

量子力学の観測問題をめぐる最近の話題

並木美喜雄

〈早稲田大学理工学部物理学教室 169 東京都新宿区大久保 3-4-1〉

1987年4月から10月までの僅か半年の間に量子力学の基礎についての国際会議が5回もあった。この年はシュレーディンガー (E. Schrödinger) の生誕百年に当たっていたこともあって、それを記念しての集会が多かった。ちなみに、シュレーディンガーは1887年8月12日に生まれている。1987年以前にも、1983年からの4年間に10回ほど会議が開かれていたのである。量子力学の発足を1925年とすれば、1985年は量子力学還暦の年であるし、同時に先達ボーア (N. Bohr) の生誕百年記念の年でもあった。これら以外にも、いくつかの記念集会があった。たしかに、量子力学はこの数年間に記念碑的な折り目節目を通過してきたわけだ。しかし、それだけでこれほど多くの会議は開けない。理論的展開とともに、いやそれ以上に、技術革新による原理的実験の発展があり、観測問題自身が全く新しい時代を迎えつつあるからである。ここでは会議の一部を紹介すると同時に、量子力学の原理的諸問題に関する最近の話題について語りたい。ただ、私もすべての会議に出席したわけではないし、話の内容も私自身の興味に偏るであろうことをお断りしておく。

1. どんな会議があったか

まず、1983年から1987年の間に開催された国際会議を都市名で代表させて列挙しよう (これ以外にも二、三あったようだ)。

1983年 東京^{1)*} (日本): ISQM-Tokyo'831984年 Albany²⁾ (U.S.A)

Santa Barbara (U.S.A.)

Oxford³⁾ (England)1985年 Calcutta^{4)*} (India): BoseJoensuu⁵⁾ (Finland)Como^{6)*} (Italy)Urbino^{7)*} (Italy)

Copenhagen (Denmark): Bohr

1986年 New York^{8)*} (U.S.A.)東京^{9)*} (日本): ISQM-Tokyo '86

1987年 London (England): Schrödinger

Joensuu¹⁰⁾ (Finland)

Vienna I * (Austria): Schrödinger

Vienna II ^{11)*} (Austria): SchrödingerGdansk¹²⁾ (Poland)Delphi^{13)*} (Greece): Schrödinger

軽井沢 (日本): 量子光通信

ISQM-Tokyo '83 とあるのは、1983年夏に日立製作所中央研究所 (東京、国分寺) で開かれた“量子力学の基礎と新技術”国際会議 (英語名 International Symposium on

Foundations of Quantum Mechanics—In the Light of New Technology: 組織委員長中嶋貞雄) をいう。ISQM-Tokyo '86 はその第2回会議である (来年第3回会議 ISQM-Tokyo '89 が開かれる予定)。Bose, Bohr, Schrödinger と付記したのは、それぞれ、ボーズ統計60年記念、ボーア生誕百年記念、シュレーディンガー生誕百年記念の会議である。なお、Joensuu 会議 (1985年) と Urbino 会議 (1985年) にはアインシュタイン・ボーア論争50年記念、Joensuu 会議 (1987年) にはコペンハーゲン解釈60年記念という副題がついていた。Vienna 会議 I, II には補足説明が必要だろう。会議 I はウィーン大学で開かれた公開シンポジウムであり、記念行事としてはこちらが本体である。会議 II はそのサテライト会議として企画された専門家向けの“物質波干渉”ワークショップであり、工科大学付属原子研究所で開催された。

*印は私が参加した会議である (Albany 会議には論文だけ提出した)。Albany, Copenhagen, London の会議には日本からの参加者があったと聞いている。Joensuu 会議と Gdansk 会議には私の身近な人達が参加したので大体の様子を知ることができた。

1987年に開かれた会議についてもう少し説明しておこう。London 会議はノーベル賞受賞者を数多く集めて華やかだったようだが、記念講演会的色彩が強かったように思う。Vienna 会議 I は現場研究者が今日的な話題を語ってはいしたが、シュレーディンガーの業績に関連したテーマが多く、

また参加自由という公開シムポジウムの性格もあって、やはり記念講演会的であった。一方、Joensuu と Delphi の会議は専門的な討論を目的にしたものだが、かなり哲学的な興味が強かったように思う。とくに、Delphi 会議は第3回認識論会議として組織されたものである。もっとも、第1回と第2回の会議報告を見ると、この会議も回を重ねる毎に物理の方に寄ってきたようでもある。量子力学の観測問題や原理的諸問題の国際会議は、従来、理論主導型であり、しばしばこのような哲学的興味も含めて組織されることが多かった。その意味では、この二つは(是非はとも角として)どちらかといえば旧型の会議である。その中において、Vienna 会議 II は内容においても発表数においても実験主導型であり、異彩を放っている。なお、Gdansk と Delphi には反コペンハーゲン解釈派の論客がかなり揃っていた。

原理的な実験研究を重要な柱とする量子力学の基礎に関する国際会議を‘新型’ということにすれば、新型の会議第1号は恐らく ISQM-Tokyo '83 であろうと組織委員の一人であった私は秘かに自負している。いずれにしても、量子力学をめぐる国際会議が何故このように賑やかに開かれるようになったのか？ その理由を一口でいうのは難しいが、技術の進歩によって、かつては思考実験でしか考えられなかったような原理的実験が現実のものとなったという事情を忘れるわけにはいかない。そのため、長い間アカデミックかつ哲学的論議の段階に留まっていた観測問題などが、具体的な物理の内容をともなって、再検討されなければならなくなったのである。同時に、これらの実験は量子力学テクノロジーともいえる新しい将来技術の基盤をも提供してくれる。新型会議にはこのような背景があった。上記の年代表でいえば、ISQM-Tokyo '83 および ISQM-Tokyo '86 の他、Albany, Santa Barbara, New York, Vienna II が新型である。この観点からすれば、1987年夏軽井沢(早大セミナー・ハウス)で開かれた量子光通信の小国際会議も忘れることはできない。この会議の議論は量子力学の観測理論が近未来の通信技術において重要な役割を果たすであろうことを予見させるものであった。

というわけであるが、あえて旧型といった会議でも昔のままの議論が繰り返されていたのではない。実際に行われるようになった原理的実験から、量子力学の実験的基盤や物理的内容、さらにその認識論的意義を再考しようとしていたのである。ヨーロッパの会議に出はじめた頃、彼らがいまだに量子力学の実験的検証にこだわり続けているのを

見て、大そう驚いた。日本では、今さらそんなことをと一笑に付されそうな問題意識である。また、観測問題を執ように追究している一群の人達を見て感銘を受けた。年寄りばかりではなく、若い研究者もいるのである。たしかに、日本にはない雰囲気があり、量子力学がヨーロッパで生まれたことを実感したと思った。中には、コペンハーゲン解釈に深刻な疑問を感じ、量子力学自身を書き直そうと努力している人達も少なからずいるのだ。¹⁴⁾ これも日本にはないところだろうか？ 量子力学テクノロジーの夜明けを思わせる基礎的な実験とその利用に目が向きがちだが、それだけでは片手落ちだと思う。

この小文の目的は、主として‘新型’の国際会議で議論された原理的諸問題の二、三の局面を紹介することである。詳しくは文末文献表にある会議報告や紹介記事を見ていただきたい(私の手元にある報告だけを集めたので完全ではない)。なお、Oxford 会議(1984年)は重力場や宇宙発展の中における量子効果と観測問題を扱っていて、他の会議にはない特色をもっている。³⁾ 大そう興味深い問題であるが、ここで議論している余裕はない。

2. 新しい実験から観測問題を考える

‘新型’の国際会議第1号が ISQM-Tokyo '83 であるといった都合上、そこで取り上げられた原理的実験の紹介から始めよう。主な実験としては、アハラノフ・ボーム効果(以後 AB 効果と略称)の実験的検証、EPR(Einstein-Podolsky-Rosen)パラドックスまたはベルの不等式の実験的検証、中性子干渉実験、量子ホール効果についての実験) SQUID などがあった。また、Wheeler から遅延選択実験(delayed choice experiment)という興味深い提案もあった。量子ホール効果と SQUID については、物理学会の皆さんはすでによくご承知だから、ここで改めて紹介する必要はあるまい。ここでは、AB 効果、EPR パラドックス、遅延選択実験、光に関する二、三の問題、中性子干渉を取り上げる。ISQM-Tokyo '83 以後の諸会議で報告されたその後の発展を適宜まじえながら、話を進めたい。いずれの話題も、観測問題に対して貴重な物理的内容を提供するものであるが、中性子干渉は特に重要であると私は思う。この話題は次節でやや詳しく説明しよう。

(i) AB 効果の実験的検証

AB 効果にはすでに良い解説¹⁵⁾があるし、外村彰による実験的検証も仁科賞や朝日賞を獲得して有名だから、改めて説明する必要はないと思う。ご承知のとおり、AB 効果

をめぐっては、長年にわたる理論上および実験上の論争があった。実験についての疑問は電子ビームが磁束に触れないようにできるかという点にあったが、ISQM-Tokyo '86の席上外村はほぼ完全と見なせる実験的検証を示した(文献1および9参照)。理論上または解釈上の論争が若干残るとしても、この実験はかなり多くの人に決定的な影響を与えたのである。

ISQM-Tokyo '86では、AB効果に関するもう一つの重要な実験が報告された。超微細加工技術によって製作された 10^{-8} m程度の太さをもつ金属のリング上の一点とその反対側にリードをつけ、そのリード間に電圧をかけて電流を流す。各電子の波動関数はリングの上下に分かれて進み、終端で合流する。リングの中に磁束を通せば、AB効果による位相差によって、上下の分波はその終端で干渉し、リード間の抵抗は磁束の強さを変えることによって規則的に変動する。金属線が太ければ、多重散乱などのため位相差はランダムとなり、干渉現象を見ることはできない。しかし、最近の技術は上記のような工作を可能にし、そのようなAB効果の実測に成功したのである(文献9参照)。 10^{-8} m程度とはいえ、まだかなり多数の衝突があるので、とてもミクロの現象とはいえない。もちろん、マクロでもない。こうして私達はミクロとマクロの中間の物理現象、すなわち'mesoscopic physics'に出合ったのである。メソスコピックの物理現象は近未来の量子力学テクノロジーを予見させてくれて興味深い。

メソスコピック現象で重要な事実は、位相相関がある程度消えるにしても、観測可能な程度に残っているということである。これは観測理論、とくに測定による“波束の収縮”の問題にとっても極めて重要な話だ。後で再論したい。

(ii) EPR パラドックスまたはベルの不等式の実験的検証

アインシュタインは量子論の発展に大きな貢献をしたにもかかわらず、コペンハーゲン解釈にもとづく量子力学の定式化後は手厳しい批判者になり、次々とパラドックスを提出して正統派に挑戦した。¹⁶⁾ その多くはボーアによって解かれたが、EPRパラドックスだけは重い疑問として残り、50年以上にわたる論争を引き起こしたのである。

ご承知の方が多いと思うが、概略を述べておきたい。アインシュタインは“物理的実在”についての基準を次のようにおく：(1)力学系を乱すことなく物理量の値を測定できるとき、その物理量に対応する物理的実在の要素が存在する。(2)物理学の理論体系は物理的実在のすべての要素に対応する部分をもたなければならない。彼はこの古典物

理的基準で量子力学を批判するのであるが、それを明示するために提出されたのがEPRパラドックスである。

具体例として低エネルギー陽子・陽子散乱をとり、そのパラドックスの内容を説明しよう。この場合S波散乱が起こり座標について対称だから、スピンについては反対称の1重項状態 $\chi = \{\alpha^1\beta^1 - \beta^1\alpha^1\}/\sqrt{2}$ で表されるような相関関係が実現する。 α と β はスピンz成分の(↑と↓に対応する)固有状態、IとIIは陽子の番号である。散乱後、IとIIが遠く離れたとき、Iに対してスピンz成分の測定を行い、結果↑をえたとしよう。量子力学によれば、その測定により波束は $\alpha^1\beta^1$ に収縮し、その瞬間にIIのスピンが↓であることが分かってしまう。遠く離れた系の情報が瞬時に伝わった。これは不思議ではないか?

IとIIとは遠く離れているので、Iの測定がIIを乱すはずはない。つまり、IIを乱すことなくIIのスピン測定ができたわけだから、基準(1)によれば、IIのスピンz成分は物理的実在の一要素である。しかし、Iとは無関係に、はじめからIIは状態 β にあったことにもなる。これは初期状態が重ね合わせ状態 χ にあったという設定に矛盾する。

一方、スピンx成分の(→と←に対応する)固有関数 $\xi = i(\alpha + \beta)/\sqrt{2}$, $\eta = i(\alpha - \beta)/\sqrt{2}$ で書き直せば、上記初期状態 χ は $\{\xi^1\eta^1 - \eta^1\xi^1\}/\sqrt{2}$ に等しい。ゆえに、スピンx成分の測定について、スピンz成分測定の場合と同様な議論が成立する。例えば、Iの測定が結果→を与えたとすれば、瞬時にIIのスピンが←であることがわかる。上の議論と一緒にすれば、IIははじめから状態 β にあると同時に状態 η にある。これは矛盾だということである。

このパラドックスには(IとIIが十分離れているので)、IIとは無関係にIについての測定が行われるという暗黙の了解が含まれている。しかし、量子力学では同種粒子を番号付けなどによって区別できないはずである。ボーアは、Iに対する測定操作は全体系におよぶという“分離不能性”を強調した。だから、EPRパラドックスが成立する根拠はないということである。量子力学に立脚する限り、これ以外の返答はないだろう。しかし、“分離不能性”という非局所的長距離相関はあまりにも常識から遠い。量子力学がいかにか成功したとはいえ、これだけは理解できないという思いが残る。こうして50年にわたる論争が始まった。たしかに、このパラドックスは“物理的実在”についての古典物理学的概念が量子力学と両立できないことを示すものであった。素朴実在論は量子力学では成立しない。

EPRパラドックスは哲学的議論だけで終わる話ではな

図1 遅延選択実験: (a) 粒子を見る, (b) 波動を見る.

い。長距離相関が量子力学の予言するとおりに存在するかどうかは、実験でチェックできる事柄である。50年前はまだ実験技術が未熟であり思考実験で議論するだけだったが、今はそれが可能になった。この10年間に何人かの人達が試みてきたが、最近 A. Aspect と H. Kleinpoppen は見事な実験によって量子力学が正しいことを示した。両者の実験は、陽子の代わりに、原子の S 状態間の遷移によって放出された(偏りに相関関係のある)2個の光子を使ったものである。詳細は文献 1, 7, 9 を見ていただきたい。

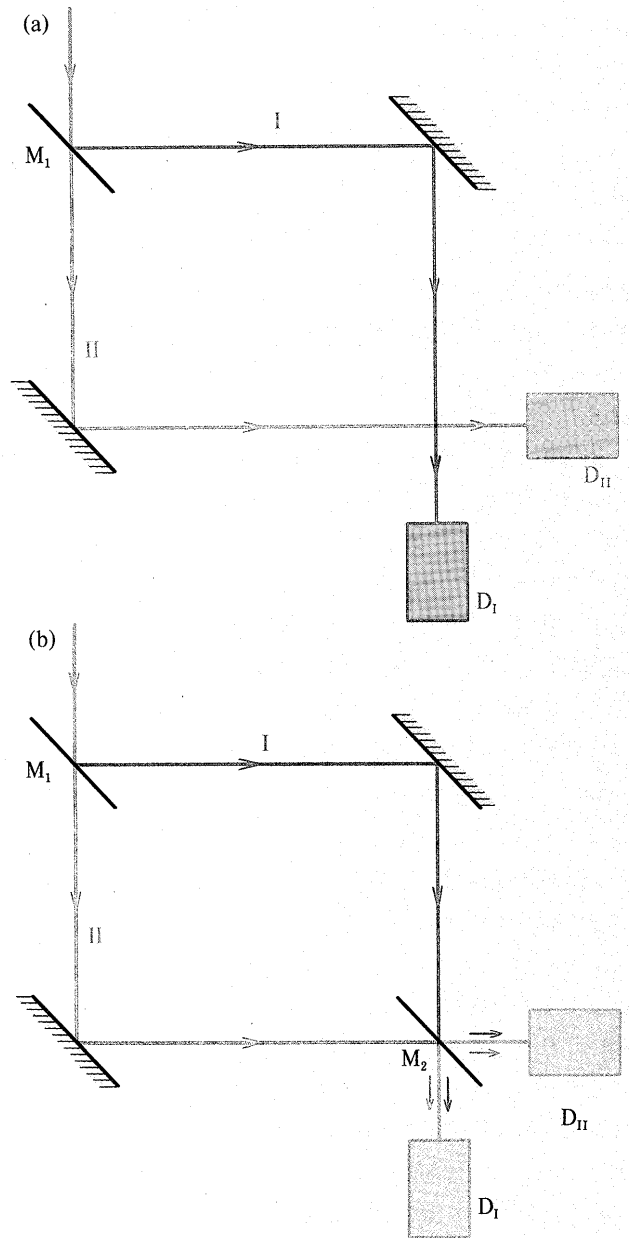
彼らの実験は直接的にはベルの不等式の検証を目的としている。1964年に J. S. Bell は量子力学と局所的な“隠れた変数”理論との相違を実験的に見ることのできる不等式を提出した。¹⁷⁾ それ为正に EPR パラドックス型の相関関係を調べる実験だったのである。

“隠れた変数”理論には量子力学裏面史ともいえる葛藤が絡んでいる(例えば文献14参照)。量子力学発足直後から、量子力学を古典的な確率過程論で置き換えようとする試みがあった。すなわち、本来の運動は古典力学にしたがうが、私達が物質界の奥底に潜む原物質を代表する“隠れた変数”を知らないために、見かけ統計的な性質をもつ量子的揺動が出現したと考える理論だ。D. Bohm がその代表であるが、他にも J. P. Vigiér (確率過程的解釈) や高林武彦(流体力学的量子化) などがある。¹⁸⁾ E. Nelson の確率過程量子化¹⁹⁾ もその立場の理論と考えてもよいだろう。しかし、いずれも量子力学の結果を変えることはせず、分離不能性または非局所的な長距離相関は抱え込んでいる。

だから、EPR パラドックスをアインシュタインの立場で解決しようとしたものではない。これに対して、アインシュタインの立場に近い局所的な“隠れた変数”理論も考えられていた。ベルの不等式はそれに対するものであった。上記の実験はこの種の理論を否定した。とはいえ、アインシュタインの立場への固執、コペンハーゲン解釈への疑問が消えるわけではない。実際、コペンハーゲン解釈を拒否して、アインシュタインに近い立場で量子力学を改変しようとする努力は、今なお一部で続けられているのである。むしろより多面的な検討を望む気運すらある。多くの会議(日本以外)で EPR パラドックスをめぐる議論が大きな比率を占めてきたのもそのためである。アインシュタインの疑問は今だに重いというべきであろうか?

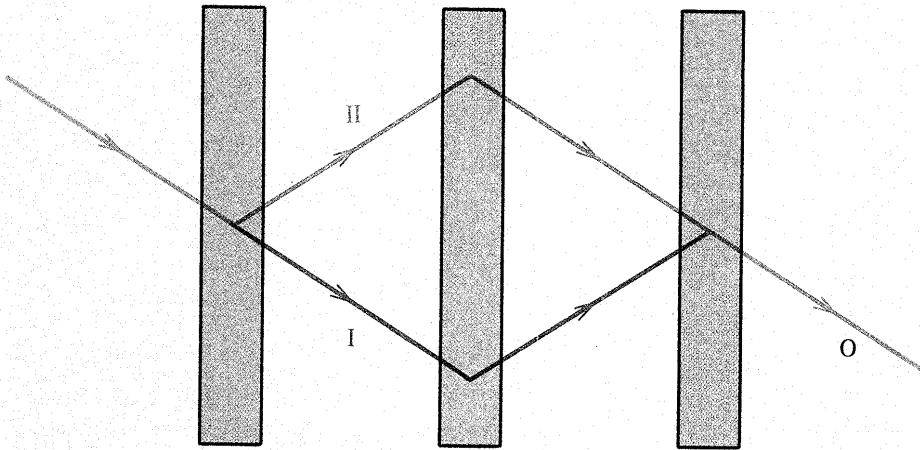
(iii) 遅延選択実験

J. A. Wheeler の提案による遅延選択実験は、その後 H. Walther と C. O. Alley によって実行された。これは量子



力学的粒子(光子)の粒子・波動二重性をチェックする実験である。図1を見ていただきたい。左上の光源を出たレーザー光パルスは半透明鏡 M_1 で二つのチャンネル I と II に分けられて、それぞれ検出器 D_1 と D_2 に導かれる。ただし、図1(a)の場合は I と II を通った光が別々に検出器に入るのに対して、図1(b)の場合は二つの光が同じ半透明鏡 M_2 を通って検出器へ行く。入射光の強度を十分弱くして1パルスに1個程度の光子が含まれるようにすれば、実験は光子1個ずつについてのものとなる。そして、 M_1 以後の光路長をパルス長より十分長くとり、光パルスが M_1 を通過した後で、 M_2 を入れるかどうか、すなわち図1(a)の装置を使うか図1(b)の装置を使うかを決める。図1(a)の装置を使った場合、 D_1 と D_2 のどちらか一方だけが光子を捕捉するわけだが、これは粒子性の実験的検証で

図2 中性子干渉実験.



(iii) ほど量子力学の基礎に直接関係がある話ではないが、境界条件を人工的に変えた場合の電子の行動を調べることも量子力学の実験的チェックには違いない。今後の発展に注目する必要がある。

他方、現在光通信技術開発のため量子非破壊測定 (quantum non-demolition measurement)

の研究が進められているが、これは原理的立場からみても興味深い。量子非破壊測定は以前重力波測定のために提案されたアイデアであり、不確定性関係の制約を最小限にするために、特定の時間間隔をおいて行うストロボスコピックな測定であった。光通信の場合はまったく別の観点から連続的な測定が工夫されている。連続測定は観測問題としても理論的に面白い問題であり、今後の発展に期待したい。光の場合、不確定性関係の制約を最小限にしようとする努力として squeezed state の研究があることは良く知られている。

3. 中性子干渉実験と観測問題

中性子干渉実験はシュレーディンガー波動関数（とくにその位相）の物理的意味を改めて明示し、多くの理論家の原理的興味をかきたてた。中にはコペンハーゲン解釈をこえる内容を期待する人が出たほどである。また、後述するように、すべての観測理論に対して逆方向からのチェックを課するものである。

図2を見ていただきたい。縦に3本平行に並んでいるのはシリコンの単結晶であり、左方から入射する中性子ビームは図のようにチャンネルIとIIに分けられ、最後に同一のチャンネルOに集められる。ビームは十分弱く、この装置には中性子が単独に1個1個別々に入ってくるように工夫されているので、IとIIに分波されOに合波されるのは中性子1個の波動関数である。また、単色性もかなりよい。そこで、チャンネルIとIIのどちらか一方または双方にいくつかの装置をおいて、IとIIの分波の間に位相差 χ を与える。このとき、IとIIを通過してOにきた波 ϕ_{OI} と ϕ_{OII} の位相差も χ であるから、 $|\phi_{OI} + \phi_{OII}|^2$ は $1 + \cos \chi$ に比例する。第2項が干渉効果である。チャンネルOにおいた検出器はこれに比例する頻度で中性子を捕捉するから、 χ の値を変えるように工夫しておけば、検出される中性子

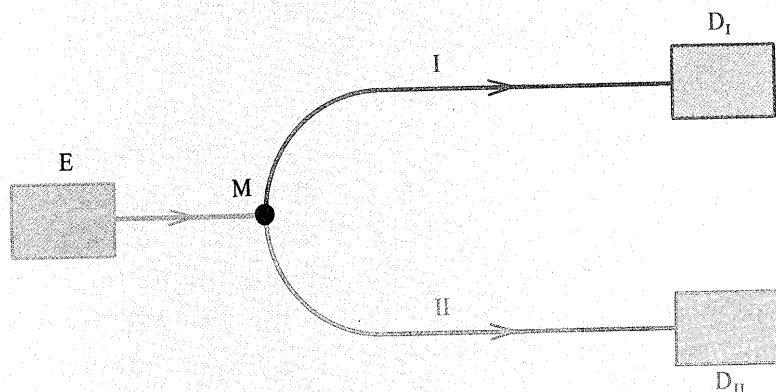
ある。図1(b)の装置を使った場合（光路長を調節しておけば）、チャンネルIを通過して D_{II} に入る光波は、半透明鏡で2度反射されるため、IIを通過して D_{II} に来る光波と逆位相になって消し合い信号を発生しない。しかし、 D_I に行く光波は二つとも半透明鏡で1度だけ反射されているから、互いに同位相となり信号を発生する。これは波動性の実験的検証を与える。WaltherとAlleyはこれを実験によって確認したのである（文献9参照）。

この実験は光パルスが M_I を通過した後で、図1(a)か図1(b)か、どちらか一方の装置を選ぶという点がミソである。あたかも、装置の選択が光子の粒子性か波動性かを選ぶかのように、観測者と独立に存在する客観的実在はないかのようだ。その結論は速断に過ぎるとしても、少なくとも検出以前にはどちらともいえない。たしかに、粒子・波動の二重性の本質を鋭く突いた実験である。Wheelerはこの実験から「記録されないものは現象でない」という意味は分かるが、この言葉だけが一人歩きして安直に哲学と結び付くのは少々心配である。「宇宙は人間の登場と人間による認知を待っていた」と主張する“人間原理”もこの言葉の延長上にある。私自身すぐに人間原理に飛びつく気持はないが、認識論的議論の必要性は分かる。この実験もアインシュタインが嫌う非局所的長距離相関の検証になっていることは明らかであろう。

(iv) 光に関する二、三の実験

光を使った原理的に重要な実験はすでに(ii)(iii)で述べてしまった。それ以外の興味深い実験にも触れておこう。Waltherは、マイクロ波空洞に原子線を通して1原子レーザーを実現したり、平行導体板間に原子をおいて電気鏡像がエネルギー準位に与える影響を調べたり、同軸筒の芯線と外壁の間に電場、軸方向に磁場をかけた中に原子線を通して原子核から $12,000\text{\AA}$ も離れたところに電子溜りをつくるなど、いろいろな実験をやっている。いずれも(ii)や

図3 Stern-Gerlach の実験.



数は χ に対してそのように変化する。これが中性子干渉実験である。

中性子干渉実験が初めて注目されたのは、中性子位相への地球重力場の影響を検出したときである。図2の紙面を鉛直面とし、一様な重力 mg (m は中性子質量, g は重力の加速度) が下方に作用しているとすれば、 $\chi = mghL/\hbar v$ となる (h, L, v はそれぞれ I と II の平均高度差, 中性子の飛距離と速度である)。そこで図2の面を鉛直面に対して角度 ϕ だけ傾ければ、上記の h は $h \cos \phi$ で置き換えなければならない。S. A. Werner のグループは角度 ϕ の変化に対応する中性子干渉の実験的観測に成功した。彼らはその後同種の実験でコリオリの力による干渉も測定している。詳しくは文献 11 の Werner の報告を見ていただきたい。

観測問題を含む量子力学の原理的諸問題にとっては、H. Rauch を中心とするウィーン・グループの研究が重要である。彼らは数多くの実験を手掛けているが、ここではそのいくつかを紹介する (詳しくは文献 1, 7, 8, 9, 11 参照)。

まず、一方向 (z 軸方向) に偏極したスピンをもつビームを投入し、チャンネル II には同方向に強さ B_0 の静磁場を設ける。このとき $\chi = \mu B_0 L/\hbar v$ となる (μ は磁気能率, L は静磁場の長さ)。Rauch 達は B_0 の値を変えて上記のような干渉を観測した。量子力学によれば、この静磁場はスピン波動関数に (z 軸の回りの) 角度 2χ の回転を与えたはずである。当然、角度 2π の場合もあり、そのときスピン波動関数は符号を反転している。中性子干渉実験はその符号の反転を実測したのだ。昔の教科書には、この反転は数学的なもので実測の対称にはならないと思わせるような記述もある。当然の結果といえればそれまでだが、Rauch 達の実験は新鮮な驚きをもって迎えられた。

つぎに、チャンネル II にアルミニウム位相器 (phase shifter) を入れた場合を考えよう。この位相器は中性子波動関数に $\chi = \lambda n b L$ という位相のずれを与える効果しか

ない (λ, n, b はそれぞれ中性子の波長, Al 原子核の密度, n -Al 衝突の散乱長)。 L はこの場合中性子経路に沿っての Al 位相器の厚さである。したがって、 L を変えることによって (例えば、位相器を傾けることによって) 上記のような干渉が観測されるはずだ。Rauch 達は実際にそれを示した。

観測問題の立場からこの実験を見直そう。

観測対象粒子のビームを二つのチャンネル

に分け、どちらか一方のチャンネルを通過したことを確認して、物理量の測定を行う方法は典型的な測定手段である。好例として Stern-Gerlach の実験がある。図3でその概念図を示す。射出器 E から出たビームは磁場 M によって分けられ、スピン \uparrow の粒子は上方に、スピン \downarrow の粒子は下方にゆき、各々が検出器 D_1 と D_2 に向かう。 D_1 が (または D_2 が) 粒子を検出すればスピンの \uparrow (または \downarrow) であることが分かる。これでスピンの測定が終了し、“波束の収縮”が実現する。この場合、粒子の通路決定がスピン測定に伴う“波束の収縮”に直結している。なお、通路決定は D_2 を取り除いてもできる。その場合、到達時刻を過ぎても D_1 に検出信号がなければ、粒子は明らかに下方に行ったのであり、スピン \downarrow の測定が完了し波束は収縮する。これを NO 型測定 (negative result measurement) と言い、“波束の収縮”が検出器内の熱的不可逆過程によるとするエルゴード増幅派の観測理論に対する反証的パラドックスとして用いられた (例えば文献 20 参照)。

いずれの場合も、検出器通過後の二つの分波を合流させたとき、Al 位相器の場合のような干渉は起きない。Rauch 達の実験は中性子の通路決定をしていなかったのである。もしも Al 位相器の代わりにカウンターのような通過検出器において通路決定をしたとすれば、チャンネル O での干渉は消える。Al 位相器と通過検出器は正反対の機能をもっていたわけだ。その中間の機能をもった装置もありうる。すなわち、位相相関はある程度消えるが、干渉現象がかなりの程度残っているという場合である。通路決定としては不完全測定ということになるが、前節で述べた超微細加工技術で実現したメソスコピック現象は正にこの場合である。

さて、“波束の収縮”をもたらず測定操作は、通常、極めて多数の自由度をもつマクロ系である測定器の関与によって可能になると考えられており、多くの観測理論はその線に沿って組み立てられている。では、マクロ系と相互作用

用すれば、必ず“波束の収縮”が起こるのか？ それは違う。A1位相器も極めて多数の自由度をもつマクロ系である。したがって、この干渉実験はマクロ系との相互作用が必ずしも“波束の収縮”を与えるものでないことを教えてくれた。とすれば、どのような場合に“波束の収縮”が実現し、どのような場合にしないのか？ また、どのような場合にその中間の場合、例えばメソスコピック現象が起こるのか？ 観測理論はこの質問に答えることのできる“criterion”を提示しなければならない。その意味で、中性子干渉実験は観測理論に対する逆方向からのチェックだというのである。

Stern-Gerlach 実験の場合、全測定過程は磁場によるスペクトル分解過程と検出器による検出過程とに分かれている。例外はあるにしても、多くの量子力学的測定過程はこのように分解して考えることができる。スペクトル分解過程では位相相関は保持され、検出の段階で消される。“波束の収縮”が起こるのは検出過程である。両過程ともマクロ系との作用によって実現するのに、どうしてこのような相違が生まれるのか？ この質問に答えるのも上記の criterion である。

観測問題の立場から見て、もっと面白い実験がある。装置全体に一定の静磁場をかけ、それと同方向に偏極した中性子ビームを投入する。チャンネル I には A1 位相器をおき、II には静磁場に垂直の方向に振動磁場をかける。II を通る分波は振動磁場のためスピンの反転してチャンネル O に行く。詳細は省くが、この実験では、チャンネル O で巧妙な操作を行って、二つの分波の間の干渉を $\cos(\chi + \dots)$ の形で観測したのである (χ は A1 位相器が与えた位相のずれ)。II でスピンの反転したものだけが O での干渉を与えるように工夫されている。

そこで観測問題的な疑問が生じる。チャンネル II でスピンの反転したのは確かだから、中性子が II を通過したことを観測したはずである。そうであれば、“波束の収縮”によって I の分波は消えるから、干渉現象など起こるはずはない。ところが、現実には干渉が観測されている！ J. P. Vigiér はこれをコペンハーゲン解釈 (wave or particle という立場) の破綻と見た。²¹⁾ そして彼自身の主張 (wave and particle という立場) に沿って、チャンネル I と II の双方に振動磁場を入れる実験を提案した。彼によれば、干渉を観測する (wave を見る) と同時に、どちらのチャンネルを通ったかを決められる (particle を見る) はずであった。Rauch 達はその実験を実行し、この場合もきれいな干渉

を観測した。しかし、通路を決めたわけではない。

私の考えは Vigiér とは違う。通路決定に伴う“波束の収縮”が起こるかどうかは、この場合も上記の criterion によって判定すべき問題である。我田引水で恐縮だが、私達の多ヒルベルト空間理論²⁰⁾はその criterion を提供した。これを用いてその干渉現象を分析し、二つの分波が位相相関を保持し干渉を起こす理由を明らかにした。²²⁾ 一方のチャンネルで (マクロ系との相互作用による) 力学的な変化が起こったとしても、それだけで通路決定型の“波束の収縮”が実現するわけではない。コペンハーゲン解釈の破綻という解釈は速断に過ぎる。Delphi で Vigiér は私の主張を受け入れた。

通路決定にはならなかったが、スピン反転が確認された以上、ある意味で情報が得られたわけだ。これも広い意味での観測といえようか？ 私自身まだよく考えていないので早まったことはいえないが、“波束の収縮”を伴わない観測が何らかの意味で存在するのかもしれない。M. Cini などはそのような理論を作ろうとしているらしい。²³⁾

Rauch 達はそれ以外にもいろいろと興味深い実験をやっている。例えば、チャンネル I に A1 位相器、II に吸収率 $1-\varepsilon$ の物質を入れる。このとき II を通った分波の振幅は $\sqrt{\varepsilon}$ だから、干渉項は $\sqrt{\varepsilon} \cos \chi$ となるだろう。また、II に $1-\varepsilon$ の確率で中性子を遮断するチョッパーを入れれば、干渉項は $\varepsilon \cos \chi$ となるだろう。前者は振幅の和であり、後者は確率の和である。彼らはこの ε 依存性を実験的に確かめた。最近 II に入れる装置を工夫して、この両者の中間の場合を実現している。また、干渉項に対する中性子ビームの単色性の良否 (または波束長の長短) の効果を調べ始めている。いずれも観測理論的興味をそそられる実験ではある。

かつてシュレーディンガー波動関数自身は直接観測にかかるものではないとされていた。しかし、中性子干渉実験は位相を含めた波動関数の観測可能性を実験的に示し、改めて波動関数の“reality”を印象づけた。Vienna 会議 II の最後に“Interpretation and epistemological significance of matter-wave experiments”というパネル討論が組まれたのもそのためである。そのパネル討論では Vigiér はコペンハーゲン解釈の変更を強硬に主張したが、大勢は当然のことながらそうはならなかった。波動関数が単なる数学的道具ではなく、かなりの程度の reality をもつものであると認識しなければならないとしても、その認識は直ちにコペンハーゲン解釈の基本を破壊するところまでは行かないだ

ろう。しかし、観測や測定の内容的再検討を促すものであることは間違いない。また、マクロ的に離れた二つのチャンネル間の位相相関や“波束の収縮”は、EPR パラドックスや遅延選択実験の場合と同じように、アインシュタインの嫌う非局所的長距離相関である。量子力学の原理的特徴が突出するところには必ず出て来るものだが、古典的立場から見れば、たしかに一つのミステリーである。アインシュタインの疑問が心のどこかに残る。

4. おわりに

理論的側面からの話をする余裕がなくなってしまった。詳しい話は別の機会に譲って、二、三の補足をする。

観測問題についての理論的論争は二つに大別できる。一つは EPR パラドックスに代表される（コペンハーゲン解釈にもとづく）量子力学の理論体系そのものへの疑念とそれをめぐる論争である。それについてはある程度述べた。もう一つは、現在の理論体系を認めた人達の間で起きた論争であり、測定過程（とくに測定による“波束の収縮”）の物理的内容や認識論的意義を問うものである。これについては、Wigner 派と Rosenfeld 派（エルゴード増幅派）との論争を忘れるわけには行かない。私達の多ヒルベルト空間理論もその論争に刺激されて始まった（その間の事情については文献20参照）。他にも数多くの観測理論が提出されているが、とくに有名なものとして多世界理論がある。これは量子力学的測定に際して、各測定値毎に現実の世界が分裂するという奇妙な理論である。近頃、宇宙発展における量子論的効果の議論に利用しようとする気運があって人気が出た。しかし、かつてこの理論を高く評価して、熱心に宣伝役を勤めた Wheeler はその後批判派に転向した。また、環境が“波束の収縮”をつくるという理論が最近提案され、一部でもはやされている。環境の量子力学状態が、各測定値に合わせて自らを直交分解するというのである（例えば文献1の Zurek の論文参照）。いずれの理論も私には馴染めない。分裂やら直交分解やらが何時起こるか不明である。もしも、スペクトル分解の段階で起こるとすれば、おかしなことになる。²⁴⁾ 何よりも、“波束の収縮”のための criterion を具体的にどうやって出したらいかが分からない点が、私には気になる。前2節でも強調したように、観測理論の今日的任務はその criterion の導出にある。そ

れができない観測理論は単なる抽象論だ。この点を強調して結論としたい。

文 献

- 1) *Proc. Int. Symp. "Foundations of Quantum Mechanics"*, ed. S. Kamefuchi, et al. (Physical Society of Japan, Tokyo, 1984).
- 2) *Fundamental Questions in Quantum Mechanics*, ed. L. M. Roth and A. Inomata (Gordon and Breach, 1986).
- 3) *Quantum Concepts in Space and Time*, ed. R. Penrose and C. J. Isham (Clarendon, Oxford, 1986). なお、次の新著紹介を見よ。並木美喜雄: 日本物理学会誌 **42** (1987) 1011.
- 4) *Hadronic J. Suppl.* **1** (1985).
- 5) *Proc. Int. Symp. "Foundations of Modern Physics"*, ed. P. Lahti and P. Mittelstaedt (World Scientific, Singapore, 1985).
- 6) *Fundamental Aspects of Quantum Theory*, ed. V. Gorini and A. Frigerio (Plenum, New York, 1986).
- 7) *Proc. Int. Conf. "Microphysical Reality and Quantum Formalism"*, ed. A. van der Merwe, et al. (Reidel, Dordrecht, 1988).
- 8) *Proc. Int. Conf. "New Technique and Ideas in Quantum Measurement Theory"*, Ann. New York Acad. Sci. **480** (1986).
- 9) *Proc. 2nd. Int. Symp. "Foundations of Quantum Mechanics"*, ed. M. Namiki, et al. (Physical Society of Japan, Tokyo, 1987).
- 10) *Proc. Int. Symp. "Foundations of Modern Physics"*, ed. P. Lahti and P. Mittelstaedt (World Scientific, Singapore, 1987).
- 11) *Proc. Int. Wksp. "Matter Wave Interference"*, *Physica B151* (1988) 特別号。なお、次の紹介記事も見ていただきたい。並木美喜雄: 固体物理 **23**(1988) 77.
- 12) *Proc. Int. Symp. "Problems on Quantum Physics"* (World Scientific, Singapore, 1988).
- 13) *Proc. Int. Mtg. "The Concept of Probability"* (Plenum, New York, 出版予定).
- 14) 例えば、次の本を見よ。F. Selleri: *Die Debatte um die Quantentheorie* (Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig, 1983) [桜山義夫訳: 量子力学論争 (共立出版, 東京, 1986)].
- 15) 大貫義郎: 日本物理学会誌 **39** (1984) 498. 物理学最前線 9, 大槻義彦編 (共立出版, 東京, 1985).
- 16) 例えば、次の解説を見よ。江沢 洋: 日本物理学会誌 **34** (1979) 1015.
- 17) J. S. Bell: *Physics* **1** (1964) 195.
- 18) D. Bohm: *Phys. Rev.* **85** (1952) 166, 188. J. P. Vigiér: 最近の研究については文献13参照。高林武彦: 例えば、文献1参照。
- 19) E. Nelson: *Phys. Rev.* **150** (1966) 107.
- 20) S. Machida and M. Namiki: *Prog. Theor. Phys.* **63** (1980) 1457, 1833; *Proc. Int. Symp. "Foundations of Quantum Mechanics"* (Physical Society of Japan, Tokyo, 1984) p.127, 136. H. Araki: *Prog. Theor. Phys.* **64** (1980) 719. 並木美喜雄: 物理学最前線 10, 大槻義彦編 (共立出版, 東京, 1985) p. 139; *Found. Phys.* **18**(1988) 29.
- 21) J. P. Vigiér and S. Roy: *Hadronic J. Suppl.* **1** (1985) 475.
- 22) M. Namiki, Y. Otake and H. Soshi: *Prog. Theor. Phys.* **77** (1987) 508.
- 23) M. Cini: Vienna 会議 II におけるパネル討論, 文献11参照。および私信。
- 24) Y. Morikawa, M. Namiki and Y. Otake: *Prog. Theor. Phys.* **78** (1987) 951.