

観測の理論（観測者効果）の進展

佐 藤 均

Neues Entwicklungsstand der Beobachtungstheorie

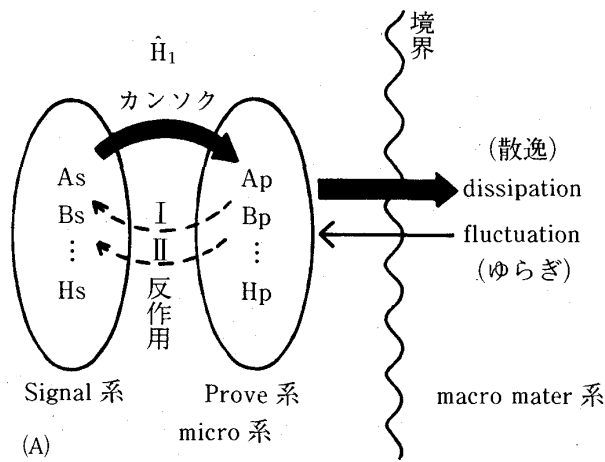
von

Hitoshi Satoh

はじめに

測定の哲学つまり観測の理論のはじまりは古くは Copenhagen 学派の御大 Niels Bohr 等によりつまり後期量子論の誕生と殆んど同時に誕生したと見做され同理論は60年以上たった今日迄延々と続いている。明らかに観測理論は量子力学の中でも常に中心的テーマであり続け、その中からみ多い概念が生まれたのである。今日でさえ『自然は元来しかるべき物理的値を持つのではなく、観測によりそれらの値を取る様に仕向けられるのである』とのコペンハーゲン正統派の主張は我々にとって一つの驚きではないだろうか。Louis de Broglie はこの主張を伝統的物理思考へのクーデターだとして認めようとせず又 A. Einstein も「君は人が月を眺めている時だけ月が存在すると主張するのか」と反論した。^{XX}ドイツの Max Planck ですら量子力学の統計的解釈に反対して N. Bohr とたもとをわかったのであり、波動力学の E. Schrödinger も Copenhagen 学派の信条には追従できなかった。所が皮肉なことといわゆる非相対論的 Schrödinger 方程式たる $H\varphi(r) = E\varphi(r)$ には明白に観測による波束収縮の考えが強く関与していると思われる。というよりは観測理論の出発点を与えている！

N. Bohr と並んで前期量子論の完成者である A. Sommerfeld (Geheimrat) は「理性では W. Heisenberg の行列力学を、心情では Schrödinger の波動力学側に立つ」との立場を取った。1935年の Physical Review 誌での Einstein と Bohr の論争程我々に強烈な印象を与えるものはないであろう、そこで神はサイコロを振らず (...ob der liebe Gott würfelt nicht... との主張に対し N. Bohr は「神がサイコロを振らないと何故あなたは知っているのですか」とやり返したのだった。Einstein にとって特に不満だったのは一回の観測でどんぴしゃりと電子が回折像のどこに来るか予言できないことまた放射性物質の塊りの内のどの粒子が何時崩壊するのかを予言できない点等であった。(客観的偶然性への反発) 勿論彼は L. de Broglie や D. Bohm の様に



(観測プロセスの「統計熱力学的」解釈を示し、エ
ルゴード増巾派への一つの修正モデル図である。)

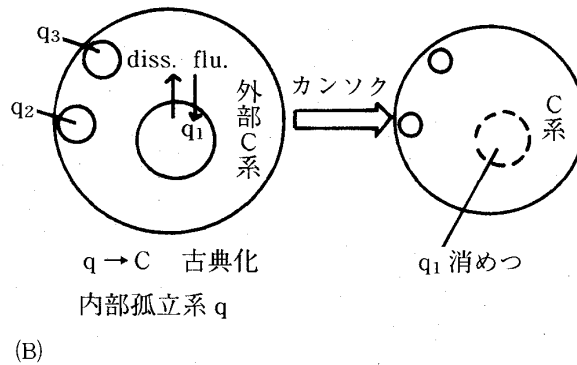


図 I

現時点では観測不能な「かくれたパラメーター」を云々する気はなかったのだが確率統計性のみだけでは情動的に不満足だった。結局は Einstein もかの Laplace の魔や Maxwell の魔物に束縛されていたのだろう。ミクロとマクロのはっきりした境界線はなくぼやけている。

本 論

□ 観測 (測定) の定義とは？

量子力学での観測とは、一方では過去になされた予測に対する判定者の役目を持つと同時に他方では未来に起るべき出来事の予測に必要な資料の提供者たる役目をも持つ。ディラックの言葉を使えば、ある状態におかれた体系に対してある観測を行うということと、その体系を観測の仕方と結果によって決められるある新しい状態に「用意する」ということが一度に行われる。このように観測が過去と未来の両側にしかも異なる仕方につながっていることは時間の概念やエントロピーと関連して重要な意味をもつ (観測の理論 II, 湯川秀樹)

前述の様に観測の理論は量子力学と時を同じくして N. Bohr, M. Born... 等により始められたがここでいう「観測」とか「測定」の語義とははたして何であろうか、そして普通日常生活でのそれとどこが違い又いずれが共通しているのか。

かつて故松下真一氏はその著書「法華経と原子物理学」の中で量子力学的観測とは状態を確率の眼で見る事であると表現されこれは正に至言であり最も簡潔な表現であろうと感心する次第である。この世界での主役は本質的に複素数 $a \pm ib$ である所の波動関数 ψ か統計作用素 (密度行列) ρ のいずれかであるが然るべき理由により観測の理論では後者の方がより適用性が広い。後者密度行列 ρ は1927年頃同時にしかも独立して von Neumann と Landau により発明されたものでありいわゆる Liouville 方程式 $i\hbar \frac{\partial \rho}{\partial t} = [H, \rho]$ が Schrödinger 方程式に相当している、 $H\rho - \rho H \neq 0$ の非可換性。今量子論的物理量 A の観測値の平均値 (期待値) を $\langle A \rangle$ と書けば $\langle A \rangle = \text{Tr}[\rho A]$ となる。そこで観測 (測定) の定義は次の様になるだろう

定義：状態の記述法を量子論的なものから古典論的なものへと移行し切り換える操作

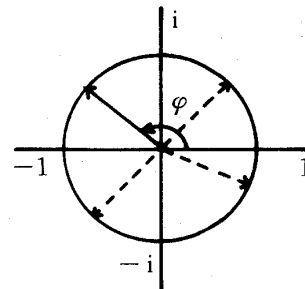
この世界では当然の事ながら不確定性原理に反する観測測定は不可能であると主張している。物理量 A の古典値を求める操作が真の観測なのである。その為には一種の平均操作が必須となる。 ρ はいわば超空間での超ベクトルでもある。

□ 観測 (測定) プロセスで何が起こるか？

ミクロ系では観測する前は Schrödinger 方程式に従ってなめらかに因果関係を保ち行動するが観測によって偶然的な非可逆非因果的プロセスへと瞬時に移行するとされる。本当はそこでは何が生じてるのだろうか。観測直前迄は Schrödinger 方程式はいわば非事実的プロセスを表し ψ の位相は維持されているが測定と同時に位相関係が断たれ非干渉化することにより「波束収縮 (又は発散)」が起こる。明らかに観測の前後では状態が急変したり状態が破壊されることになる。観測前は波動関数 ψ で記述できたのが観測後には密度行列 ρ (統計演算子) でしか記述できなくなる、というのは ψ は純粋状態 (Reinesfall) でしか使えず、 ρ は混合状態 (Gemenge) にも使えるからである。従ってこの論法で行くと観測により純粋状態から混合状態へと移行しその分、エントロピーが増大することになる。この事から観測理論の説明に長い間「エルゴード増巾派の非可逆課程説」が多くの人々を強く説得して来たと考えられている。最近ではエルゴード増巾派にとって不利な実験事実も出現してきた。例えば非同時計数法。(M. レニンガー, 町田, 並木理論)

量子力学の能動的な主役は ψ 又は ρ であった。波動関数 ψ は complex なので Euler 座標の単位円上の点又は射線で適格に与えられる。

$$e^{i\varphi} = \cos \varphi + i \sin \varphi \quad (\text{Euler の式})$$



そこで観測行為はその unit ray の方向を指定するがこれは明らかに偶然性の発露である。unit ray の方向がびたりと決まることは正に多数の固有値の内の一にきめることと同じである。従ってこの考えは70~80年代に大流行となった「自発的対称性の破れ」の思想のプロトタイプともなり得たのである。(ゲージ理論)

ψ は又状態 vector でもあるので Dirac 表示 $|\psi\rangle$ を使って Schrödinger 方程式を $i\hbar \partial_t |\psi\rangle = H |\psi\rangle$ と一般化される。 $|\psi\rangle$ が上の unitray の方向と一致している。H は無論 Hamiltonian である。観測により状態は急変するのだからもう一つの Schrödinger 等式 $H\psi = E\psi$ からいきなり $E = H$ とする乱暴なことは出来ないことは当然である。先刻の状態 vector とは Hilbert 空間の点でもある。観測量 Ω をこの Hilbert 空間上の作用素と考えるとその様な作用素の固有値 ω に対応する固有 vector ϕ_ω でもって今問題とすべきひとつの状態ベクトル ψ をスペクトル分解して $\psi = \sum_\omega A_\omega \phi_\omega$ と書く時、 Ω が ω なる値を取る確率は $|A_\omega|^2$ となる。又電子がどこにあるのかも確率的にのみ答えられる、つまり「確率の波」が物理現象の正しい表現を与える。この場合の Schrödinger 等式は $\Omega \psi_\omega = \omega \psi_\omega$ ($\psi = \sum_\omega A_\omega \phi_\omega$) である。従って観測プロセスにより測定値 $\hat{\omega}$ を得る事は固有値 ω の set から $\hat{\omega}$ を瞬時に選出することになりそれは偶然的確率的过程を意味する。より詳細は拙著原子力学的世界観でも論じた。

量子力学において時刻 t の力学量の値については状態 ψ でそれを「測定」したとき測定結果は一般に多様で一義的予言はできないが確率論的な期待値は $\langle \psi | A(t) | \psi \rangle$ で与えられる、ただし $\langle \psi, \psi \rangle$ とノーマライズした。要するに古典力学においては力学量と測定値は同義であったが量子力学では一旦作用素と状態ベクトルとに分かれ、これが「測定」の期待値という所で総合され真の物理へと回帰するのであった。

□ 真におそるべき主にユダヤ系学者の譜系

ここではとりわけ観測理論を中核に持つ量子力学の発展史に対する欧米系ユダヤ人学者の超独創的譜系について考えて見たい。何といってもユダヤ人は宗教的意味で「神の選民」でありそれ故彼等の歴史は悲劇と迫がいのそれであった。とりわけ今世紀最大の悲劇はナチズムの台頭であろう。それ以前からユダヤ人は欧州各国ではしばしば軽べつされ公職や官吏の道は閉ざされており、多くのユダヤ人は金融業かさもなければ学問、芸術等の道に才能を発揮する以外になかった。戦前のドイツの学術雑誌の水準は欧州でも客観的にいって最高のレベルにあったのだがナチスがユダヤ人を大量に追放した後は次第にそのレベルは低下し内容が乏しくなる一方だった。戦後西独のアデナウワー政権以来追放したユダヤ系学者を大金を使って呼び戻したとされる。私が少年時代に聞いた話では確かにユダヤ人にも迫害される理由も皆無ではなかった、というのは例えば研究所や大学等で一旦ユダヤ系の学者がそのチーフになるや否やしばしばその弟子はユダヤ系によってその Stelle を独占してしまうからだという。その事はドイツに限らず他の欧州諸国でもそうだったろう。その傾向は特に今世紀の30年代迄強かった様だ。こ

の時代はまさに量子論形成の最もはなやかな時と符合している。A. Einstein, A. Sommerfeld (Geheimrat)。コペンハーゲン学派の御大 Niels H. Bohr 父子, Max Born, P. Jordan, E. Fermi, ハンガリー出身の von Neumann, 同じく E. Wigner。(この両者は観測の理論で特に有名), ロシアの L. D. Landau, 米の R. Oppenheimer, Rabi, Bethe, J. Franck, Lise Meitner, O. Frisch 又近年では Superstring で有名な D. Gross 量子生物学の M. Delbrück……ととても10指ではかぞえられないまさに独創の系譜はいずれもユダヤ系欧米人なのであった。今世紀の最大の理論たる量子力学や相対性原理そして人類に深刻な影響を与えた所の核の利用や宇宙論等はまさにことごとくユダヤ系の学者だったと主張できる程である!! ユダヤ人が選民として世界をリード支配するというのはある意味で正しいのだろうと思わざるを得ない。ともかく彼等の学問のスケールの壮大さは公平に客観的に認めざるを得ず, 同様な傾向は例えば Otto Wahlburg の様な生物, 医学系の系譜にも妥当する筈だがこちらの方面は筆者にはよく解らないが多分にしてそう云えるだろうと信じている。特に Bohr と並ぶ A. Sommerfeld や O. Wahlburg はあまりにも偉大であった為に流石のナチスも彼等には手を出せなかったと聞いている。ついでながら, いや本当は本命というべきだが当の観測理論の系譜にも言及せねばならない。いわゆる E. R. P. パラドックスでも有名な Einstein, Bohr, Born, von Neumann, E. Wigner Everett III 世 (多重世界) 荒木不二洋, 柳瀬睦男, オーストラリアの, H. S. Green, ミラノ大学のアントニオダネリ, アンジェロ・ロインゲル, J.M. プロスペーリ (エルゴード増巾派の非可逆過程) 湯川, 朝永, 又最近ではエルゴード増巾派を否定する町田, 並木理論等々がそうそうたる観測理論の大家と思われる。とりわけミクロな対象とマクロの測定器との相互作用への考察は Bohr, von Neumann... 以来いずれもきわめて重要な考えを提供しつづけて来た。

以前から気になっていたのだが所謂非コペンハーゲン学派の立場をとっていた L. de Broglie や E. Schrödinger 等の考えははたして消滅してしまったのだろうか。de Broglie の非線形波動力学はやがてコヒーレントなソリトンの考えとなって生き残り今日の「ソリトンパラダイム」を創ったと思われる。そこでは波束の安定性が保障されている。衝撃波と物質粒子はソリトンによって同一視され得る様になった。

そこでは, 何か「非カオス的」プロセスが存在する筈だ。

□ 波束の崩壊(収縮)は測定器の型に依存するか?

およそ観測(測定)しなければ何物をも知り得ないし又観測が状態に強く関与し不確定性を生ずる。公理的には観測行為により波束の収縮をもたらすの非干渉化, 位相関係の破壊を生ずるといえる。特にハイテク万能の時代での観測理論を展開する為には多様な測定器検出器のサイズ, 種類, 作動タイプによりどの程度波束収縮が実現するかを分析することは肝要であろう。

普通我々は測定器はスペクトル分解機能と detector 機能は最小限必須と考えがちである。

所が意外にもっと単純な装置でも立派な測定器たり得ることが例えば P. M. A. Dirac や J. C. Polkinghorne による電気石偏光板による光の偏光現象では電気石結晶そのものが測定器であることが以前から指摘された。そこでは重ね合わせの原理が成立し光が通過する確率としない確率の和が $\sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha = 1$ と表すことが出来る。全く同様に電波の偏光器についても妥当しよう。一方更に測定理論で従来広範囲に取り上げられた装置はいわゆる不均一磁場 H をかけた Stern-Gerlach のスピンの二意性と空間量子化の実験であったろう。そこではスペクトル分解の作動段階ですでに観測が完了している。この装置ではエルゴード増巾派（不可逆過程の）にとって不利な no result テストを行うことが出来た。さて更にラジカルで有名なものは電子に対する Young の二つ穴の干渉実験や中性子に対するドイツの Rauch 等による Si 単結晶から作った干渉装置であろう。Si, Ge (Li) その他の化合物半導体 detector の素子は性能向上と共に小型化する一方、いわゆる巨大加速器に付随する検出器は数十トンにもなり益々巨大化する。1930年代には Geiger-Müller counter や霧箱位しかなかったのが80年代には液体水素やプロパン等の入った巨大な Bubble chamber, spark chamber, MWPC が出現し更に例えばニュートリノ実験には神岡にある地下深くにある巨大な量の純水とそれを囲むチェレンコフ光用の無数の光電子マルチプレーターの set も我々と印象深い、重力波干渉装置も近い将来関心をもたれる。それらはさて置き何か伝統的なエルゴード増巾派の理論の修正版が創れないものだろうか。それとも近年国際的にも有名になりつつある我が国の町田、並木理論を信奉することになるのだろうか。最近の観測理論からの帰結は我々に少なからず教訓的である。そのいくつかは①波束の収縮は以前 von Neumann 等が考えていたより測定各段階でより早期に完了することつまり S 散乱行列処置段階で終わっていること、②検出プロセスと増巾プロセスや記録を切り離して考えること、③理論には波動関数ではなく統計作用素（演算子） ρ を使うこと、④少々の修正では一旦はまともと考えられていたエルゴード増巾派の理論が不完全であること ⑤ミクロの系とマクロと考えられた測定器の関係を洗い直すこと、単一なヒルベルト空間では不十分な事等々である。更には von Neumann 流の人間の高度な意識を観測理論に含ますことの余分であることと Everett III世の ψ の多重世界の分裂説はあまりにも「あの世的」でいただけないこと等々もあるが一度は大変流行した。

□ 再度「時間」とは？

ここでは観測理論を通じ時間又は時間性の問題をなるべく思惟経済的に考えて見よう。ごく普通には日常生活時間や時計時間をもって、抽象的絶対時間の代用をしている。時間は人間の意識の源流に他ならず人間の理性は時間の流れによって物事、出来事を整理するように慣らされている。ここでは von Neumann 流に人間の質問に掛けられたつまり意識の内部にある時間のみを問題にすれば十分と思われる。しょせん時間とは二つ以上の出来事の「相関」以外の何物でもない。故に相関する物理量が無ければ時間はあり得ないことになろう。現実には相関に

かわる物理量が全くない等と想定することの方が困難であろう。現在相互作用が完了して無い様に見えても相関は必ずあったからだ。さて今宇宙のごく初期のつまり完全に量子論の世界を考える際、そこでは時空のゆらぎと素粒子の生成消滅とは殆んど同義なのだがそういった世界では相関はシャープではなく「時間の矢」も無い。従って宇宙が膨脹し冷却し、古典的世界に成長してはじめて明瞭な相関や時間の矢は出現し、人間の理性にとりいかにも時間らしさが識知されるのではなからうか。これからも類推される様に量子力学の観測プロセスとは不明確な相関が観測後にシャープになり古典化することだと主張できるだろう。その様に相関がシャープ化した時我々は「観測が遂行された」と呼ぶのである。

かくして時間 t も含めて「自然それ自身は観測によって然るべき値をもたされ存在することになる」との Copenhagen 派の信条へとたどりつくことになる。同信条のもととは勿論 N. Bohr 等の相補性及び不確定性原理であった。その意味で量子力学のエッセンスが行列を押し進めた所の非可換代数つまり交換関係であることは間違いない。かようにして一まず我々は“時間は別に相関に限らないではないか”とか“人間の意識とは独立の時間はどうなるのか”の質問は回避することが出来るだろう。

□ 不等式の自然法則（現象の暗さ）

Bohr の相補性、不確定性関係には様々な一对の共役力学変数により構成される。 Δ を不確定性誤差とすれば $\Delta P \times \Delta x \geq \hbar$, 粒子の個数と波の位相に関する $\Delta N \cdot \Delta \phi \geq \hbar$, 方位角と軌道角運動量の Z 成分の間なら $\Delta \phi \cdot \Delta l_z \geq \hbar$, 粒子の位置とエネルギーの間には $\Delta x \cdot \Delta E \geq \hbar / m P_x$ といった具合であるが $\Delta E \Delta t \geq \hbar$ の関係に関してかつて L. D Landau は「この関係はおかしい、我々はストップウォッチを見ながら十分正確にエネルギーを測定できるからです」と一見大変な失言をしたことがある。今日の我々が $\Delta E \Delta t \geq \hbar$ は系のエネルギー授受については正しい事を知っている。しかし本当に Landau が指摘したかった事は時間 t のみは力学変数ではなくパラメーターである点なのだ。

しかも t が他の力学変数の仲間に入れても結果として矛盾がないといった時間の神秘性を彼は指摘したかったのだと思う。又今日厳密に場の量子論から時間 t が物理的作用そのものではないことが立証されている、にも拘わらずしばしば日常生活等ではこの両者が事実上区別ができないこともある、例えば醸造や沈澱熟成プロセス等である。超音波の作用で醸造期間がうんと短縮されるのだからあたかも時間が作用と等価の様にふるまうからである。難溶性の塩の溶解度の減少についても同様であろう。更に一層本質的で不思議なのは線形の Schrödinger 方程式の中の t である。ここでも t は本来 parameter に過ぎないのがあたかも力学変数であるかの様に入り込んでいる。しかも全体としてつじつまが合っていることである！

ニュートン力学と共に同方程式は $t \rightarrow -t$ の変換で $\psi \rightarrow \bar{\psi}$ をともなう結果法則は可逆であり熱力学と異なり時間の矢は元来ない。若し非可逆な熱力学に合わせようと*試みるならば非線

形に改めざるを得ないがうっかり同等式には手をふれると大変な事になる。（*例えばエントロピー S の導入により）やはり時間の問題はこわいものである。特に“時間の測定”と云う自明と思われるものに反省の必要があり現実には t の代わりに時計変数 T とその他の力学変数との相関を見るのであり t と T が $1:1$ にほぼ完全に対応していれば十分でその対応が $1:1$ と完全な様な何か Newton 的絶対時間を探そうとしてもその様な抽象的時間はもともと無いのである。

□ 技術が基礎科学に寄与する

従来長い間科学が様々な工学技術を生み出して来たが今日ではその逆でハイテクが基礎科学の解明（その中には当然量子力学の観測も入っている）にきわめて積極的な貢献をしていることを我々は知っている。レーザー光あり電子線ホログラフあり又ナノテクノロジーによる固体エレクトロニクス素子や超電導体の加工あり等枚挙にいとまがない。より具体的には見ることの出来ない ψ 波動関数*やその位相とか電磁ポテンシャル A , φ の存在, 又波動関数の二価数これは従来は証明できないと思われたものすらハイテク技術は可能にした。神秘で奇怪にすら思われた波束の収縮崩壊も疑いなくその都合すら定量的に知ることが出来る様になったのはおどろきである。（ ψ 自体は勿論今でも直かには見えないのだが磁束量子とか電子線ホログラフによって間接的に眺めることは可能であるしいわゆる AB 効果により A_μ ポテンシャルの存在が眺められる）これらは当然モダンな町田・並木の観測理論での波束収縮度のオーダーパラメーターの理解に貢献している。今日のエレクトロニクス機器, 検出装置等は量子力学の産物であることは疑う余地はないのだがその理論には現在ですら仲々直感的に把握しづらい所があるのは否定出来ずとりわけ「状態の重ね合わせ」とか「トンネル効果」「波束の崩壊」等のイメージはそう容易ではない。有名なパラドックスたる de Broglie のそれや「Schrödinger の猫」そして「E. Wigner の友人」の Paradox は我々日常的直感とは今でも相入れないものがある。猫のパラドクスでの波束の収縮は恐らく放射性物質の崩壊によるごく初期の段階で完了するのだろうか猫の生の状態と死のそれとの重畳（一次結合混合状態）というのは我々にはよく理解出来ない。近年観測理論にたずさわる人々が云い出すはるか以前に A. アインシュタインは「物理学と実在」の著作中に ψ 関数が決して一ケの系のとりうる状態を記述するものではなく統計力学的意味での系の集団に対するものであることつまり ψ 関数は物理的状态に一義的に対応づけられるものでなく, それが単一の系の物理的状态の完全な記述だと解釈できないことを我々に忠告していた。von Neumann は Bohr と対照的に量子論的装置の場合を考えに入れ今日の理論の基礎をすえた。観測の相互作用前では系は純粋状態であったがつまり $|\psi^i\rangle$ が相関状態 $|\psi^c\rangle$ に時間発展する。スピン系 $|\psi^i\rangle = (\alpha|\uparrow\rangle + \beta|\downarrow\rangle)|d\rangle \rightarrow \alpha|\uparrow\rangle|d\rangle + \beta|\downarrow\rangle|d\rangle = |\Phi^c\rangle$, $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$
 ψ の代わりに密度行列 ρ を用いれば

$\rho^c = |\phi^c\rangle\langle\phi^c| = |\alpha|^2 |\uparrow\rangle\langle\uparrow| |d\uparrow\rangle\langle d\uparrow| + \alpha\beta^*$
 $|\uparrow\rangle\langle\downarrow| |d\uparrow\rangle\langle d\downarrow| + \alpha^*\beta |\downarrow\rangle\langle\uparrow| |d\downarrow\rangle\langle d\uparrow| + |\beta|^2 |\downarrow\rangle\langle\downarrow| |d\downarrow\rangle\langle d\downarrow|$
 から量子論的干渉を表す非対角項を消去し収縮した密度行列 $\rho^r = |\alpha|^2 |\uparrow\rangle\langle\uparrow| |d\uparrow\rangle\langle d\uparrow| + |\beta|^2 |\downarrow\rangle\langle\downarrow| |d\downarrow\rangle\langle d\downarrow|$ を残すことにより測定結果を互いに独立にする。 ρ^r は古典的な相関をもつスピンと detector との結合系の二者択一的な状態を記述することができる点で ρ^c よりも優れている。 $\rho^c \rightarrow \rho^r$ への状態収縮により系と detector の複合系について観測者が得る情報は増加ではなく減少をもたらす。先述の如くエントロピー $S(\rho) = -\text{Tr}\rho \ln\rho$ は当然増加しその量は $\Delta S = S(\rho^r) - S(\rho^c) = -(|\alpha|^2 \ln|\alpha|^2 + |\beta|^2 \ln|\beta|^2)$ となりつまり純粋状態 \rightarrow 混合状態へと非可逆的に移る。情報の獲得は観測者がすでに状態 ρ^r に崩壊してる detector と相互作用し相関を生じる時のみ達成される。観測によりみごとに非干渉化が生じた。 $(\rho$ 密度行列の非対角項を 0 としてしまう操作)

□ Wigner の定理に固執すべきか否か？

従来の所謂エルゴード増巾派の理論に欠陥がある以上我々は何か Wigner の定理の大枠に沿う以外にない様に思われる。その定理とは「対象量子が重ね合わせ状態、測定器系が混合状態という初期状態からスタートしてもユニタリー的时间発展によっては“波束の収縮”は実現しない」である。エルゴード増巾派は時間発展のユニタリー性を破って波束の収縮を導くが Wigner はこれをきびしく批判した。我々は粒子の相互作用素過程に対する S 行列のユニタリー性をこわしてはなはないと信じている。

さて Wigner の定理云々以前に二三の plausible な仮定を取り上げよう。その一つはマクロ系では重ね合わせの原理は破れているとするものともう一つはより根元的で困難な仮定だが I プリゴジンやロシアのゲリファントが言及し恐らく実行したと思われるシュレーディンガー方程式の非線形化により「時間の矢」をもたせるといった仮定である。特に後者の想定は観測理論の困難を救う可能性はあるのだが実行は現時点では時期早尚であろう。(数学者の頭の中にはすでに完成した数式があるのであろうが) 第一の仮定に関しては具体的に連続的にやってくる多数の粒子と相互作用する観測器系の局所系(マイクロかメゾスコピック)がどの程度のサイズ又は原子数(分子数)かを理論的にも実験的にも示さなくてはならないだろう。(例えばメゾスコピックで 10^{17} 位とか)

$$\text{一般に波束は } \varphi(x, t) = \sum_k^{k+\Delta k} A_i \sin(kix - \omega it)$$

と表すことができそこでは一種の不確定性関係 $\Delta x \cdot \Delta k \approx 1$ が妥当している。 k は波数である。yes-no 実験を想定する時 detector 通過後の波動関数は $S(k)$ を S 行列要素として $S(k)e^{ikx}$ に近い波束となり、今長さ x をもつ detector の局所系との相互作用で $S(k) = ae^{i\Delta}$ ただし $\Delta = \bar{k} \cdot x$ という構造をもつ。 \bar{k} は有効波数である。我々は時々観測理論の専門家の内或る者は波束収縮はあり得ないと主張し又他の者は在ると主張し面喰らうことがあるが何故その様に事になるの

だろうか？ どうも Δ の内にその理由がある。干渉項に対する強度分布は $\langle I \rangle \propto \exp[-\frac{1}{2}(\bar{k}\Delta x)^2]$ で与えられる。

今 $\bar{k}\Delta x \gg 1$ であれば干渉項は消滅し波束の収縮が生じたことになるし又 $\Delta x \rightarrow 0$ とすればそれは波束収縮が生じないことになる。 $\Delta x = 0$ は単一の Hilbert 空間 (Wigner 定理) へ戻ることを意味する。 $\Delta x \neq 0$ こそ多数の Hilbert 空間を用いる新しい町田・並木理論となるのである。 (*先の猫の状態は決して一次結合ではなく生死の確定した混合状態と考えられる)

終 章

日常的に使う「観測」では観測系のマイクロ又はメゾスコピックな系の状態の記述とか、マイクロの粒子系と観測器系との相互作用の記述等々のややこしい考えは一切自明として不問にしているが量子力学での観測ではこれら状態記述を考慮に入れなければ「観測」の意味すら解からないといった根本的な相異があった。疑いもなく日常的には「波束の収縮」や「状態の重ね合わせ」等は奇怪ともいえる想念であったがこれらは観測問題の中心テーマであると信じる次第である。先述の Schrödinger 方程式の一つの非線形化には、 $\pi = \psi_h^* H k l \psi_l$ とすれば

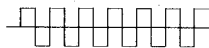
$$i\hbar \frac{d\psi_k}{dt} = \frac{\partial \pi(\varphi, \varphi^*)}{\partial \varphi_k^*}, \quad k \neq l \text{ も一つの有力な候補となろう。これを Weinberg 等式**と称する。}$$

最後に今 $u_i \otimes \Phi \rightarrow u_i \otimes \Phi_i$ とする観測装置を考えた時、理想的測定とは、一般的測定を既知の特殊な状態へ変えることだから

$\psi \otimes \Phi = \sum_i c_i u_i \otimes \Phi \rightarrow \sum_i c_i u_i \otimes \Phi_i$ と von Neumann 式に表せることに観測のエッセンスがあると信じられる。 \otimes は直積を U_i は被測定 of ミクロ系を Φ はマイクロから成る観測器系の状態を表す。量子系の古典化は非干渉と鋭い相関により特徴づけられる。干渉項は統計的に消えることになる。

註

- 1) ここではマクロの測定器系をマイクロ又はメゾスコピックな低次元量子井戸に分割して考えるとわかり易い； $x = n, b$



- 2) ソリトンをもたらす非線形方程式

$$i \frac{d}{dt} \Phi + \frac{d^2}{dt^2} \Phi + 2k |\Phi|^2 \Phi = 0 \quad \text{プラズマではポンデルモチーフ力による密度のくぼみの所に局}$$

在化した Soliton 解が得られる。Soliton に伴う特異点と粒子を同定することができる。

- 3) Schrödinger 方程式の積分形で表した方がよりわかり易い、すなわち $|\alpha, t\rangle = e^{-iHt/\hbar} |\alpha, 0\rangle \langle \alpha, t| = \langle \alpha, 0 | e^{-iHt/\hbar}, \langle \alpha | A | \beta \rangle$

- 4) 理想時計 t と時間変数 T の対応は 1 : 1 に近いが完全ではなく分散関係の中心極限定理が成立つと思われる。

- 5) $A^+ = A$ エルミート operator (実の演算子)

- 6) $\bar{A} = \langle A \rangle$ エルゴード仮説 A の時間平均と位相平均を等しいとする仮定

7) 力学量 $x(t)$ の時間相関関数 $C(t)$ は

$$\lim_{T \rightarrow \infty} 1/T \int_0^T \langle x(t)x(t+\tau) \rangle dt \text{ で与えられる。}$$

8) 多数粒子の到達記録の重ね焼きはスクリーン上に $\bar{P}ab = |\phi_a + \phi_b|^2 = |\phi_a|^2 + |\phi_b|^2 + 2\text{Re}\phi_b^*\phi_a$
又完全測定は $\Sigma 2\text{Re}\phi_b^*\phi_a = 0$ となる。

9) 先述の Stern Gerlach のスピン実験では

$$\text{密度行列 } \rho = \begin{pmatrix} |a|^2 & ab^* \\ a^*b & |b|^2 \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{観測}} \begin{pmatrix} |a|^2 & 0 \\ 0 & |b|^2 \end{pmatrix}$$

へと急変する。勿論 $|a|^2 + |b|^2 = 1$ で \downarrow, \uparrow をスピン自由度とすれば $\psi = a\psi_+(\uparrow) + b\psi_-(\downarrow)$,
又 ρ はエルミート性 $\rho(x, x') = \rho^*(x', x)$ を満足している。

文 献

- 1) 量子宇宙をのぞく 佐藤文隆 講談社 p. 740
- 2) 法華経と原子物理学 松下真一 光文社①-22
- 3) 波動力学のロゴスと de Broglie 研究 佐藤均 本学紀要 第15号 昭和55年
- 4) 原子物理学的世界像 (V部) 佐藤均
本学紀要 第18号 昭和58年
- 5) 局所 Gause 場の哲学とその現代史 佐藤均
本学紀要 第20号 昭和60年
- 6) 最新量子論：コペンハーゲン解釈 学研 「観測者効果」は自然の实在を否定する？ 町田茂
- 7) 物理学辞典 培風館
- 8) 量子力学の考え方 J. C. Polkinghorne 講談社 B 693 (p. 660)
- 9) 量子力学と観測問題 並木美喜雄 physical science mag. Parity 1987年 5月
- 10) 量子論につきまとう雲 町田茂 1990, 8月
physical science mag. Parity
- 11) T. Padmanbhan: Phys. Rev. D 39 1989
- 12) 量子の忍法：トンネル効果 栗原進
Physical science mag. 1992年 8月
- 13) 観測の理論 (III) 湯川秀樹 自然300号記念増刊号

おわりに

ともかく密度行列 ρ を注意深く駆使することにより以前量子力学への不信さえ引きおこした多くの Paradox (その中には物心平行論とか波束収縮に意識介入が不可欠とする考えがあったが) は次第に消えて行く様に思われる。疑いもなく観測系 detector とはマクロ系で巨視的量子変数を持つがその巨視性ゆえに環境体との相互作用によるエネルギー散逸の効果をまぬがれることは出来ず、換言すれば巨視的量子変数は環境による「観測」を受けながらトンネル効果等の運動とするし根本的テーマの観測問題への新しい光明を投げかける可能性をもっている (MQT 巨視的量子トンネル効果), 又自由中性子の干渉実験等も時間の可逆不可逆性問題や観測理論の大巾な理解に貢献するだろう。これは新しい非線形 Schrödinger 等式の当否をも解決

するだろう。更に前回の論文すなわち GaAs 系半導体に関してごくわずかながら量子非破壊測定（光のスクイズド状態）に関してふれたがこれは考えてみると Landau や Piers が55年以上も前に論じていたことがやっと今日のハイテク技術とエレクトロニクスによって実現したもので考え深いものがある。とくに固体に対するパルス中性子散乱の動的因子 $S(Q, E)$ が物質の時空両方の情報を与えることは大変ユニークで強い印象を与える。

10) 例えば ${}^9\text{Be}^+$ イオン実験で才差振動数は Schrödinger 方程式が非線形性を全く持たなければスピン傾斜角によって変化しない筈である。非線形性の割合の上限は 4×10^{-27} 位となるとされる。

註) 例えば超伝導現象はマクロな量子現象だがとりわけ波動関数 $\psi = \psi_0 \exp(i\theta)$, $\theta = p \cdot r / \hbar \alpha$ の位相 θ が我々に見られる形であられるのが磁束の量子化及びジョセフソン効果であろう。電子対の位相 $\theta(r)$ の増加分 $\Delta\theta$ とリングを貫く磁束 ϕ の間に $\Delta\theta = 2e\phi/\hbar$ が成立つ。

$$\begin{aligned} \because \Delta\theta &= (2e/\hbar) \oint \text{A} ds = (2e/\hbar) \oint \text{rot A} dS \\ &= (2e/\hbar) \oint \text{A} ds = (2e\phi/\hbar) \end{aligned}$$

$\phi_0 = h/2e$ は磁束量子である。

超伝導の電子対の波動関数はかくして見ることが可能になった。

×× (109p)

アインシュタイン等の E.P.R 実在論的相関はアメリカのグリーン・バーグ, ホーン, ザイリンガー三氏 (G.H.Z) のスマートな思考実験により, 従来の J. Bell の解析よりも更にはっきり決着がつけられ進展があったと考えられる。