

祝・梶田隆章先生ノーベル賞受賞

日本天文学会会員の東京大学宇宙線研究所所長・教授 梶田隆章博士がニュートリノ振動の発見により2015年ノーベル物理学賞を受賞されることが決まりました。日本天文学会会員を代表して心よりお祝い申し上げます。

2002年の小柴昌俊先生の受賞に続き、日本天文学会として2人目の快挙です。また梶田先生は小柴先生のお弟子さんでもあります。この成果は宇宙や自然界の理解の進展と天文学の発展に大きな貢献をするものと期待されます。

今回の受賞対象となった研究のように、成果が出るまでに長い時間がかかる基礎科学の重要性が再度高い評価を得たことは梶田先生に続く若手研究者の励みとなります。先生のますますのご活躍を願っております。

10月17日

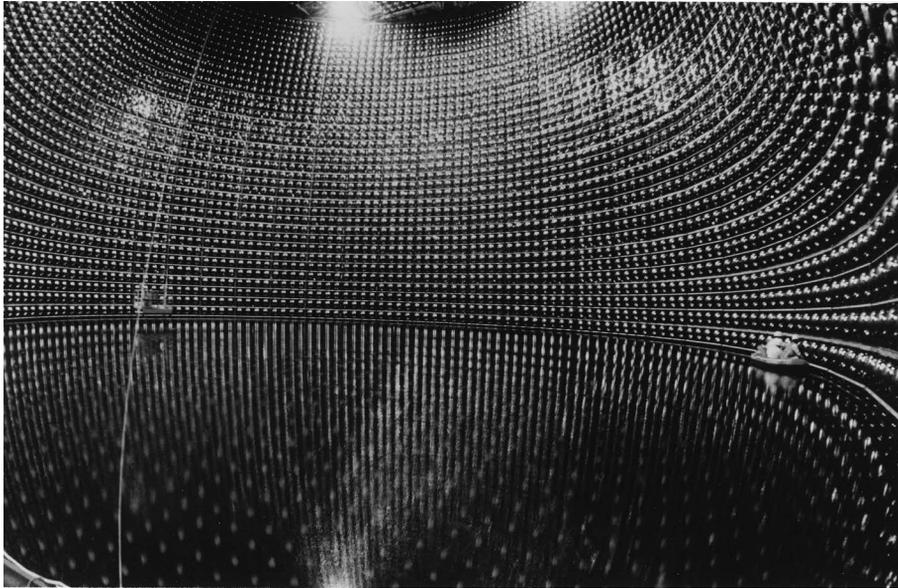
日本天文学会会長 市川隆



受賞発表後の記者会見での梶田隆章先生。
(提供：東京大学)

本特集にあたり、梶田隆章先生よりメッセージをいただきました。

「当初陽子崩壊を探し、そのためのバックグラウンドである大気ニュートリノの研究から、思いがけずニュートリノ振動の成果が出ました。この成果は非常に幸運であったとともに、科学研究の醍醐味でもあるように思います。今回の受賞に至るまでには日本天文学会の皆さまにもさまざまな形で支援していただきました。この場を借りて御礼申し上げます。」



注水中のスーパーカミオカンデ（1996年）。（提供：東京大学宇宙線研究所 神岡宇宙素粒子研究施設）

梶田隆章教授のノーベル物理学賞受賞によせて

中畑雅行

（東京大学宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設）

梶田隆章教授の2015年ノーベル物理学賞受賞を心よりお祝い申し上げます。私はカミオカンデ建設の頃からずっと梶田教授と研究をともにしてきた者でありたいへん喜ばしく思います。

梶田教授の受賞理由となった「ニュートリノ振動」についてですが、その研究の始まりはカミオカンデでした。1980年頃に陽子の崩壊を探索するために小柴昌俊先生が計画された実験がカミオカンデでしたが、梶田さんは1981年に東京大学大学院修士課程の学生として小柴研究室に入りカミオカンデ建設の頃から実験に参加されました。カミオカンデの当初の目的は陽子崩壊の発見であり、それが達成できれば「大統一理論」を実証す

ることができるため私たち学生はカミオカンデの建設、データ解析に没頭していました。陽子崩壊を探索するうえでバックグラウンドとなる「大気ニュートリノ」についてはデータの理解を深めておく必要がありました。それを行ったのが梶田さんでした。宇宙線が大気中で反応すると荷電パイ中間子 (π^\pm) が生まれ、それが $\pi \rightarrow \mu\nu_\mu$, $\mu \rightarrow e\nu_\mu\nu_e$ と崩壊してミューニュートリノ (ν_μ) と電子ニュートリノ (ν_e) が生まれるため、 $\nu_\mu : \nu_e$ の比は2:1になるはずでした。ところが梶田さんの解析の結果ではその比がおよそ1.2:1ぐらいであり、「大気ニュートリノ異常」として1988年に論文を発表しました。この観測において重要で

あったことはカミオカンデが ν_μ と ν_e の違い（観測上はミュー粒子（ μ ）と電子（ e ）の違い）を見分けることができたことでした。直径50 cmの大口径光電子増倍管を1,000本使用し、3,000トンのタンク内面の20%をカバーしていたカミオカンデだからこそできたことでした。大気ニュートリノ異常を説明するためには非常に大きいニュートリノ混合を必要とすること、カミオカンデで捉えたニュートリノの数はたかだか300事象弱（1988年の論文の時点）しかなかったため、万人が認めるところまでには至りませんでした。

スーパーカミオカンデ（SK）は50,000トンの水タンクに約11,000本の直径50 cm光電子増倍管を取り付けた装置であり、カミオカンデの約25倍の有効質量をもちました。SKが取得する圧倒的に多いデータを使って、 ν_μ 、 ν_e それぞれに対してニュートリノが飛んでくる方向の分布を調べることができ、その結果上空から20-30 kmの距離を飛んでくる ν_μ には異常はなかったが、地球の反対側から数千~1万km飛んでくる ν_μ は ν_e に振動してしまうため、数が減ってしまうことがわかりました。この結果は1998年に高山で開催されたニュートリノ国際会議で梶田さんが世界に発表し、ニュートリノ振動の最初の発見となりました。

た。梶田さんのトークの後はなかなか拍手が鳴りやまなかったことを今でも覚えています。

1998年の大気ニュートリノ振動の発見以降、2001年にはSKとサドバリー・ニュートリノ観測所SNO実験によって太陽ニュートリノ振動も発見されました。1999年からスタートしたK2K実験（高エネルギー加速器研究機構KEKの陽子加速器で作ったニュートリノをSKで受ける実験）は2004年に人工ニュートリノを使ってニュートリノ振動を確認しました。そして、2009年から始まったT2K実験（東海村J-PARCからSK）は2011年に第3の振動モードを発見しました。

このようにニュートリノ振動の研究は大きく発展してきましたが、これからはニュートリノ振動を「使って」次のステップへ研究を進めていきます。「ニュートリノの振動」と「反ニュートリノの振動」の違いを見れば宇宙の物質優勢の謎が解けるかもしれません。SKでは装置を改良して宇宙の初めからの超新星ニュートリノを観測する準備を進めていますが、観測できれば宇宙の星形成の歴史を探ることができそうです。梶田教授のノーベル賞が今後の研究の励みになることを期待します。

梶田先生のノーベル賞をお祝いして

柴橋博資

（東京大学大学院理学系研究科天文学専攻）

ノーベル物理学賞受賞の榮譽に輝かれる梶田隆章先生に心からお慶び申し上げます。受賞は、大気ニュートリノ観測によるニュートリノ振動の発見によるもので、1998年の研究会でのその成

果の発表がなされた折の拍手喝采は正に空前のものだったと伺っています。しかし、梶田さんご自身のお話によれば、最初にその兆候に気づかれたのは、1986年に博士の学位を得てから半年くら

い経てからとこのことです。カミオカンデの実働は1983年からですから、かなり早い段階であり、小柴昌俊先生のノーベル賞受賞へと導いた超新星1987Aからのニュートリノ検出という輝かしい成果よりも前ということになります。カミオカンデは、元来は陽子崩壊の検出を第一の目標にしており、その検出方法は陽子崩壊の際に発せられるチェレンコフ光を検出するというものでした。検出実験で重要なことは陽子崩壊以外に起因するバックグラウンド・ノイズをいかに下げることなのですが、宇宙線起源の大気ニュートリノは、そのノイズ源であったわけです。梶田さんは、そのノイズを精査していくなかで、ミューニュートリノによる数と電子ニュートリノによる数との比が理論値と大きく違っていることを見いだされ、それがニュートリノ振動を示唆していることに気づかれました。

カミオカンデは、1984年頃からは、太陽からのニュートリノ検出も目指すようになります。当時、「太陽ニュートリノ問題」は、天体物理学の根底を揺るがしかねない長年の大問題でありました。小柴先生とともにノーベル賞受賞となるレイモンド・デービス博士が1960年代から始めた、太陽中心部での核融合反応で生じるニュートリノ・フラックスを測定して、太陽で実際に核融合が起きていることを実証しようという野心的な実験は、測定値が理論値の半分にも満たないという深刻な問題を提示していました。星の内部構造と進化の理論は、私たちの宇宙の理解の基幹となっており、それが、事もあろうに、太陽について理論が実証されないとなるとこれは大問題です。原因としては、実験が間違っているか、天文学の(星・太陽の)理論が間違っているか、物理の(素粒子の)理論が間違っているか、の3通りしかありません。測定実験は、長らくはデービス博士のグループによるものしかなく追認が望まれて

いたので、カミオカンデによる太陽ニュートリノ検出は実験結果の正当性に決着をつけるものと期待されました。中畑雅行さんらが頑張ったその結果は、やはり理論値の半分くらいしかないという驚くべきもので、ここに至って、太陽ニュートリノ問題の原因は、天文学の理論か物理学の理論の間違いに帰することが確定的になりました。

物理の理論の修正として当時考えられていたことの一つとしては、ニュートリノに実は磁気モーメントがあって、太陽の磁場と相互作用することによって地球に届くフラックスが減るのだというものもありました。そのため、宇宙線研カミオカグループが力を注いで1992年に高山で開催したニュートリノの国際研究会では、太陽の専門家としてハロルド・ジリン博士が招かれていました。カミオカンデの特筆すべき性能は、デービス博士の実験とは違って、ニュートリノの飛来方向がわかることです。研究会では、その方向性の結果を、太陽位置を中心にした2次元空間図として示しました。ジリン博士が、直後のコーヒブレイクのときに、ニュートリノで撮った太陽の写真を初めて見たと興奮気味に話しかけてきたことが印象に残っています。

その頃、太陽内部を観測的に探る方法として、日震学が成果を出し始めていました。これは、太陽表面の振動現象を観測・解析して、太陽内部の構造を探るという方法です。観測される太陽の振動は、ガスの圧力が主たる復元力である音波ですので、振動を解析することによって、目では見ることのできないはずの太陽の内部の音速分布を驚くべき高精度で測定することが可能となったのです。しかし、音波は核融合の起きる太陽中心部には感度が低く、上記の高山での国際研究会では、私が日震学のレビューを行ったのですが、太陽ニュートリノ問題をその当初から追及されてきたジョン・バーコール博士やジリン博士からは一

応の評価は頂戴したものの、太陽ニュートリノ問題が太陽物理に起因するの否かについては歯切れの悪い内容と受け取られたかもしれません。昼食時に、これだけ観測データがあるのならどうしてもっと強い制限が与えられないのかと、鈴木厚人さんや鈴木洋一郎さんに、しきりに問われました。これで奮起して、音速分布を含めた観測量だけを制限条件として、妥当性の保証ができない太陽の進化についての仮定を用いることなく、太陽ニュートリノ・フラックスを理論的に導く方法の着想へと漕ぎ着くことができました。結果は、星の進化論に基づく太陽モデルと大きくずれることはなく、太陽ニュートリノ問題の原因は太陽物理の不備ではありそうにないということになりました。

その高山での国際研究会では、梶田さんが大気ニュートリノの観測結果を示されました。宇宙線が大気中の原子核に衝突するとパイオンが生成され、そのうちの電荷が正か負をもつパイオンはミューオンとミューニュートリノに崩壊し、さらにそのミューオンが電子とミューニュートリノと電子ニュートリノに崩壊します。したがって、ミューニュートリノと電子ニュートリノの生成比は2になるはずなわけですが、観測の結果はそうならず、しかも観測値はニュートリノ入射方向の天頂からの角度に依存することを示すもので、素人の私の目からすれば、ニュートリノ振動がその原因であると断定されても良いもののように思われたのでした。太陽ニュートリノ問題も、提唱者3人の頭文字を取ってMSW効果と呼ばれる、太陽内でのニュートリノ振動が原因ではないかと考えられるようになっていたのですが、太陽ニュートリノの場合は、フラックスの値そのものを理論予測値と比較せねばならないのに対して、大気ニュートリノの場合には、観測される2種類のニュートリノの量の比を問題にすれば良いので、不

定性が少ないように思えたからです。しかし、梶田さんのすごいところは、結論への信頼度が99%くらいでは満足せず、さらに時間をかけて、その小数点の下にさらに9が何個もつくようになるまで信頼度を上げていったことです。4,500トンの水（うち、内水槽3,000トン）からなるカミオカンデに代わって、5万トンの水を使うスーパーカミオカンデの実験になると、統計精度が格段に高くなり、大反響を呼んだ1998年での結果発表となったのでした。

一方、太陽ニュートリノのほうは、1990年代になってから、ガリウムを使って、太陽内部で起きる一連の核融合反応の最初の過程で発生する、エネルギーが低すぎてカミオカンデでは検出できないニュートリノを測定する実験が、ヨーロッパとロシアで独立に行われるようになりました。その結果も、やはり理論値を大きく下回るといものでした。しかし、それでも太陽ニュートリノ問題の原因については何も言えません。この問題に決着がついたのは、水の代わりに重水を使った実験がカナダのサドバリー・ニュートリノ観測所(SNO)で行われるようになってからでした。SNOの方法はカミオカンデやスーパーカミオカンデと同じと言って良いのですが、水の場合と異なり、重水は電子ニュートリノにのみ反応するのです。一方、水を使うスーパーカミオカンデのほうは、電子ニュートリノだけでなく、ミューニュートリノとタウニュートリノにも僅かに反応します。そして結果を比べると、スーパーカミオカンデで検出されるニュートリノ・フラックスは、SNOでの測定値よりも、僅かですが、しかし有意に高いことが明らかになりました。これにより、太陽ニュートリノ問題の原因は、ニュートリノ振動であることが結論されることになりました。さらにその後、SNOでの実験は、3種類のニュートリノすべてに反応するモードで行われる

ようになり、その結果は、理論値と矛盾していないことが明らかになったのです。

こうして、梶田さんが解析した大気ニュートリノからは、ミューニュートリノからタウニュートリノへの遷移が、SNOとスーパーカミオカンデでの太陽ニュートリノからは、電子ニュートリノからミューニュートリノとタウニュートリノへの遷移が確認され、そういった遷移が起きているか

らには、ニュートリノの質量は、標準理論が想定しているゼロではないという結論になったのでした。栄えあるノーベル物理学賞が授与される梶田先生とSNOのリーダーを務められたアーサー・マクドナルド博士、それに小柴先生と故戸塚洋二先生をはじめとする、これらの大プロジェクトで長年にわたって努力されてきた多くの方々に改めて敬意を表し、心からお祝いしたいと思います。

神岡と超新星ニュートリノ

鈴木英之

(東京理科大学理工学部)

梶田隆章先生が2015年度のノーベル物理学賞を受賞され、心よりお祝い申し上げます。

私事になりますが、卒業研究を半期小柴研で行い、その後佐藤勝彦先生のもとで超新星ニュートリノの研究を開始したことに加え、梶田先生の後輩にあたるカミオカンデグループメンバーと結婚したこともあり、学生時代より梶田先生のご活躍を少し離れたところから拝見してきました。今回の受賞はニュートリノ振動の発見によるものですが、今後の超新星ニュートリノ観測に向けた期待を書かせていただきます。

そもそも陽子崩壊実験(典型的なエネルギー～陽子の質量～1 GeV)を目的として作られたカミオカンデ実験装置を、太陽ニュートリノや超新星ニュートリノ(エネルギーO(10 MeV)以下)も観測できるように改良した直後の超新星1987Aからのニュートリノの観測により小柴先生がノーベル物理学賞を受賞されました。カミオカンデでは、梶田先生はGeV領域のイベントを研究する班に属され、その中で大気ニュートリノの電子型

／ミュー型ニュートリノの比が理論予想と合わないことに気がつかれ、その研究を開始されました。その後、戸塚先生のリーダーシップのもと建設されたスーパーカミオカンデを使って、この問題を詳しく調べられ、ミュー型大気ニュートリノ由来の観測イベントのエネルギー・角度分布がニュートリノ振動によるものであることを突き止められ、1998年に発表されました。その後、SNO実験とスーパーカミオカンデのデータを組み合わせることで、太陽ニュートリノの振動も確認されました。超新星ニュートリノについては、超新星1987Aの観測データ数が10個程度と少なかったため、いまだニュートリノ振動の影響は確認されていませんが、天の川銀河で重力崩壊型超新星が起これば、スーパーカミオカンデで数千個のニュートリノイベントが観測され、その時間・エネルギー・角度分布の解析からニュートリノ振動の情報、特に質量階層の情報を引き出せるだろうと研究が行われています。また過去の超新星ニュートリノが宇宙膨張に伴う赤方偏移を受けな

が背景放射として残っているはずですが、スーパーカミオカンデの改良プロジェクトSK-Gdによって、近い将来初めての観測が期待されています。さらに原子炉ニュートリノの振動や地球ニュートリノの観測に成功したカムランド実験との連携による超新星ニュートリノの解析、現在梶田先生が推進されている重力波検出実験KAGRAによる重力波観測、その他多波長の電磁

波観測などとの組み合わせにより重力崩壊型超新星の理解が進むものと考えられます。重力波の観測や梶田先生の博士論文のテーマでもあった陽子崩壊の発見などが実現できれば、神岡からさらなるノーベル賞が生まれるはずで、超新星ニュートリノの研究にも寄与する、より大きなハイパーカミオカンデの建設も国民の理解のもと推進されることを願っています。

ノーベル賞受賞のお祝い

大橋正健

(東京大学宇宙線研究所)

梶田隆章先生、ノーベル物理学賞受賞おめでとうございます。

最初に一緒にお仕事させていただいたのは、2003年に開催された第28回宇宙線国際会議の組織委員会でした。その時、梶田先生は、多忙であった吉村太彦組織委員長（当時宇宙線研究所長）の代理として組織委員会を牽引していました。委員の担当がどのように決まったかは忘れましたが、私は財務を担当していました。それで、梶田先生とは募金活動のために、主に大手町を一緒に歩き回ったことを覚えています。また、財務のことだけではなく、いろいろな指導も受けた気がします。この頃すでに私には、この人はグループを率いる人だなあという強烈な印象がありました。それは今も変わらず、現宇宙線研所長としても、もちろん重力波望遠鏡KAGRAの計画代表としても、そう感じています。

東京大学宇宙線研究所は、少なくとも私の中では別名ニュートリノ研究所と思うぐらい、ニュートリノ研究が基軸になっています。この研究グ

ループには実に多彩（才）な顔ぶれがそろっていて、惜しくも亡くなられた戸塚洋二先生をはじめとして、鈴木洋一郎先生、中畑雅行先生がスーパーカミオカンデを擁する神岡宇宙素粒子研究施設を、そして梶田先生が宇宙ニュートリノ観測情報センターを運営してこられました。梶田先生を知る何人かがすでに話していますが、その研究者の中でも特に！真面目で！頑固です！こんなことを書いてしまってよいのかわかりませんが、露骨に言えば「カタブツ」でしょう。現在、私は梶田先生と重力波望遠鏡計画KAGRAと一緒にやらせていただいているのですが、ここでは運営面だけでなくさまざまな場面で方針や考え方が違うことがあります。こんなとき、なぜこのぐらいのことを許容してくれないのかと泣きが入るのですが、逆に言えば、それだからこそ、多くの懐疑的な意見にもひるむことなく自分の信念を貫いて研究を続け、ついにニュートリノ振動の発見と確証に至ったのだらうと感じています（ここは間違いなく称賛しているところなので、皆さん誤解しない

てください).

ニュートリノ研究の詳細はよくわかりませんが、ここからは私にわかっていることを書くことにします。梶田先生が重力波の研究に入ってからしたのは数年前からですが、今では私がタジタジとなるほど内容を把握されており、特に数字に関してはもう私では太刀打ちできない感じになってしまいました。しかも記憶力が抜群なので、「それはおかしい。〇〇という値（金額）だったはずだ」とか「確か、そろそろ□□の時期になっているはずだが、どうなっている？」という指摘をしばしば受けます。もちろん、このささやきは、問題が解決するまで粘り強く続くことになります。KAGRAにおいても財務を担当している私として

はやりにくいことこの上ないのですが、日頃から物事を正確に理解しておこう、また良い方向に進めようという姿には本当に頭が下がります。

さて、最後にいただけますが、梶田さん、ノーベル賞受賞、本当におめでとうございます。記者会見でも強調されていたので、これは基礎科学にとっても大きな良い影響を及ぼすでしょうし、ニュートリノ研究だけでなく重力波研究を含む宇宙線研究全般を加速すると思います。また、これから基礎科学を目指す人も多くなるはずですし、これまでカミオカンデ、スーパーカミオカンデを（そして現在はKAGRAも）支えてくれた地元、神岡にも大きな恩返しをしたのだらうと思います。梶田さん、本当にありがとうございます。

標準模型を超える初のノーベル賞

村山 斉

(カリフォルニア大学バークレー校教授、および、
東京大学 Kavli IPMU 機構長 (特任教授))

梶田さん、ノーベル賞受賞おめでとうございませぬ!!! いつか来るに違いないとは思っていましたが、こればかりは現実になるまではわかりませぬ。わがことのようにうれしいです。

大学院時代の1988年に、カミオカンデの大気ニュートリノ「異常」の論文が出ました。 ν_μ/ν_e ratioが低かったのです。1992年には統計がほぼ倍になりましたが、結果は変わりませぬ。しかしニュートリノ振動だとするととても大きな混合角が必要だったので、当時の雰囲気ではほとんどの人が真面目にとっていなかったと思います。自分で簡単なモンテカルロを書いて ν_μ/ν_e ratioを計算

してみても、データを説明できませんでしたが、信じるまではいきませんでした。でもこの時点でparticle IDのcodeを書いた梶田さんは確信されていたと聞きました。Super-Kamiokandeの建設が始まり、統計を上げて勝負だと思われたわけでは

1998年高山市国際ニュートリノ会議での梶田さんの発表は、はっきりと覚えています。スケジュールに出ていたのは“Atmospheric Neutrino Results from Super-Kamiokande & Kamiokande”という地味なタイトルでしたが、梶田さんがプロジェクターの上に乗せた最初のトラペーンには副題

“Evidence for ν_μ oscillations”と書かれていて、「ついに来た!」と思い聞いているほうが緊張しました。それまでSKのデータがどんどんと説得力のあるものになってきていましたが、「いつ正式に発見を宣言するのだろう」と思っていたからです。会場がしんと静まり返ったと覚えています。そして大発見でありながら淡々と内容を話され、ニュートリノ振動の決定的な証拠として、up/down ratioが $0.54+0.06-0.05$ と1から 6.2σ ずれていることを示されました。

講演が終わると質問は一つしかなく、反論しようという人は誰もいませんでした。100年かけて素粒子物理学者が作ってきた標準模型が、目の前でガラガラと崩れた、そんな歴史的瞬間を感じた私は立ち上がって拍手しました。それを見たからか、周りもかなりの人たちが立ち上がったように思います。次の日はNew York TimesにSKのイラストが載り、クリントン大統領（当時）がMITの卒業式でニュートリノの質量が日本で発見された、と触れました。

翌週バークレイに戻ると、みんなに「あれは本当か」と聞かれました。そこで同僚のStuart Freedmanとイベントを企画し、私が梶田さんのトラペンを1枚1枚見せ、発表を解説しながら再現しました。このときも、もっともな反論は出ま

せんでしたが、私はかなり緊張したのです（ちなみに、Stuartと私は後にKamLAND実験に参加して、残る太陽ニュートリノ問題を解決するのを目指しました）。

会議中梶田さんを捕まえて、あれこれいろいろなチェックについてしつこく聞きました。当時multi-ring eventについてはどこでも発表されておらず、同僚のLawrence Hallと私の解析では、少なくとも 3σ の信号があるはずでした。そのときの梶田さんの答えは、「まだ統計が足りなく、見えていない」ということでしたが、納得がいきません。実はこれについては解析に間違いがあったようで、翌年梶田さんから修正された図が送られてきて、ちゃんと信号がありました。

その後も何度もお会いする機会があり、Kavli IPMUのPIにもなっていただきお世話になりました。偉ぶらず飾らない人格にとっても親しみを感じてきました。「ノーベル賞とってくださいね」と何度も言った記憶があります。

高山の会議以来、ニュートリノ物理のコミュニティは3倍くらいに大きくなったと思います。梶田さんと仲間の仕事で、世界の素粒子物理学の流れを変えました。本当に偉業だと思います。改めて、おめでとうございます!!!