーションでまわるようだが、いま Einstein の論文をサイテーションで評価すると、最高は EPR 論文とでるそうです。だから「Einstein は何をやった人か？」という問いに対する答えは「EPR の論文を書いた人」というふうになるんです。昨今のサイテーション主義でいうとこうなる。光子や相対論の論文はもういちいち引用しないからだろうが、逆に言うと EPR の論文は最近盛んに引用されているという現在進行形なのである。科学史ではない現在の生々しいある種のブームになっているということです。

無関心ではない

“相対論について語るときは彼は不熱心だったが、量子論については情熱的だった。量子は彼のデモンであった。ずっと後になって知った話したが、アインシュタインは、友人のオットー・シュテルンに、かつてこういったことがあった。「私は一般相対論についてより100倍も量子論について考えた」。私自身の経験からも、この言明には別に驚かないと付け加えることができる。”

アブラハム・パイス著「神は老獺にして…」

西島和彦監訳、産業図書

[Slide 13]

1927 コペンハーゲン解釈 使うにはOK

BE論争:ボーアはアインシュタイン封じ込め係り、カリスマの影響が若い俊英達に感染しないように、

ハメルーンの笛吹き

(33年 ナチス政権、39 大戦)

1935 EPR、シュレーディンガーの猫

(原子分光、32中性子、35ユカワ、38核分裂、45広島)

1957～「多世界」、「宇宙の波動関数」

隠れた変数、ボーム、ベル不等式、

～1980 アスペ実験、entanglement事実



(85)1995～ ドイチュ、テレポテーション、ショアのアルゴリズム

[Slide 14]

[Slide 13] Pais が書いた分厚い Einstein 伝記があります。「相対論について語るときは彼は不熱心だったが、量子論については情熱的だった」と、Pais がおそろおそろ、プリンストンで Einstein に会いに行ったときの印象を書いている。それで「ずっと後になって知った話したが、アインシュタインは、友人のオットー・シュテルン（シュテルン・ゲルラッハのシュテルン）に、かつてこういったことがあった。『私は一般相対論についてより 100 倍も量子論について考えた』。私自身の経験からも、この言明には別に驚かないと付け加えることができる」。必死になって反対していたという、要するに、不満をちらっと言ったとかじゃなくて、情熱をかけて反対を考えていたということです。

[Slide 14] ところで時代をすこし遡って 1927 年に、ボルタ生誕 200 年とかいう会議があった。これがコモ湖での夏の学校の始まりなのですが、ムッソリーニの官僚の発案でこの式典があった。コモ湖ゆかりのボルタに引っかけて、ムッソリーニ政権の権威づけも狙って大国際会議を開くのです。それにたくさん物理学者が集まった機会に、Bohr は Heisenberg, Schrödinger, Dirac, Born, Jordan などの量子力学理論はあれでいいんだという手打ち式するんです。Einstein もそこに招待されてしゃべることになっていたけど、もう当時は、ナチスからのアインシュタイン攻撃は実力行使まであって、身に不安を感じて出席しなかった。

その直後に今度は Solvey 会議があって、Einstein も出席し、そこで Bohr と激突した。これが Bohr-Einstein 論争の発端ですが、あの論争を僕は、Bohr が若い人間に Einstein の fundamental 病が伝搬しないように、同世代の Bohr が Einstein のガス抜きをやったのだと思っています。Bohr が封じ込めて若い人に影響を与えないようにした。だからこれは学術政策上の一種の思想善導策であったと僕は最近言っています。その Bohr の思想善導策はある意味で成功して、量子力学は原子、分子、そのうち原子核、ニュートロン、中間子と、順調にスタートしたのです。

そういう洋々たる新物理学の台頭の片隅でこういうものがあるわけです。いわゆる Einstein-

Podolsky-Rosen という論文です。みんなユダヤ人です。一番若い Rosen には 1977 年、会ったことがある。Rosen が言い出して、Podolsky が原稿を書いて、Einstein は首を縦に振ったといわれています。この経過は、町田（茂）さんが訳している、アーサー・ファイン著『シェイキーゲーム』という本に詳しい話が出ています。当時、Schrödinger はイギリスに亡命した直後ですが、すぐに Schrödinger が Einstein に手紙をよこすのです。その Einstein-Schrödinger 書簡というのは、何通も残っていて、いわゆるネコの話というのは、そのときの一つなのです。その後『Naturwissenschaft』に、その話が載った。『シェイキーゲーム』によると、そのとき Podolsky が『New York Times』へ Einstein が量子力学は間違いだと発表したと新聞記者に告げたので、『New York Times』の一面を飾ったことがあったらしい。それからは Einstein は Podolsky と話をしなくなっただけ。Schrödinger-Einstein 交換書簡、面白いものだが、いずれにしろ、そういう話は物理学全体の話にはならなかったのです。

ところで、最近、坂東さんに「EPR を勉強してる」とか言ったら、「それをやったら就職できますか」って聞かれたとか言ってたけど、なんとなく量子情報とか言うと、就職できるようなムードになっている。いつの間にか、「危ない問題」が物理学から離れた別のところで一種の流行になっている。東大の物理教室に女性教員が一人いますけれども、分野的にはこの人です。（佐藤）勝君がおるから思い出したが、甲南大学での話です。この前の 3 月で私が甲南大学も定年だということで、経営学部の教授の方が私に会いたいとか言ってやって来られた。息子さんが東大の物理にいて、大学院に行きたいと言ってる。それで「佐藤勝彦先生のところなどに行けばいいと思っていたんだけど、なんとある女性の助教授のところに行くと言う」。

佐藤：村尾さんね。

「その人の研究室に行くとか言っているが、見当がつかないその研究分野は大丈夫なんですか？」と聞きに来られたのです。女性問題、お茶の水出で、東大出じゃないという権威主義、いろいろなものが混じっているんですが、馴染みのない研究分野への不安が第一です。新参の分野ということも絡んだ、難しい人生相談です。EPR はこの様に、非常に生々しい話です。とにかく、それで、息子さんは彼女のところに行ってみたみたいですね。僕はどこかで村尾さんに会ったときに聞いたら、そう言っていました。

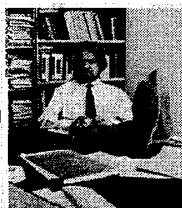
この 1960 年前後というのは、一度、量子力学の基礎が話題になった時期なのです。プリンストンでは、宇宙の波動関数というのが研究された。De Witt と Wheeler はメトリックを変数とする Schrödinger 方程式に対応するものを書いて、宇宙の波動関数がしたがう Wheeler-De Witt 方程式をだした。

その波動関数の解釈問題が起こった。宇宙には外部がないわけですが、観測者という外部がないときの波動関数の解釈という問題である。観測者がおったら、そいつも宇宙にいれんといかんのだから、外部がないという conceptual な問題が起きた。それで Everett という学生が、いわゆる多世界解釈というのを言うわけです。Wheeler と De Witt は後にたいへん encourage して、単行本を出したりしています。けどさすがにその頃は、そいつは物理の学界では生きられなくて、Wheeler の最近の伝記を読むと、Everett はその後、国防省に行って、ソ連向きのミサイルのソフトウェアは、だいたい彼が書いたんだと書いています。量子力学に異を唱えるものはまともに生きられない時代でした。

当時はさらにボーム理論とかベルの不等式とかも出された量子力学の基礎がちょっと話題になった、詳細は省略ですが。

ちょうどその頃、僕は学部生でした。量子力学研究会とかいうのと 4 回生でやっていて、僕と高田君がそこへ出ていた記憶がある。Bohr をドイツ語の海賊版で読んだことがあります。

1957 Everett, many-worlds	
1964 Bell's inequality	
1969 Clauser-Horne-Shimony-Holt CHSH	
1982 Aspect, Dalibard, Roger et al experimental	
1985 Deutsch, many-world=parallel computing	
1993 Benett, quantum teleportation	
1997,8 squeezed light	
2004 atom	
1994 Shor's algorithm for factorization of large number	
1998 2-qbit	
2001 7-qbit,	



[Slide 15]

アインシュタインも信じられなかった「不思議」
「不思議を使う」のが技術

ハイテクで操れる時代

量子計算、量子通信、量子暗号、..
21世紀のテクノロジー

- ・ 微細加工の進歩
デコヒーレンスの抑制
単光子、単スピン、単原子レベル、メゾ状態、...
- をビット情報のせる
- ・ 多ビット へ

[Slide 16]

[Slide 15] 年表的にはこうですね。この1960年代の初め、このあたりになると、最近、量子情報理論で話題の仕事も登場する。しかし物理の人はあんまり知りませんね。EPRの問題提起をうけた hidden variable の可能性の考察の中で Bell の不等式というのが提案される。それが1980年前後にレーザー技術の発達で検証実験ができるようになり、Aspect というのは実験屋が EPR の反論を否定するかたちの結論をだす。

というので、Einstein の不満を解消するような hidden variable theory は、アウトになった。「Einstein さん、残念でした」という話なんです。EPR 論文がすごいサイテーションを稼いでいるということは、そこで終わらないところが根源病のすごいところですね。実験によって「はい Einstein は間違っていました、一巻の終わり」とはなっていないのです。

いまの量子情報の専門家というのは、確かに就職はいいですね。もともと NTT の研究所にいて、その後は総研大学の教授かになって、つい最近、阪大の基礎工の教授になった、井元さんという人を知っている。このようにメジャーな大学へ進出してこれるといことは分野に勢いがあるということなんでしょうね。井元さんと梅田で飲んだこともあり、いろいろと量子情報業界のことを聞くんですが、

EPR というのは量子力学に反対した論文だといいました。ところが、いまの量子情報とか量子通信とかで勢いのある連中は、引用はするが、EPR 論文は読んでない。だから量子情報の世界では、あれは entanglement correlation を提案した論文だというふうに、ポジティブにみんな、捉えているらしいのです。「そうだったんですか、あれは量子力学を反対していたんですか」と。

いずれにしろ、Einstein はこんなことはあり得ないから、量子力学が間違っているといったが、実験的には Einstein の期待に反して「自然はあり得ない」性質をもてることが確認された。提案したと言えば提案したわけですが、賭けには負けた。

だけどそんな重要なこととして1980年頃に Aspect 達の実験が、僕らの耳に、すなわち僕ら正統派物理学者の世界で認識されたのでしょうか。聞いていても、たいした話じゃなかったんでしょうね。

ところが冷戦崩壊後、急に正統物理が景気が悪くなったあたりと連動して、このへん（1993年）から急に量子計算とかいう言葉を聞くようになります。因数分解の Shor の algorithm とか、活気がでたら、通産省でプロジェクトを立ち上げたりして、とにかくお金が出るようになる。

この Deutsch という、このへんはまだ物理屋のほうの流れです。Shor とかは情報の方ですよ。技術というのは「不思議を制御」することで、「不思議だ！」といって悩む物理学者とは違うんですね。

藤井：これは単に algorithm を言っただけですか？

佐藤：当たり前です。そんなことも知らないようじゃ、だから物理学者はだめだと言われるんです。

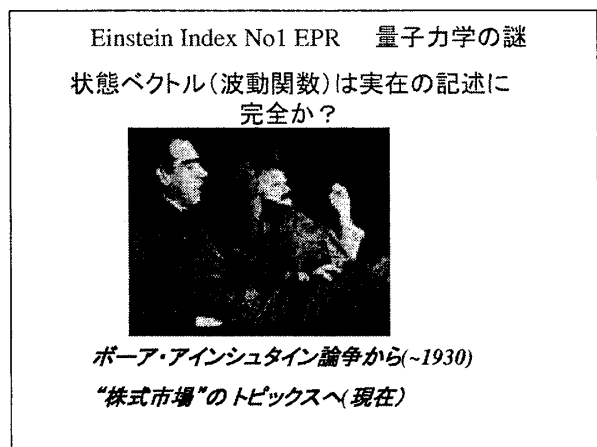
それで実際にハードウェアのほうが、こう。これがなにしろ 100 ビットとか何百ビットまでいかなければ、いまの計算機にはいかないんだから。

[Slide 16] とにかく、そういうふうに Einstein も信じられなかった不思議で、不思議だなと言っているような物理学者ね。不思議なら使えばいいじゃないかというのがテクノロジー。そうでしょう？ 電気なんて、僕は慣れているけど、それは不思議だったと思うね。何もないのに伝わってくるとか、電磁波の影響は健康にあれだとか。そういうふうになって、それでハイテクで、ここは物理です。このへんのハイテクノロジーの、いわゆる物性のほうの物理の進歩がなきゃ、実現できないんだけど、もう先の先をいつているわけです。量子計算の理論というやつは、それをこういうものだと言われて、お金は先物買いで出ているわけです。

もちろん、一番いまご質問があったように、ハードウェアをつくるのはとにかく大変で、だけど何と云うか、主従関係が変わっちゃったわけでしょう。なにしろ量子計算の理論屋みたいな人が、ぱっと、こんなことが可能だという理論、アルゴリズムといってもいい、をだす、そしてそれを実現するハードウェアをつくれなは物理屋がだめだからと言われる立場になる。命令する主従関係が変わっちゃったわけだから、おまえらもっと頑張れと、こんないいスキームがワークしないのはお前たちのせいだと。実験の動機での主従逆転といえる。



[Slide 17]



[Slide 18]

[Slide 18] だから Bohr-Einstein 論争から、いまや株式市場のトピックスへ、こうなっちゃったんです。

これが Einstein-Bohr の。この頃、煙草がなければ、ああいう論争というのはなかったんじゃないかと思えますけれども、もうもうとしてやっていたんだと思えます。

これ[状態ベクトル(波動関数)は実在の記述に完全か]が EPR の論文の表題です。

[Slide 19] 湯川、朝永がこういう量子力学基礎問題にどういう態度を取っていたか。さっきの Bohr 思想善導策が功を奏して、だいたい量子力学を使って物質世界を探究する物理が急進展するわけだから、湯川も忙しかったわけだし、湯川・朝永・坂田というホットディスカッションで忙しい。

戦争中、東京爆撃、終戦直後、研究交流が途絶えた時期、両方とも量子力学の基礎に沈潜して深く考えていますね。書いたものはこのへんとか、「光子の裁判」とかいうものも、この中に全部あります。この湯川のこれ(「自然」の連載)は、ずいぶん長い連載ものです。EPR もちゃんと論文をサイトして、Einstein-Podolsky-Rosen と略さないで書いて、論じている。それから Schrödinger のネコという話も、『Naturwissenschaft』の元論文をちゃんと refer して、単にお話的ではなくて書いています。

例えばこれが湯川の 3 番目が、ちょっと前の論調と違って、自分でも違うという。いまで言うと、

情報学的な発想に移っていると思われます。

戦中、終戦直後 孤立・沈潜期のYT

湯川
「観測の理論 I、II、III」
「自然」1947年11、48年3、7月号
41、43年

朝永
「量子力学の世界観」1949年

[Slide 19]

図5

6 人間の立場の二重性

[Slide 20]

[Slide 20] 終わりのほうなのですが、「人間的立場の二重性」という項で面白い議論をしている。こういうのはこれ以上説明する時間もないから、まだまだあるのだらうと思います。ぜひお読みください。

で、こんな絵が描いてあります。ここでちょっと、この前までの Schrödinger のネコの話と、EPR の議論、それからもとの2スリットから始まって、云々かんぬんというものの、トーンがここで変わって、要するに「観測」というよりは、人間の情報の処理の仕方みたいなことに話がおよぶのです。だからこういう量子力学の状態、熱力学をもってして、議論しているわけですが、「測定値を知らぬ観測」とか「測定値を知る観測」とかを区別して論じたりしています。興味があったら、ぜひ読んでください。

「量子力学雑感」
・1957年 雪解け Fock→Bohr
ソ連公認
・Bohm, Viget
Everett, Bell, Wheeler, DeWitt

坂田「量子力学の解釈をめぐる一肝心なのは解釈することではなく、変革することである」
「科学」(岩波)1959年

1997年 青土社

[Slide 21]

量子力学の3要素

A) プランク定数 h 「作用」に最小量子
1900 プランク 黒体
1905 アインシュタイン 光子、比熱
1911 ボーア 水素原子

B) 状態ベクトル+作用素: ヒルベルト空間
25-27 ハイゼンベルグ、シュレーディンガー、ディラック

C) 測定(観測): Collapse=認識=射影
27 コペンハーゲン解釈

[Slide 22]

[Slide 21] 戦争が終わって2、3年すると、湯川、朝永は、また忙しくなります。

さっきの、僕が学部生の3、4年生だった1958、9年頃、ちょっとした量子力学ブームがありました。僕が覚えているのは、基研に Viget という、ドブロイの弟子だとかというのがフランスから来ていて、それが、いまで言う Bohm 流のというか、ああいう実在的な理論をいった、僕も聞いたことがあります。それから現在残っているのだと Everett の多世界とか、Bell の不等式とか、全部1960年代プラスマイナス2、3年のあたりで、ちょっと国際的に量子力学ブームがあるのです。

それがなぜその時期かというのは、今日は時間がないのですが、スターリン死後の冷戦の雪解けで、ソ連の科学教育の態度が変わったとか、Fock と Bohr が会って、量子力学実証主義哲学批判と

いうのをないことにした、とかいろいろ面白い話もある。

ソ連にも玄人的にはみな量子力学で仕事していたわけだが、哲学的には、あれはマッハ主義だといって批判していた。しかし現実の成功でその主張にも無理が祟っていた。それで、スターリン後の雪解けの流れの中で、ソ連の大御所 Fock が登場して批判打ち止めを宣言した。それに連動して、フランスの左翼などが、急に量子力学を再び論ずるみたいなことがあったりした。その辺りのことは私の「量子力学のイデオロギー」をぜひお読みください。

あの頃、岩波の雑誌『科学』が量子力学の特集をしたことがある。国内の物理学者の提案でなく、外国の文献を見て世界をみている人の提案だと思う。物理学を研究してる人ではない。僕はそのときの『科学』を買ってしまっても持っています。

そこで坂田昌一が登場します。「量子力学の解釈をめぐる」。これは関心もないのに頼まれて書いたものようである、岩波の編集部から、世界のあちこちで量子力学がブームのようだけど、と言われて。明らかに坂田さんは苛立っている。なぜそんなことをいま頃言うのか。肝心なのは…、これはちゃんと副題ですよ、副題のほうが長いけど、「先生、なんか書いてください」と言われて、むっときたのでしょう。で「肝心なのは解釈することではなく、変革することである」と高らかに宣言する。

要するに「坂田は極めて明快に」、(これは私のさっきの本)、「問題を捉えていた。唯物弁証論から見て、批判されるべきは von Neumann が述べた二つの…、一つは対象と測定器の境界、それからもう一つは、隠れた変数非存在証明の根底にある。これは実証主義の誤りで。」もちろん坂田から言わせると、「肝心なことは、解釈することではなく、変革することである」と盛んに言っています。

物理学では、物質世界の解明が、原子、原子核、素粒子と、着々と進歩するにしたがって、量子力学も変わっていくかもしれないという立場を書いている。そのなかで、武谷三段階の実証が重要になった。Einstein のように、理論が完全かどうかなどにこだわるのは意味がない。議論の枠組みよりも、ハミルトニアンをどう実践的に書くかが問題である。そこで、新しい実体、隠れた変数が発見されたり、そして量子力学の次にくるものへと発展していくのも当然で、そういう方向だから、そういう人が何とかをやっていけば、ひとりでの overcome するものだ。コペンハーゲン精神は、いまや保守反動のコペンハーゲンの霧であると。そういう、明らかにこの文章は苛立って書いているのです。

学生だった僕も物理学の「不良」になりかけていたわけですが、坂田はそういう不良たちに喝をいれたのである。坂田こそ思想善導の恩人ということです。

要するに、「坂田の文章は、そこが物理の主戦場ではないと言いたいのである。少なくとも佐藤(私)は、物理帝国主義の謳歌に心酔していたわけだから、DNA 発見に象徴されるような、広い意味での原子物理学の他の科学への領域に甚大な影響を、そして原子力、電子工学というのを」、輝く言葉でしたよね、この両方とも、「その技術の無限の可能性、そして何よりも知的世界は、いまや物理学を除いて語れないという優位性を実感していた」と。

「私も物理学が世界を変える」、武谷三男の「物理学が世界を変える」という本があったのです。「という社会的な意気に燃えて大学に進んだ」と。云々かんぬんです。

これは僕の文章ですが、この物理の絶頂期ですよ、「1950 年代、60 年代の時期に、この新時代を築いた理論に傷があるなどというのは流行るはずがないし、坂田が位置付けたように、量子力学の解釈問題などは、素粒子の未知の物質の領域に挑む実践のなかで提起されるべきもので、光や原子や原子・分子の基礎として、帝国の反映を支えている量子力学の考え方に、もやもやしたものがあるなどと、愚痴を言うやつは、単に勉強が足りないか、思想教育が足りないか」。そういう時代だったと思います。1960 年代初めというのは、本当にそうだったと思います。

時間がきたのでもう終わらないといけないですね、僕は最近、量子力学の文章をいっぱい書いていますのでそれらを見てください。

h 有限作用量子

- ・ 離散的、デジタル、……
光子、角運動整数倍、離散的エネルギー状態、エネルギー・ギャップ、……
- ・ 状態間の遷移？
途中なし、平均寿命、確率
1917年アインシュタインA, B
単一過程での確率
(集合に伴う確率でなく)

[Slide 23]

状態ベクトル

- ・ 時空上のものでない YT
多体問題→多時間理論
場→超多時間理論
- ・ 重ね合わせ 干渉 経路積分
- ・ 表現の多様性: 基底ベクトル
- ・ 複合系 テンソル基底 ビット情報のストリング
- ・ 作用素、変化はユニタリー変換
- ・ 時空にあるとは時空と作用している

[Slide 24]

[Slide 24] 初期の湯川、朝永の量子力学を勉強してきて多体問題、場の量子論になって、はっと驚いたと両方とも書いている。それはいわゆる波動関数というのは、四次元時空上のものじゃないことです。水素原子をやっていると、1個の電子だからわからないが、2電子になると急に多次元となり、相対論的にやろうとすると多時間となる。だからいわゆる配位空間上のものであって、実空間上のものでないというのに彼らが気付いて、はっとするという、それで湯川は依然としてShrödinger 波動関数を時空上のもので戻そうとしたし、朝永は多時間理論、超多時間理論へと進んだ。

アインシュタインの不満

- ・ God does not play dice
まだ許せる
- ・ “sooky action at a distance”
“telepathically”
絶対許せない！

[Slide 25]

EPR論文

量子力学による実在の記述は完全なうらみか？

物理学の発展は、実験で得られた事実と理論の一致を求め、理論が実験を説明する能力を高めることで進んでいく。量子力学は、20世紀前半に急速に進歩した理論で、原子の構造や光の性質を説明する上で大きな役割を果たした。しかし、量子力学の基礎にはいくつかの問題があり、特にアインシュタイン、ポドolsky、ローゼン（EPR）の論文で指摘されたように、量子力学の非局所性や確率性に対する疑問が提起された。

アインシュタインは、量子力学の確率性を「神はサイコロを振らない（God does not play dice）」と表現し、これは許せる。一方、「sooky action at a distance」（直感的な遠隔作用）や「telepathically」（テレパシー的）な相互作用は、絶対許せない。これは、量子力学が局所的な因果関係を破る可能性があることを示唆している。

EPR論文は、量子力学の非局所性を示すために、2粒子のエンタングルメント状態を考えた。2粒子が互いに干渉し合っている状態では、一方の粒子の測定結果が、もう一方の粒子の測定結果に影響を与える。これは、古典的な物理ではありえない現象であり、量子力学の非局所性を示している。

[Slide 26]

[Slide 25] Einstein の量子力学への不満は二つの言葉で表現される。そのうち確率解釈はまだ許せるんです。だいたい量子力学に最初に確率という考え方を持ち込んだのは、Einstein の1917年の論文です。これはatom の level の transition の、Einstein のA, B というやつです。

ファンデルベルデン編集の量子力学のソースブックという、歴史上、有名な論文を集めた本があります。これはプランクから始まるのではなくて、いわゆるShrödinger, Heisenberg の量子力学のorigin をどこに取るかということですから、プランクじゃないですしBohr も何も登場しない。

ファンデルベルデンが最初に持ってきているのは1917年のEinstein の論文です。それは確率の導入です。その後にクラマースがあつて、Heisenberg マトリックス力学にいくのです。そういう意味で、確率というのはEinstein から始まる。1917年論文というのは、去年の物理年の講演で私

があちこちで言ったように、Einstein と太陽電池とか、Einstein とレーザーとかを結び付けるときのあの論文です。

[Slide 26] こういうものです。

マクロ(古典)的に区別つく性質との相関
遠隔相関 相対論

アインシュタインの箱
EPR
シュレーディンガーの猫



A. Fine "Shaky Game" 1996 2nd
町田 1992 丸善

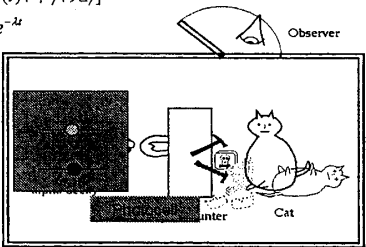


[Slide 27]

シュレーディンガーの猫

原子レベル $[a(t)|上\rangle + b(t)|下\rangle]$
 $t=0$ で $a(0)=0, b(0)=0$ $|上\rangle|生\rangle$ にセット

$t > 0$ では
 $\Rightarrow [a(t)|上\rangle|生\rangle + b(t)|下\rangle|死\rangle]$
 $|a|^2 = e^{-\lambda t}, |b|^2 = 1 - e^{-\lambda t}$



[Slide 28]

坂東さんから、こんな話をしろということで。この話で言うと、この話は一つ、面白いんだけど、時間なのでもうなしでいきます。

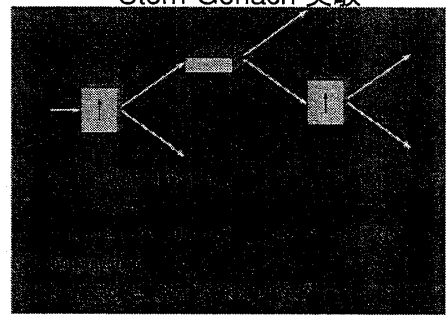
« Entanglement is the essence of the quantum »



- entanglement もつれ、絡み合い、異なったマクロ状態の重ね合わせ捨てられた情報の行き場
- 測定と遠隔相関
- 遅延選択
現象そのものでなく「注目する」相関「ありのまま」でない

[Slide 29]

Stern-Gerlach 実験



[Slide 30]

$$| \leftarrow \rangle | z=0 \rangle | x=0 \rangle$$

$$\Rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}} [| \uparrow \rangle | +z \rangle + | \downarrow \rangle | -z \rangle] | x=0 \rangle$$

$$= \frac{1}{2} [(| \leftarrow \rangle + | \rightarrow \rangle) | +z \rangle + (| \leftarrow \rangle - | \rightarrow \rangle) | -z \rangle] | x=0 \rangle$$

$$\Rightarrow \frac{1}{2} [| \leftarrow \rangle | +z \rangle | +x \rangle + | \rightarrow \rangle | +z \rangle | -x \rangle + | \leftarrow \rangle | -z \rangle | +x \rangle - | \rightarrow \rangle | -z \rangle | -x \rangle]$$

測定無しに世界が分岐 多世界解釈 測定=出会い
 測定でひっからなかった世界の処理「猫の処理」清掃局の問題
 物質、エネルギー保存 熱=散逸=無管理
 情報の保存 相関情報の散逸 相関情報の無管理
 無くなりほしくないことのトラブル 廃棄物、管理漏れ

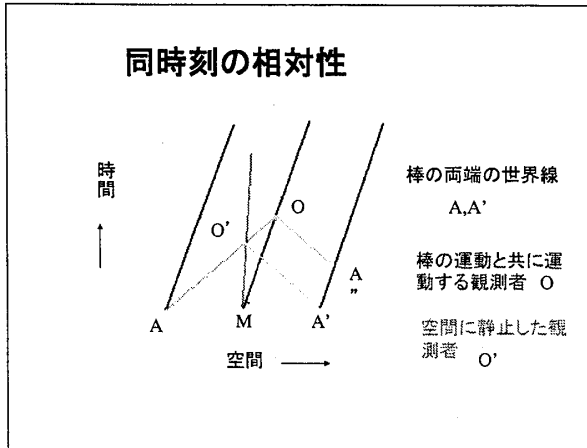
[Slide 31]

遠隔相関と測定

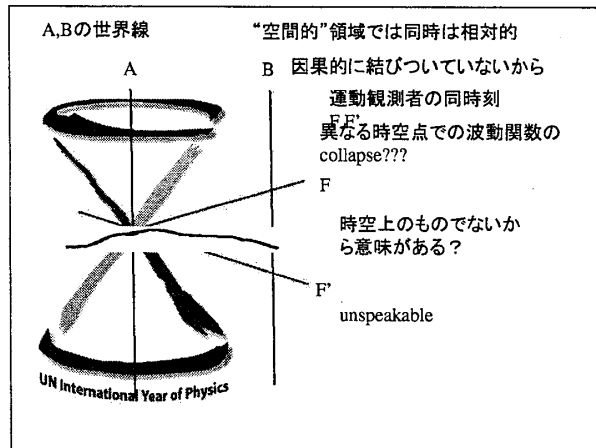
- Einstein-Podolsky-Rosen 1935
Einstein-Schrodinger 往復書簡、猫論文
- 測定の効果が遠隔地点にどう及ぶ
- 遠隔地には時間がかかる(???)
- 決まってることを記述できないのは不完全

[Slide 32]

坂東：もういっぺんやってもらわないといけない。



[Slide 33]



[Slide 34]

Bell's inequality

If extra parameters(hidden variables)

$$C(a, b) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^N A(a, \lambda_i) A(b, \lambda_i)}{N}$$

$$A(a, \lambda_i) = \pm 1$$

$$S = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^N \bar{S}_i}{N} \quad \bar{S}_i = \pm 2$$

$$|S| \leq 2$$

J. Bell "Speakable and Unspeakable in Q.M."

2nd, 2004

量子的相関では

[Slide 35]

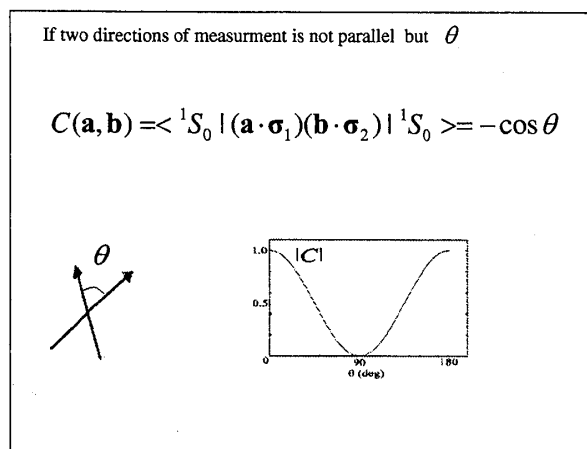
$\alpha_1 = A(a, \lambda), \beta_1 = A(b, \lambda), \alpha_2 = A(a', \lambda), \beta_2 = A(b', \lambda)$

$$\bar{S}(\lambda) = \alpha_1 \beta_1 + \alpha_1 \beta_2 + \alpha_2 \beta_1 - \alpha_2 \beta_2$$

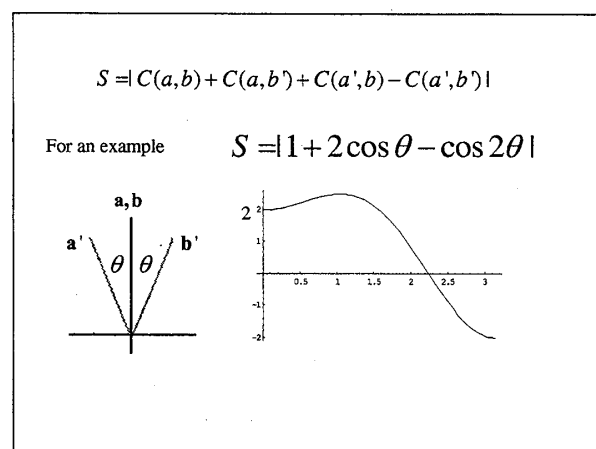
Setting up a table for the possible values of $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$, we obtain:

α_1	$\alpha_2 = +1$				$\alpha_2 = -1$			
α_2	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1
β_1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1
β_2	+	-	+	-	+	-	+	-
$\alpha_1 \beta_1$	+	-	-	+	-	+	-	-
$\alpha_1 \beta_2$	+	-	+	-	+	-	+	-
$\alpha_2 \beta_1$	+	+	-	-	-	+	+	-
$\alpha_2 \beta_2$	+	-	+	-	+	+	-	+
S	2	2	-2	-2	2	-2	-2	2

[Slide 36]

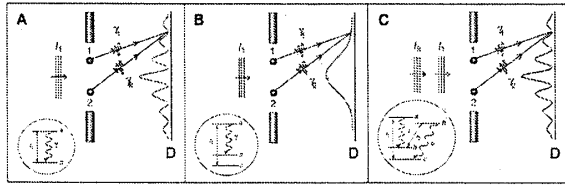


[Slide 37]

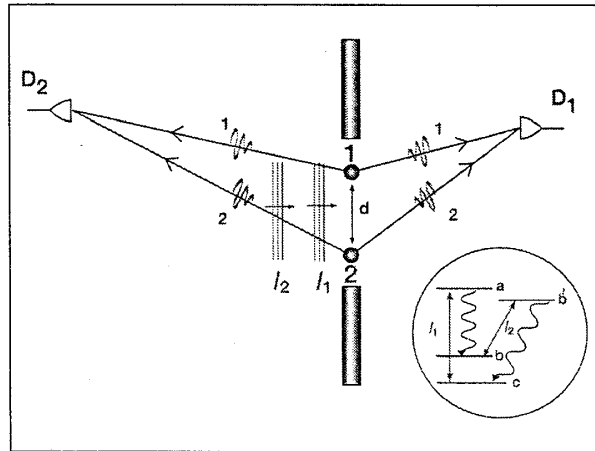


[Slide 38]

遅延選択、消しゴム Which-path?



[Slide 39]



[Slide 40]

Delayed-choice detection

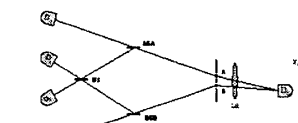


FIG. 1. A proposed quantum eraser experiment. A pair of entangled photons is emitted from either atom A or atom B by atomic cascade decay. "Clicks" at D_2 which-path information and "clicks" at D_1 which-path information.

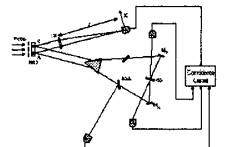
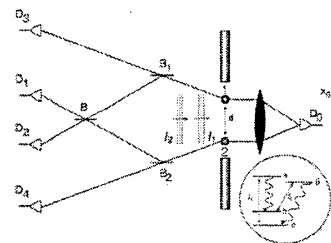


FIG. 2. Schematic of the experimental setup. The pump laser beam of SPDC is divided by a double-slit and incident onto a BBO crystal at two regions A and B. A pair of signal-like photons is generated either from A or B region. The detection time of the signal photon is less earlier than that of the idler.

[Slide 41]

遅延選択、消しゴム



[Slide 42]

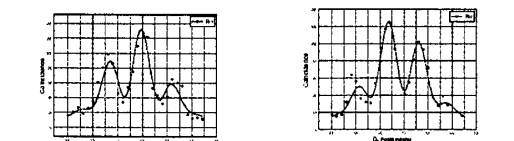


FIG. 3. R_{12} ("joint detection" rate between detectors D_1 and D_2) against the x coordinate of detector D_1 . A standard Young's double-slit interference pattern is observed.

FIG. 4. R_{12} ("joint detection" rate between detectors D_1 and D_2) time, there is a phase shift compared to the pattern in Fig. 3.

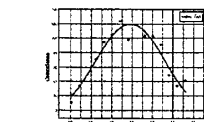


FIG. 5. R_{12} ("joint detection" rate between detectors D_1 and D_2). An absence of interference is directly demonstrated.

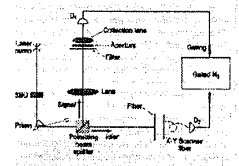


FIG. 6. A proposed quantum eraser experiment. A pair of entangled photons is emitted from either atom A or atom B by atomic cascade decay. "Clicks" at D_1 or D_2 provide which-path information and "clicks" at D_1 or D_2 erase the which-path information.

[Slide 43]

THE QUANTUM ERASER

were performed from the point of view of this book, and then with an eye toward applications in technology, was the (Class) Eraser Experiment. This experiment used the notion of each pair of entangled photons to make the idler, distant member of the same pair help create a "ghost" image at the idler location.¹⁶ The uniqueness of this experiment is shown below.



As we see from the figure, a laser pumps a nonlinear crystal (BBO), producing the SPDC entangled photons, which then go through a prism and on to a beam splitter that splits them based on their polarization direction. Thus, one

CLASSICALLY

are then collected by a lens and detected by a detector. If first detector is linked to a coincidence counter along with the second—which is collecting the twin photons that go through the filter. These twin waves travel through the beam splitter. They hit a filter and a scanning fiber that records the locations on the screen. Only those in coincidence with it that pass through the UMBG spectrum are recorded. They form the ghost image of UMBG on the screen. The above image is shown below.



Thus, using entangled photons, the image UMBG was transported to a distant location by twin photons that went through the eraser, producing a classical "ghost" image.

[Slide 44]

[Slide 45] 要するに、ものになるかどうかわからないけれども、最近とにかく Los Alamos のプレプリントサーバーなどを見てると、量子力学ものの論文がすごい数ですね。たいていは量子計算、量子暗号とかのテクノロジー志向ですが、刺激されて物理学での根源病的問いかけも混じっている。ブラックホールのエントロピーとかで関連する課題が研究されていたので宇宙論屋だった人間も食い詰めてか、そういう世界に移った人間もいる。

とにかくお金が出ているわけです。あれこそハードウェアまでいかなければ、全然意味がないと

思うんだけど、もちろんハードウェアの開発も盛んになったし、理論屋もわっと増えます。韓国なんかすごいです。あまり日本人でその分野で有名な人はいないけど、韓国人はいます。

現象そのものというより解析方法

- 物理屋「起こった、起こらない」に拘る
- 情報屋「どうみるか」うまい見方、うまいとは意味(秩序)・関心を引き出す
- 物理屋「客観的でない!!」
- 情報屋「捨てるべきものは捨てて…」
- 物理屋「ありのまま…」
- 「ありのまま」とわ? 人間とは?

[Slide 45]

量子力学は何の理論か?

- h なしの量子力学 MKS実体
デジタルにするためのもの
もともとデジタルな情報なら不要
- 状態ベクトルでの情報操作の理論
扱うもの 整数、ビット、qビット
絡み合い操作と検索(測定)(π パル

佐藤^ひいま、量子力学とは?」(別冊数理科学 量子の新世紀、2006・4)、「量子力学は何の理論か」(現代思想(青土社)2005・10)、「時間と量子力学」(パリティ、2005・2)

[Slide 46]

物理学者を量子力学は守備範囲であり全部自分のところで手なずけ、生みだしたものは全部知っていると思っていたのに、知らない間に正統物理の連中が知らないことで食っている人間がわっと増えている。戦中、終戦直後の湯川、朝永が心が静かだったときに、これは面白いと関心をもったが思ったけれども、1950年代の物理帝国主義の膨張で忙しかったですからね、彼らは遣り残しになった課題であるといえる。僕ら子供たちは忙しい親父の姿しか知らずに来たのかも知れない。

[Slide 46] 最近、急に私は”量子力学の佐藤”という感じになっている。宇宙じゃなくて。数理科学別冊で『量子の新世紀』がでたが巻頭は私が書いている。その表題の「いま、量子力学とは?」というの、この「いま」というのは、要するに量子情報とかで盛り上がっている「いま」という意味です。量子力学とは何だろう?これは、もちろん量子力学は物質の科学のツールとして発見されそこで大活躍した理論であるが、それどまりのものだろうか?という問題提起である。もっと広い意味での情報处理的な理論なのかということです。「量子力学は何の理論か?」という問いかけです。もうちょっと各論的に言うと、「時間と量子力学」、力学時間と認識順序としての時間、こういう議論は最近廃れているが重要と思う。

イベント情報間の関係を扱う

- 部分系(変数)は皆対等
- 部分系間の関連情報記述
- イベントは確率事象
- 確率的関連情報
- 状態ベクトルはこの記述のための道具

[Slide 47]

場の量子理論での運動

- FAX落語
チェーン店のお歳暮・お中元
物が行かなくても、情報あれば再現可
- 時空の各点の「もの(真空)」あり、その励起
情報が次々送られていく
電光掲示板、液晶・プラズマディスプレイ、

[Slide 48]

[Slide 51] 年もとってもう残り少ないとなると、勉強したいことがいっぱい出てきます。ものすごく多いです。いままで研究してきたことなんかもういいですよ、もう知っているから。ともかく次々と興味が発散しちゃって、ちゃんとレポートを書いて、少しは次の本を買うインカムを得なきゃ

いかなんですよ。最近、Amazon ができてから、英語の本をどんどん買い易くなって、ついお金を使いすぎて困る。英語力がすごくつきましたが、一昨年は Oppenheimer の生誕 100 年で、さすがに伝記の新出版がいっぱいあり、買い漁って大分浪費した（その後「異色と意外の科学者列伝」（岩波書店）を出して一部資金回収）。

測定？？

- 特別な部分系との作用
- マクロ
- 複雑
- 環境 デコヒーレンス 検出器創発
- 記憶
- 量子時空
- 意識
- 脳
-

[Slide 49]

系情報への問いの発し方

- SをOが測定、Sはどの状態か(AかBか)？
- Sの状態sとOの状態sはどう関連しているか？
- S+OをO'が測定、どう関連？
- 相対記述 Oに対してSは・・・、Sに対しOは・・・
- Sの絶対状態は語らない、他とのからみを語る
- Uで変化した部分だけを語り全体は語らない
- 有限、デジタル、yes-no情報の集積、

[Slide 50]

色彩の哲学、心理 ニュートンvsゲーテ、マッハ
風景、風土 文化論、他者一国民国家
見え方、気候変動、雷の科学、宇宙天気、太陽-CR、原子と光
JEM-EUSO GZK ISS 理研
きつず光科学館ふおとん 名誉館長

[Slide 51]

教育課程課「中等教育資料」
2006・9 巻頭言
白川英樹
「科学の面白さを教えるのは誰か」

[Slide 52]

1990 年代中ごろに日本の AGASA での大空気シャワー観測でいわゆる最高エネルギー宇宙線問題に火がついて以後、この実験に関係している。いまは JAXA の ISS で観測する理研のチームを支援している。その実験装置の話から環境物理に急に傾斜しています。甲南大学では環境物理という講義もやっていました。宇宙天気予報というのを知っていますか。メルマガに登録すると、太陽活動が激しい時にメールが入るのです。いまは太陽風がどちら方向に吹いているとか、アメリカのサイトに行くと、15 分くらい前の X 線太陽がオンタイムの映像で見れる。すごい時代ですよ。IT 時代と言うのは。

気候の長期変動はいまや人類の最大の問題ですが、気候変動の過去の来歴と宇宙線変動との相関が話題である。いまは SCIENCE と NATURE を個人購読しているから、そういう話題の記事を毎週見て、インターネットでアクセスして勉強していたら時間がいくらあっても足りない。宇宙物理で培った力があるとういう分野のは大抵見当がつく。宇宙線と雷の関係とかも面白いです。どこかで金を出して呼んでくれたら、集中講義しますけど。

[Slide 52] 何でも人に聴かせるには権威に頼るのがよい。最近、文科省の「未履修」とか、あれを担当している課でしょうね、その課が教育委員会と教師用に出している『中等教育資料』という

月刊誌がある。今年の9月号に白川英樹さんが「科学の面白さを教えるのは誰か」という巻頭言を書いておられるが、なんとそこに「佐藤文隆は」と書いてある。この「雲はなぜ落ちてこないのか」(岩波書店)の話を書いてくれている。もともとこの題は白川さんとある場で一緒だったときのご発言に触発されたものであるが、「私が一度答えを書いてみますよ」といってたものだ。教師たちにこのように努力せよと諭している。皆さんは、なぜ落ちないのだと答えますか？ 明日午前、実は甲南大学でこの話をします。さる1月に小柴さんと武田暁さんと一緒に、富山市へ行って、平成基礎科学財団の高校生講座でもこの話をした。あらかじめ申し込んだ高校生だからみんなものすごく熱心なでした。休憩挟んで全体で4時間ぐらいやるのです。

そうしたら次の日の新聞の富山版みたいなどころには、「佐藤教授、雲はなぜ落ちてこないのかについての最新理論」と。要するにみんな聞いたことがないんです、こういう話は。

うそを教えない工夫

- 大学の物理教育 2001. 3
- 水素原子 基底状態
- 電子は回っていない！！
- 遠心力＝引力で納得を傷つけない
- うそは泥棒のはじまり
- 長岡モデル

[Slide 53]

「基礎」物理の効用

佐藤「科学者の将来」(岩波)

- Planck100ある光景
- 発展途上国型？
- 教育 人づくり
- 独立法人 お金をもつ
Harverd 3兆円
法人と国

[Slide 54]

[Slide 53] まず、基礎の物理学者、世の中の役に立たない面白い話をやっている人は、せめても証として嘘をついてはいけないと思います。カミオカンデのデータ処理も嘘をつかないようにしようというふうにやっていると言います。そういう気持ちで、日本物理学会の「大学の物理教育」という雑誌に「嘘を教えない工夫」という文章を書きましたがぜんぜん反応がなかったのは残念です。物理学者はよってたかって嘘をついているわけです。水素原子の基底状態では電子は回転運動してません。だって $L=0$ ですから。なのに長岡半太郎のモデルをだして、電気力と遠心力がつりあって回っていると言い、多くの人がそれで腑に落ちるのです。しかしこれは騙しです。遠心力はないのに、なぜ電子は落ちないのかという真理を誰も言わないわけです。嘘は泥棒の始まりと言うように、いったん落ちるとどこまでも落ちる。くだいと思うでしょうが、これは知識の本質に絡みます。ぜひ読んでください。

よってたかって嘘をついている。これは確かに、そうでも言わないと誰も教えられない。どうしていいかわからないから嘘を。化学は賢いですね。僕もどこかの高校教科書の編集とかをやっているから詳しいんだけど、化学では雲と言ってごまかすわけです。雲を掴むような話だけど明確な嘘ではない。物理は立ち入って嘘をついている。誰か工夫を、と呼びかけたが、誰も反応がない。僕はやっぱり、物理学者はだめだと思う。

これで終わりだと思います。もうこんな機会はないと思うので、もうちょっとしやべらせてください。

[Slide 54] 「基礎」というものの意味も、物理の物(もの)の意味も、もっと深く考えてみる必要が現在ある。このへんことは僕は『科学者の将来』という本で論じました。例えば、「物」という漢語と、平安時代の「もののけ」とかいうときの和語の「もの」は相当に違う。だから和語と漢語との意味の齟齬もある。我々は言葉を使ってるつもりでも言葉に使われていることもある。研究

課題が固定しているときはいいが変動期には言葉からでの概念操作が相当影響を受ける。「回っている」を役目を果たしたわけだが、何時までもその言葉しか発明できないのは工夫が足りない過ぎる。

「基礎」をめぐる遭遇したある議論を紹介したい。C19の委員長としてIUPAPの役員(executive committee)を3年間していた。YY(山口嘉夫)さんがプレジデントをやった次がスウェーデンのニールソン、その次がバートン・リヒターという、high energy 屋の arrogant さ丸出しのパワフルな人でした。それで僕もあのあと、物理学会の会長をやったり、学術会議会員とか、それこそ戦後55年体制の学会のキャリアを全部踏んだわけですが、その最後に Planck 量子論百年式典がベルリンであって、鈴木増雄と僕が日本物理学会代表で参加した。

行ってみたら、日本の応用物理学会から5, 6人も来ていて、大変な熱の入れようであった。日本の物理学界は応用物理学会が支えている感であった IUPAP は Pure and Applied ですから、両方で一つの物理学なわけです。他の国では大きな物理学会があってその一角を応用物理が占めている。日本でも化学学会がそういうかたちである。

五十何カ国の物理学会の関係者が来ていて、一種の国連総会みたいなもので、一人5分とかで次々と英語で演説させるわけです。何のテーマか、好き勝手なテーマで。東ヨーロッパのいろいろな崩壊で物理も大変だとか。私は日本のようなかつての物理王国もいま学生の物理離れで大変だみたいな話をした。みんな順々に5分ずつしゃべる約束なのに、リヒターが急に前へ行っちゃべりだした。相当、勘に触ったのだろう。それは、あるアフリカの物理学者が、トリエステでの string workshop に何人参加できて先進した、というような報告の後だった。リヒター]はアフリカで String 理論やるもんじゃないと怒ったのだ。

アメリカとか日本とかとでやるもんだ、と。そうしたら何人か立ち上がって、「ファンダメンタルなことは途上国に向いているんだ」と言った。バートンも興奮して応酬したので国会の委員会でもめる時みたいに、何人かが演台のまわりに詰め寄って激論になった。

僕はそのとき「そうか基礎物理は途上国向きなんか、経済先進国になるとかすんで来るのかな」という疑問が湧いた。先進国になると科学技術の専門家が多くなるから、数の比率として基礎物理みたいのが減るのは当然である。こういう非常にファンダメンタルな物理の研究をやって研鑽した力量で広く理工系の人材を教育するのが基礎物理研究者の社会的役割である。日本の戦後復興期で基礎物理屋がこういう役割は大きかった。ところがそういう研究者が増えすぎて、生きていくために研究課題を小分けして分け合うような事態になるとそれはもう基礎ではない。ギリシャ哲学の教授は京大に一人しかいないように、基礎には希少価値がないとオーラは発生しない。

だから僕らはアジア、アフリカまで出向いていくといいのかもしれない。ベトナムはお呼びじゃないかもしれないけど、タイとかインドネシアとかですね、結構受けるのかもしれない、ファンダメンタルなことがです。かつての日本もそうであったように、理工系人材の大量生産には基礎物理の研究がそこで細々とでも行われていることが効くんですよ。台湾や韓国でいまそんな状況にある。僕は研究は人間教育の一手段だということをいっていますが(「科学者の将来」参照)、そういう面は途上国の方が分かりやすい。

最近、いろいろなところへ出ますと面白い情報に出会う。Harvard というのは、自己資金を3兆円持っているんだそうですね。それで7年前か何かに2.4兆円で、投資で増やしている。こういう大学というのは、ほかにケンブリッジとオックスフォードですね、そういうところは国より金持ちです。

われわれは、長いこと、基礎的な科学というのは、国が援助するべきであるといい、それを理解しない国が悪いんだとかいつてきた。法人というのは、われわれは普通、会社を考えたわけです。そこは需要供給のバランスが支配する。そのタイムスケールをながくとれば基礎開発も大事になる。また需要供給の対象領域をたえず新しいものを探索していかないといかんのでしょうかね。何れ

にせよ”世につれ”ですよ。意欲ある若者が String 理論に惹かれるかどうかは文化的な”世につれ”ですよ。1月にまた新しい本（「異色と意外の科学者列伝」）が出ますが、科学や科学者がどうやって世間で生きてきたかの歴史ものです。われわれが経験した二十世紀型科学だけが科学という制度でなく、これからも変わっていくんだと想いで過去を見ている。

日本ではいま科学技術創造立国とかで浴びるほど金がばらまかれているんですよ。「おれんここにこない」というなら「かいしょがない」と言われるだけです。ただ基礎にどういうルートでそれが入ってくるかにはひと捻り工夫がいるわけです。単に「4分野にいれよ」じゃないでしょう。税金はやっぱり国民繁栄に効果のあるところにばら撒くべきです。だから法人はそういう貢献で国から金を入れる。それはある程度応用的なステージになっているものというのは当然だと思う。

考えなければいけないのは法人の方ですよ。どこかで MIT の TLO の長をしている人間の話を聞いたことがある。国や外部から資金を稼ぐ次のターゲットのための萌芽研究と優秀な人材を惹きつけるための素粒子や宇宙での研究への考慮を法人としての大学がやっている、という話でした。注目の開発研究で大金が入ればオーバーヘッドで法人も潤うわけで、それを法人の長期的観点で基礎にまわすという手もある。法人は、応用と基礎、稼ぐ人と稼がないがオーラを出す人、こういう別種人間の間の役割分担で支えあっているというイメージがないとこういう話は成り立たない。また大きな法人でないと成り立たないかもしれないが、何れにせよ国に遠ばえするばかりでなく、まわりと仲良くして足元を見よということです。そこは国民一般、政治一般、よりははるかに話の通じるべき世界ですよ。逆に言うとその説得性を持っていない、あるいはそこで尊敬を得られないということなら、そりゃダメなんですよ。以上です。終わり。

九後：どうもありがとうございました。すごいエンターテイナーですが、無料で聴いていいのかな。

佐藤_x：無料で。そうや。昔、基研に月給をもらっていたからしょうがない。

九後：何か質問ないしは言いたいことはありますか。

佐藤_x：言いたいことはあとで言って。

坂東：いま言ったら喧嘩になります。いっぱい言いたいことはありますけど。だけど一つだけ。

量子情報っていうのは、アメリカではすごくお金が出ていると聞いているんですけど、それはやっぱり軍じゃないですか？

佐藤_x：違うでしょう。それから日本もすごいです。

坂東：いや、だから、日本はアメリカの真似をしたんじゃないんですか？

佐藤_x：それはそうでしょう。

坂東：そんなにすぐ、実用になるっていうふうに、みんな思っていますか？

佐藤_x：思っていないと思います。

坂東：思っていないでしょう？

佐藤_x：ところが、理論の連中はわっと増えているわけ。

坂東：それはお金につられて、やっているんじゃないんですか？

佐藤_x：われわれだって、お金につられてやっているんじゃない？ そりゃそうだと思いますよ。小泉みたいな生き方になるけども、深く考えたらそうでしょう？ だって食っていけないもん。

自分の興味で勉強するっていうのは、昔はだいたい、勉強するっていうのはみんな、お金がかかったわけね。ところが研究することでお金をもらうという、勉強してもともと、お金をかけてやるもや。それはそうですよ。で、江戸時代の学者とかというのは、全部仕事をやっていて。

坂東：そりゃそうです。科学者が職業として成り立ったのは、つい最近だから。でもちよっとお金ばかりというのはすかんな！

佐藤_文：それと、研究するっていうのとは違う。それはその組織とか教育のためとか何とかで、人を雇うのであって、それと勉強そのもの、研究そのものというのは、違いますよ。だってそういう制度が全然ないときから、いままで通じる科学的な成果というのは、いっぱい出ているんだから。さっきのコペルニクスの話にしたって。

だからそれは、組織の中でないと、科学がおこなわれないという、非常に効率よくするために、いまのような制度ができてきたんだと思うんです。

僕の1月に出るのには、さっきのコペルニクスの話も書いてあります。コペルニクスはどういう人生を送ったかと。

坂東：これは懇親会向きや。

九後：それじゃあここらへんにして、どうも。下で懇親会です。



ph09 大貫，田中_一，坂東，宮下，小林/佐藤_文//関/佐藤_文//佐藤_文，岩倉(メ)，真貝，佐藤_勝/大野/元木(メ)