

小澤正直氏の受賞に寄せて

東京工業大学大学院理工学研究科

細谷 暁夫

このたび、小澤正直氏が平成22年度科学技術分野の文部科学大臣表彰科学技術賞（研究部門）を受賞されたことは、まことに喜ばしいことです。本賞は、「我が国の科学技術の発展等に寄与する可能性の高い独創的な研究または発明を行った個人またはグループに対して授与される賞です。私自身は物理学者ですが、小澤氏のされたお仕事の成果の恩恵を受けている立場で、このたびの受賞をご紹介申し上げます。

今回の受賞の対象となった小澤氏の業績は、「量子測定理論の先駆的研究」によるものです。今日活発に研究されている量子情報理論の基礎には小澤氏が世界に先駆けて確立した量子的測定理論があり、多くの標準的教科書が採用しています。

業績の概要

小澤氏の研究は量子力学における測定に関する理論的研究です。言葉だけ聞くと数学者ではなく物理学者のやるべき仕事ではないのかな、と思われる方もおられるかも知れませんが、それがフォン・ノイマンの「量子力学の数学的基礎」の発展したものであると申し上げれば安心されるかもしれません。小澤氏は論文“Quantum measuring processes of continuous observables,” (Journal of Mathematical Physics, vol. 25, pp. 79~87, 1984年1月発表)において量子測定の数学的特徴付けの問題を解決しました。今日の多くの物理学者にとっては、それを有限次元にした簡単な場合を標準的な知識として勉強して、具体的なケースに応用して用いています。それが、もっとも一般的な量子操作を規定しているために、「いかなる測定をしても、しかしか」という形の多くの有用な定理を述べるできるようになったことは重要です。その測定理論が物理的にきわめて当然のことを仮定するだけで有用な形で構成されているために、強力な理論になっています。

小澤氏は物理の分野に踏み込んで、測定理論を重力波の検出限界の問題に応用し、Yuenの先駆的論文を発展させ標準量子限界という通説を打破しました。“Measurement breaking the standard quantum limit for free-mass position,” (Physical Review Letters, vol. 60, pp. 385~388, 1988年2月発表)

論争の後、現在では小澤氏の主張が広く受け入れられています。現在の重力波検出器（米国の干渉計型重力波検出器LIGO）の感度は、想定されている天体現象さえ起これば、イベントが検出される段階にあります。しかし、重力波による天体観測を行うにはさらなる感度が必要で、そこでは量子限界を突破することが必要になるでしょう。

その標準量子限界はいわゆるハイゼンベルグの不確定性関係に基づく誤ったものですが、その不確定性関係自体に問題があることを見抜き、それを正しい形にして小澤の不等式として定式化しました。これは、物理学者としては衝撃でした。学生時代からどこか怪しいと思いながら量子測定についての明確な数学的な枠組みがなかったために、疑問のままに留まっていました。それは私だけではなく、多くの物理学者が思っていたことです。小澤氏は論文“ Universally valid reformulation of the Heisenberg uncertainty principle on noise and disturbance in measurement, ”(Physical Review A, vol. 67, pp. 042105-1 ~ 042105-6, 2003年4月発表) において測定誤差とそれによる擾乱を定義し3項からなる不等式を導きました。比較的簡単な形をしているので書いてみましょう。

$$\varepsilon(Q)\eta(P) + \varepsilon(Q)\sigma(P) + \sigma(Q)\eta(P) \geq \frac{h}{4\pi}$$

ここで $\varepsilon(Q)$ は位置座標 Q の測定誤差、 $\eta(P)$ は運動量 P の擾乱です。 $\sigma(Q)$ と $\sigma(P)$ は測定過程とは別もので波動関数の広がりをあらわし、それぞれ位置座標 Q と運動量 P の標準偏差です。右辺の h は量子力学特有のプランク定数です。もとのハイゼンベルグの不確定性関係は第一項だけです。

残念ながら、未だに多くの量子力学の教科書が不確定性関係について混乱した記述をしております。それは、実験事実を突きつけられない限り意見を変えない物理学者のマインドから来るものでもあるので、小澤の不等式に実験的に検証されることを一日千秋の思いで待っています。

小澤氏の今回受賞対象になった仕事の位置づけ

小澤氏の仕事が量子情報理論の基礎を与えたことは、国内国外を問わず、その分野の研究者の多くが認めていることです。私はそこに留まらず、量子力学の理解そのものに対する大きな貢献であると考えています。それを歴然と示すのが小澤の不等式ですが、それを理論的に支えているのが小澤氏の量子測定理論です。それは数学的に精緻に構成されているためにハードルが高く、必ずしも多くの物理学者によって読まれているとは言えないのですが、小澤の不等式が実証されれば標準文献になると思います。

小澤氏との対話の魅力

最後になりますが、実験家にアドバイスができるほど、物理学者以上に物理を知る小澤氏のような数学者の存在は極めて貴重であることを、小澤氏の恩恵を受けた量子情報分野の理論、実験の研究者に代わって申し上げたいと思います。私は長いおつきあいから、それが多分小澤氏が論理学者でもあるということと関係があると思っています。議論をしているうちに、こちらの話の筋を立て直してくださり、考えが明確になる方へと導いてくださります。講演もいいのですが、コーヒーを飲みながら対話することにより、得ることの多い数学者です。今回の受賞を心よりお喜び申し上げます。