

量子力学のしっぽ

— パラドックスの実験検証 —

((株)東芝) 吉田 正

はじめに

核データ評価は量子力学のうえに乗っかっている。中性子反応の理論計算は、結局のところ三種類の Schrodinger 方程式の解、入射波、核内での波動関数、それに射出波、を滑らかに繋ぐという作業に要約できるし、そのとき核内の波動関数をどう表現・記述するかによってさまざまなパラエティーが生まれてくる。しかし、それ以前に、核データ測定や評価に携わる人々が日常語として使っていることばのほとんどが、量子力学の基礎なくしては意味を持たない。いわく、レベル、中性子共鳴、共鳴幅、s波、p波、スピン、パリティ、……。これらの概念はすでに我々の日常感覚に馴染んでおり、(あるいは馴染んでいる気になっており)、量子力学がはらんでいる「常識と真っ向から対立し、我々の素朴な自然観を呆然自失させるような過激な一面」を我々に意識させることはほとんど無い。それに、いちいちことを荒立てては、我々の日常業務は進捗しない。

量子力学は今述べた「過激な一面」を内に秘めたまま、成功につぐ成功を重ねて来た。筆者もレーザー光による原子励起の理論解析⁽¹⁾に携わるようになって、虚数 i が入るものの簡潔な方程式に支配され、しかしまさに虚数 i の存在のため実に多様性豊かな解を有し、実験をみごとに再現する量子力学にあらためて興味をそそられた。しかし一方で、まずはレーザー技術の進歩によって、また近年は中性子干渉計の発達もこれに加わり、量子力学の「常識と真っ向から対立し、我々の素朴な自然観を呆然自失させるような過激な一面」が、実験によって白日のもとに晒されるようになった。

パラドックス?

量子力学の教科書を広げると、まず、物理系の角運動量 J の大きさはプランク常数 h を単位として飛び飛びの値 $\sqrt{J(J+1)}$ しか取り得ない、と書かれている (J は 0 か正の整数)。そうですか、まあいいでしょう。つぎに、角運動量 J の Z 軸への射影 J_z は $-J \leq J_z \leq J$ を満たす整数値 M しか取り得ない。はいはい、分かりました。そして止めの一言。ただし Z 軸は空間のどの方向に取っても良い! ここまでついて来させてなんたる事か、と私は途方に暮れる。しかし、とっさに有効な反論は出てこない。それでも次のような反論は可能である。

直線偏光のレーザーを使って $J=1$ の基底状態 X から、 $J=1$ の中間状態 A を経て、 $J=0$ の最終状態 T に原子を励起させることを考える。 Z 軸をレーザーの偏光面に平行に取る。この場合、直線偏光の輻射による電気双極子励起の選択則 ($\Delta M=0$ 、ただし $\Delta J=0$ の場合 $M=M'=0$ は禁止) から、最終状態 T への励起は禁止されていることが分かる (図 1 (a))。 Z 軸は空間のどの方向に取っても良いと言うのなら、では Z 軸をレーザー光の進行方向に取ってみよう。この場合、直線偏光は Z 軸を右に回転する右偏光 (選択則 $\Delta M=+1$) と左に回転する左偏光 (選択則 $\Delta M=-1$) の重ね合わせと考える必要がある。この場合最終状態 T への励起が可能ではないか (図 1 (b))。さあどうだ、 Z 軸は空間のどの方向に取っても良いと言うが、取り方によって、最終結果が明らかに変わってくるではないか。

しかし、この場合でも、量子力学は決してしっぽを出さない。ウィグナーの $3j$ 係数を使って計算してみると、図 1 (b) の二つの経路、 $\langle \text{と} \rangle$ のマトリクスエレメントは互いキャンセルし、最終状態 T への励起は禁止されていることが分かる⁽²⁾。残念でした。これは、一見矛盾していても、実際には量子力学の構成のなかにあっさり氷解してしまう、表面的なパラドックスの一例に過ぎない。しかし、量子力学がもっと本質的な、我々の素朴な自然観を呆然自失させるようなパラドックスをはらんでいる事は良く知られている。

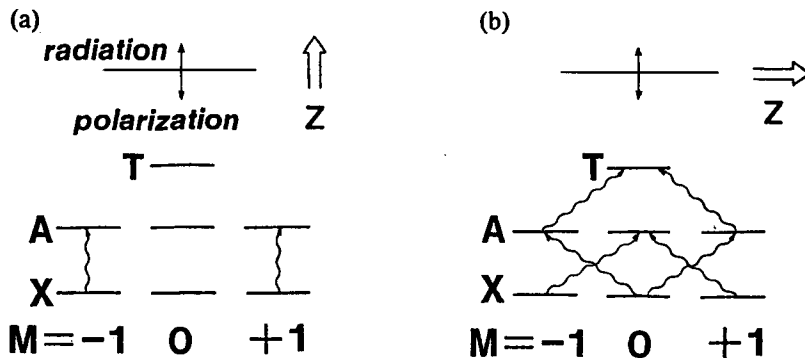


図1 直線偏光レーザーによる原子の2段階励起：
 (a) Z 軸をレーザーの偏光面に平行に取る；直線偏光輻射による電気双極子励起の選択則 ($\Delta M=0$ 、但し $\Delta J=0$ の場合 $M=M'=0$ は禁止) から、最終状態 T への励起は禁止されていることが分かる。
 (b) Z 軸をレーザー光の進行方向に取る場合；直線偏光は Z 軸を右に回転する右偏光 (選択則 $\Delta M=-1$) と左に回転する左偏光 (選択則 $\Delta M=+1$) の重ね合わせである。この場合最終状態 T への励起が可能であるように見える。

量子の共同謀議、ベルの定理、アスペの実験

よくご承知のことと思うが、Einstein-Podolsky-Rosen のパラドックスと言うのがあ
る。ここでは、そのボーム版で説明しよう^(*)。スピン $\frac{1}{2}$ の量子^{*}（電子、中性子など；
またスピン $\frac{1}{2}$ ではないが光子等でも同等の議論が可能）が二つ、全角運動量ゼロの状態
すなわちシングレットに結合して、これが全角運動量を変えない相互作用によって
崩壊するとする。二つの量子は全角運動量ゼロのまま左右に飛び去る。飛び去った後も
二つの量子はスピンシングレット状態

$$|\Psi\rangle = (1/\sqrt{2}) [|+-\rangle - |-+\rangle]$$

を保持する。この状態は左に行った量子のスピンが+ ($I_z=+\frac{1}{2}$)、右が- ($I_z=-\frac{1}{2}$)、
およびその逆、左が-右が+、の二つの状態の一次結合である。従って、左に行った量
子のスピンを測定して+なら、右に行った量子のスピンを測定すれば必ず-となる。

（これは、全角運動量がゼロのままであることから分かる）。しかし量子力学は左に
行った量子のスピンを測定して+となる確率と-となる確率は半々で、どちらであるか
は測定が行われるまでは真に不確定であると主張する。そうであるとするなら、左に行
った量子のスピンを測定して+となったことは、右に飛び去り空間的に十分離れてしま
った量子のあずかり知らぬことである。どうやって右に遠くとびさった量子が、左のス
ピンが+となったことを知るのか？。ここで我々は、①二つの量子は連絡しあっており
片方が+ならもう一方はこれをすぐに察知し-に変身する（局所性の否定）、もしくは、
②+か-かは我々が知らないだけで実は個々のケースでは最初から決まっていた（隠れ
た変数の存在）、と考えたい衝動にかられる。

まず、①二つの量子は連絡しあっており片方が+ならもう一方はこれをすぐに察知し
-に変身する、と言うのも妙な話である。だいたい、二つの量子はなにが面白くて、そ
んな七面倒くさい共同謀議などを企てるのか。それに、情報は光の速度より早くは伝わ
らないという相対論の要請もある。左右のスピンの測定を同時に行えば、二つの量子に
共同謀議の時間を与えず、裏をかくことだってできそうだ。しかしここでも量子力学は
しっぽを出さない。次に述べる様に、共同謀議の裏をかく企ては結局失敗し、二つのス
ピン測定値は相変わらず強い相関を示す。

上のスピン測定の思考実験では、取り合えず、左右の量子のスピン測定の座標軸は同
じ（平行）とした。しかし一般には両者は平行である必要はない。両者のなす角度を θ

*）スピンは量子固有の角運動量であり半整数値をとる。その大きさは慣例的に J ではなく I と書く。

としたとき、 $\theta=0$ なら既に述べたような 100 % の相関を示すが、 θ を大きくして行くと、相関は減少して行き、 $\theta=\pi$ で 100 % の逆の相関を示す。CERN の物理学者 J.S. ベルはこの相関の程度が、局所性と隠れた変数の存在を仮定した場合、量子力学の予言と決定的に異なる事を示した⁽⁴⁾。この違いを実際に実験で確かめることができれば、我々のかくあるべしと願う古典的な（すなわち、量子も小さな粒の様に空間の特定の場所に不可分に結び付けられ、互いに光速をこえた奇妙な通信などし合わない）言ってみれば常識を逆なでしたりしない）自然観と、量子力学の予言のどちらが正しいか、白黒をつけることができる。結果は、量子力学の勝ちであった。代表的な測定がアスペ⁽⁵⁾によって行われた^{**}。アスペは、二つの量子の間の共同謀議を極力阻止しようと、パラメータ θ の設定を、時間的に、二つの量子が左右に飛び出したあとまで引き延ばすという離れ技までやってのけた^{***}。しかし、結果はやはり量子力学の予言どおりの強い相関を示した。この間の事情は、シモニーの解説⁽⁶⁾に詳しい。

この機会に、ほんの数年のあいだ存在し、廃刊されてしまった Physics という雑誌の名を不朽のものにしたベルの原論文⁽⁴⁾に一度はあたっておこうと、国会図書館まで探したが欠番で入手できなかった。もちろん原典にもどらずとも、たとえばクラウザー・シモニーのレビュー⁽⁷⁾等がある。ベルの定理は私にはなかなか難解である。そんな人のために解説もいくつかある。マーミンの解説⁽⁸⁾は、一般性をやや犠牲にする代償として定理の内容を分かりやすく提示することに成功している。一方、デスパリーニャのもの⁽⁹⁾は、理論の泰斗らしく、一般性を損なうことを極力避け、格調を落とさない。その分、頭の体操を強要する。

いったいアスペの実験結果をどう解釈すべきなのか。ホーガン⁽¹⁰⁾は「アインシュタインはかって、もし量子力学が正しければ世界のほうがおかしいと言ったことがある」、とニューヨーク市立大学のグリーンパーガーの言葉を引用する。「そうだ。アインシュタインは正しかった。世界の方がおかしいのだ」。だが、先を急ぐのはよそう。アスペ以降も、量子力学的世界の「常識と真っ向から対立し、我々の素朴な自然観を呆然自失させるような一面」が、さらに直感的に理解しやすい実験結果を通じて、次第にあきらかにされているのだから。

**）アスペはスピンの量子ではなく、カルシウム原子の脱励起に際して放出される光子のペアを用いたが、事の本質はそのままである。

***）この最後の離れ技をのぞけば、同様の実験はアスペ以前にも数多く行われ、ほぼアスペと同様の結論に達していた。これらの実験は文献(7)で詳細にレビューされている。

量子は粒子か波か -- 遅延選択実験

我々は中性子反応の s 波共鳴と言った舌の根の乾かないうちに、中性子束は 5×10^{14} 個/s/cm、などと平気で口にする。まさに二枚舌で中性子の波動性と粒子性を使い分けている訳だが、どんな場合でも、まずこの二枚舌が破綻を来すことはない。ボーアの相補性によって我々は守られているからだ、と言ってもよいであろう。しかし、最近、この二枚舌が許されないような実験状況を巧妙に設定して、本当はどっちなんだと回答を迫る実験の結果が出はじめている。

実験を最初に提案したのはジョン・ホイーラーである。(核データの専門家には Bohr-Wheeler の核分裂理論でお馴染みの Wheeler である)。以下、文献⁽¹¹⁾の 24 ページの説明に従って、ホイーラーが提唱し、C.O. アレイらが実際に行った遅延選択実験の概念を述べる。図 2 (a) の左上から入射したレーザー光は半透明鏡 A により二つのビームに分割され、おのおののビームは、さらに鏡 M で反射され、いったん交叉しその後検出器 1 および 2 に入る。このような配置により、光子は検出器 1 または 2 により検出され、二つの経路のうち光子がどちらを通ったかが決定される。つまり、光子の粒子としての振る舞いを取り押さえたことになる。次に、図 2 (b) に示すように、ビームの交差点に半透明鏡 B を入れ、二つのビームを合成すると、ビームの一部は検出器 1 へ、残りは 2 へ入る。

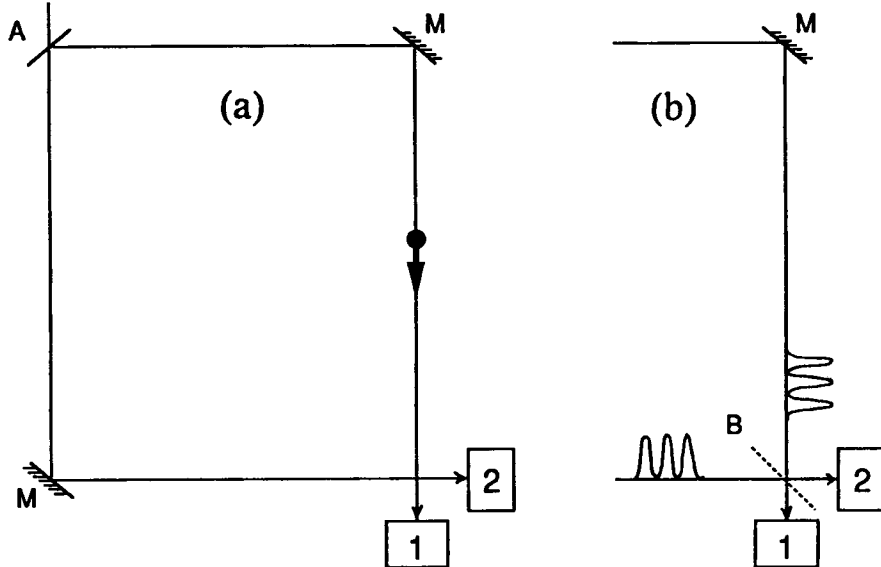
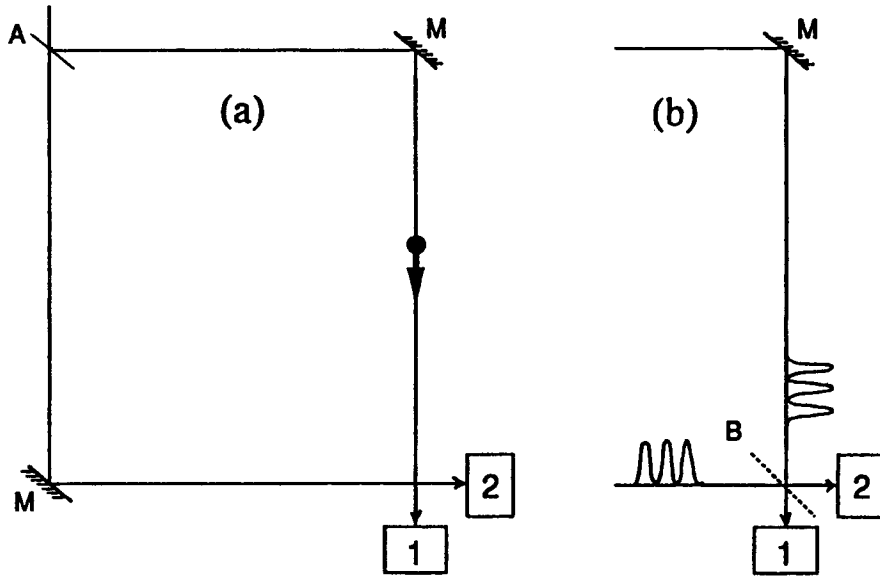


図2 アレイらが行った遅延選択実験の概念：
(a) 図の左上から入射したレーザー光は半透明鏡 A により二つのビームに分割され、光子は検出器 1 または 2 により検出される。二つの経路のうち光子がどちらを通ったかが決定される。
(b) ビームの交差点に半透明鏡 B を入れ、二つのビームを合成する。ビームの一部は検出器 1 へ、残りは 2 へ入る。光子は波として振る舞い干渉効果を引き起こす。

正誤表

No. 44、91 ページの図2が間違っていました。以下の様に修正しお詫びします。



- 図2 アレイらが行った遅延選択実験の概念：
- (a) 図の左上から入射したレーザー光は半透明鏡Aにより二つのビームに分割され、光子は検出器1または2により検出される。二つの経路のうち光子がどちらを通ったかが決定される。
 - (b) ビームの交差点に半透明鏡Bを入れ、二つのビームを合成する。ビームの一部は検出器1へ、残りは2へ入る。光子は波として振る舞い干渉効果を引き起こす。

二つの波がまじり合うわけだから、これは必然的に干渉効果を引き起こす。干渉効果を検出することは実際に可能であり、ここでは、光子の波動としての振る舞いを取り押さえたことになる。

アレイらは、半透明鏡Bを入れるか入れないかの決定（実際にはそれに代替する操作）を、光子が分岐点Aを通過し終わるまで保留した。言い換えれば、光子が（粒子のように）二つの経路のうち一方を通ったのか、（波動のように）両方を通ったのか、通ってしまったあとで始めて決定される状況に光子を追いやったわけである。しかし、光子は何事もなかったかのように、波動としての振る舞いを検出しようとするれば波動として、粒子としての振る舞いを検出しようとするれば粒子として振る舞ったのである。量子力学はここでもついにしっぽを出さなかったのである。だが、この実験事実をどう理解すれば良いのか。驚くに当たらないと言われる方もおられよう。実際、ジョン・テイラーはアスペの実験についてこう発言している⁽¹¹⁾。「実験は行われなくてもよかったと結論できるかもしれない。というのは、量子論の確認は、その理論とともになされた偉大な成功によって実質的には保証されているからです」

一方、ホイーラーはさらなるだめを押す⁽¹¹⁾。「私が今話した実験は、実験室的スケールでのことです。しかし、クエサーのような光源を使えらるれば、五十億光年ものスケールにすることを妨げるものは、原理的には、なにもありません。幸運にも、クエサーからの光が二つの異なる経路を通過して我々のところにくるような状況に偶然なりうる可能性があります。つまり、クエサーと同一視線上に、たまたま銀河があると、光はその両側を通ることになるのです。二つのビームは間に入る重力場によってまげられ、地上の観測者の目に収束します。いわゆるこの重力レンズ効果は、宇宙論的レベルで遅延選択の実験を行う手段を原理的には提供しています。もちろん技術的には難しいでしょうが。光子は、五十億年以上まえに出発し我々に達しているわけですが、それは地球上に誰一人いなかった頃です。地球上で待ち、今日サイコロを振って最後の数分で、干渉する光子（つまり、冗談っぽく二つの道を通ってきたとっている光子）を観測するのか、測定法をかえてどちらの道を通ってきたのかを測定するのか、決めてよいわけです。そして、我々がこの決定をするときには、光子はすでにその長い旅路を終えようとしているのです」

現在では、アレイらよりもさらに巧妙な多くの遅延選択実験が案出され、実行されている。これらの実験の要点は、パラメトリック・ダウン・コンバーターとよばれる素子で一つの光子をエネルギーが半分の二つの光子に変換し、一方の光子の行動を監視するかしないかで、もう片方の光子の振る舞い（波動性 vs 粒子性）をあたかも因果率を破るかのごとく変えさせることにある。実験者の一人マンデルの結論はこうである。「干渉縞を消すためには、必ずしも実際に観測を実行する必要はない。光子がどの道を通

たかに関する情報を手にいれるぞという単なるおどかし(threat)だけで、光子は一つの道だけを通るようになる。量子の状態は、系についての我々の知識だけでなく、理論的に知り得るものも反映する」⁽¹⁰⁾。ここではこのへんにしておこう。興味のある方は、ホーガンの解説をご一読されるようおすすめしたい。

おわりに

本稿では、量子力学を道具として使っているかぎり、忘れていて何らさしつかえないが、現在のかたちの量子力学が不可避的に併せ持つ「常識と真っ向から対立し、我々の素朴な自然観を呆然自失させるような過激な一面」を、実験によって検証できるようになってきた経緯を紹介した。これらの実験結果をどう解釈するか、いわゆる「量子力学の観測問題」として知られる分野、に踏み込むことは、一介の物理ファンの能くするところではない。物理ファンの卵だったころ、並木美喜雄先生の量子力学の講義に触発されて観測問題に興味をもち、その足で新宿の紀伊国屋に走ってノイマンの「量子力学の数学的基礎」を手に取り、店頭で5~6ページ目を通しただけで挫折した頃にくらべ、数学に強くなっているわけでもない。ただ、ちょうど一年まえ、並木先生の新著「量子力学入門」⁽¹²⁾によって再度この問題に魅了されたものなにかの因縁かもしれない。「入門」とはいいながら、観測問題の最新の話題が丁寧に説明されている。もう一冊、デイヴィス、ブラウン「量子と混沌」⁽¹¹⁾をおすすめしたい。アスペ、ベル、ホイーラー、パイエルス、ボームといった大家たちから、度肝をぬく「多重宇宙解釈」の擁護者ドイチにいたる8人の物理学者が、これも練達の論者であるデイヴィスと丁々発止とやり合う対談はスリルにみちている。その無敵ともいえる成功にもかかわらず、量子力学の根本についての見解が、いまだこれほどの多様性をもつことにも驚かされる。近年の読書のうちで、U. エーコの小説「薔薇の名前」とともに、もっとも知的興奮に満ちた本であった。

本稿の主題は専門家でないものが書くには重すぎるものであったかもしれない。ふだん道具として使っている量子力学の基本に関わる、たいへん刺激的な世界が拓かれていることをご紹介したかったのが本意である。読者のなかには物理学の専門家もおられるようが、記述上の不正確さも、許容される範囲ならお目こぼし願いたい。

参考文献

- (1) 中原、吉田、「レーザー光による多段階励起反応計算コードの開発」、原子力学会 1989 年年会、J48: K. Nakahara, K. Nakayama, J. Watanabe, T. Yoshida, "Laser power balance for effective photo-ionization of degenerate atoms," J. Nucl. Sci. Technol., 30, 3 (1993), to be published、など。
- (2) M. Mizushima, K. Nakahara, T. Yoshida, "Spectroscopic stability in two-photon absorption by atoms," Jap. J. Appl. Phys., 28, 10 (1989) 2018。
- (3) ボーム「量子論」(第8刷)みすず書房 (1977) p. 701。
- (4) J. S. Bell, "On the Einstein Podolsky Rosen paradox," Physics, 1, (1964) 195。
- (5) A. Aspect, J. Dalibard, G. Roger, "Experimental test of Bell's inequalities using time-varying analyzers," Phys. Rev. Lett., 49, 25 (1982) 1084。
- (6) A. シモニー、「実験が光をあてる量子力学の奇妙な世界」、サイエンス、1988 年 3月号。
- (7) J. F. Clauser, A. Shimony, "Bell's theorem: experimental tests and implications," Rep. Prog. Phys., 41 (1978) 1881。
- (8) N. D. Mermin, "Is the Moon There When Nobody Looks? Reality and the Quantum Theory," Phys. Today (April, 1985) 38。
- (9) B. デスパニヤ、「量子論と実在」、別冊サイエンス「量子力学の新展開」、日経サイエンス社 (1983)。
- (10) J. Horgan, "Quantum Philosophy," Scientific American, (July, 1992) 72; 邦訳、日経サイエンス、1992 年 9月号。
- (11) P. C. W. デイヴィス、J. R. ブラウン編「量子と混沌」、人地選書 (1987)。
- (12) 並木美喜雄、「量子力学入門」、岩波新書、岩波書店 (1992)。