

facebook
"keiokyuri"

新版

K y u r i z u k a i

窮理図解

2020 February
no.

32

慶應義塾大学理工学部広報誌

<https://www.st.keio.ac.jp/education/kyurizukai/>

English versions are also available:

<https://www.st.keio.ac.jp/en/kyurizukai/>

慶應理工の 理論物理学

原子内部の素粒子から
超新星爆発まで

物理学科

山本直希

(准教授)



理論物理学で どこまで究明できるか

原子内部の素粒子から超新星爆発まで

原子内部の素粒子から超新星爆発まで、この世界に存在するすべてのモノが何らかの“物理法則”に従って運動しており、これらすべてが「理論物理学」の研究対象になる。物理学科の山本さんは、「理論物理学」という壮大な研究分野において、自身の好奇心とセンスによって研究対象をどんどん広げている。若き理論物理学者の研究の一端を紹介する。

シンプルな理論から 非自明な現象を導き出す

慶應義塾大学理工学部 物理学科の山本さんは、ミクロなクォークやニュートリノに関する「原子核・素粒子物理学」から、マクロな「宇宙物理学」まで幅広く論理的な研究を行う理論物理学者だ。

これほどダイナミックな研究をするのに基本的に必要な道具は「紙とペン」。「最近、iPadとApple Pencilに代わったかな。研究中は、ボーッとしているように見えるかもしれませんが」と自分の研究の様子について話す。しかし、その頭の中では、シンプルな理論を前提に、非自明な現象を解明するための膨大な思

考が繰り返されている。そして、その結果、「そもそも誰も気づいていないような物理現象を理論的に予言」したり、「根本的な欠陥のあった従来の理論に代わる新しい理論」をつくったりする。

ライフワークの 「クォークの閉じ込め」

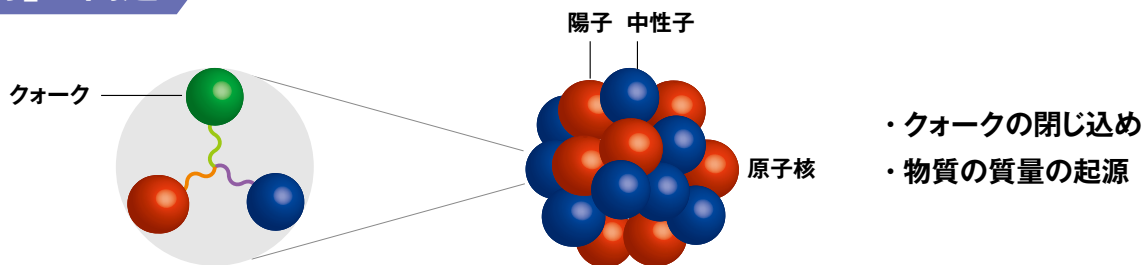
「クォークの閉じ込め」——山本さんが理論物理学に進むきっかけとなった問題だ(図1)。2000年に100万ドルの賞金が懸けられた、数学のミレニアム問題7問のうちの1問とも関係している。しかし今も未解決で、山本さんのライフワークの1つになっている。この問題が

どうしてそれほど難しいのか。それを知るには、まず、物質が何からできているかを知らなくてはならない。

「物質はすべて原子からできている」——中学校で習って誰もが知っていることだ。もともとこの原子が物質の最小の構成要素だと考えられていたが、今では“原子核”とその周りの“電子”からできていることがわかっている。さらに原子核は“陽子”や“中性子”といった核子からできていて、核子は“クォーク”というもっと小さな粒子からできている。将来これ以上小さな構成要素が発見される可能性はあるが、現時点ではクォークとニュートリノ、電子やその仲間が物質の最小の単位だとされ、「素粒子」と呼ばれている。核子の内部にクォークが存在することは、大型加速器などを使って行われる実験で確かめられている。

日常生活では物体が「ニュートン力学」の法則に従って運動するように、極小世界のクォークは「量子色力学」とい

「強い力」の問題



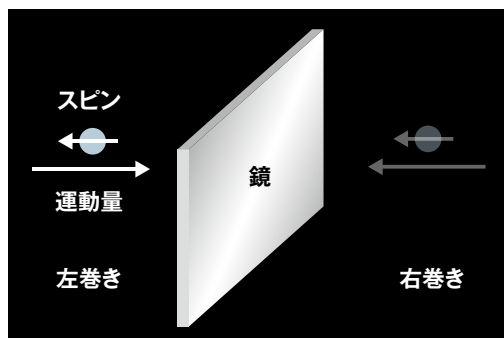
$$\mathcal{L}_{\text{QCD}} = -\frac{1}{4}G_{\mu\nu}^a G_a^{\mu\nu} + \bar{q}\gamma^\mu(i\partial_\mu - gt^a A_\mu^a)q - m\bar{q}q$$

- 素粒子の標準理論の未解決問題の1つ
- 数学におけるミレニアム問題と関係

図1 原子核の構成要素と量子色力学。陽子や中性子といった核子の中にはクォークが3つ閉じ込められている。クォークは量子色力学(数式)に従って運動する。

「弱い力」の問題

ニュートリノの謎



超新星爆発の謎



超新星=宇宙で最も左右の対称性が破れた系

図2 超新星爆発（右）と、それに重要な役割を果たすかもしれないニュートリノの性質（左）。
ニュートリノは左巻きだけで、鏡に映した右巻きのものが存在しないため、左右の対称性が破れている。

う法則に従って運動する。“色”といっても実際に色が付いているわけではなく、クォークが3種類の自由度をもつことを光の3原色になぞらえている。

「量子色力学では、核子からクォークを1つだけ取り出すことはできません。不思議ですね」と山本さん。これが「クォークの閉じ込め」の問題である。「クォーク同士が“強い力”によって結び付けられているから」と説明されているが、誰も量子色力学に基づいて解析的に証明はできていない。

「物質とは何か」を知りたい

『「クォークの閉じ込め」の問題が解決できなければ、クォークが集まってできている物質を本当に理解していることにはなりません。この問題に限らず、そもそも“物質”についてはわからないことだらけなのです」。山本さんの理論研究は「クォークの閉じ込め」のテーマを追いながら、同時に「物質とは何か」を明らかにすることに向かっている。

では、どうやってこの目標に迫っていくのか。「理論物理学では、よく極限状態を想定します。例えば、今では核子から取り出せないクォークも、ビッグバン直後の超高温の初期宇宙ではバラバラのプラズマ状態「クォーク・グルーオン・プラズマ」として存在していました。逆

に、物質を圧縮して超高密度状態にするとうか。最終的には、クォークの超伝導や超流動の状態になると考えられていますが、そこに至るまでにどのような状態をたどるかを考えます」。こうして『物質とは何か』を明らかにしていく。

「カイラル輸送理論」が 超新星爆発の謎を解明か？

最近、山本さんは「超新星爆発」の研究に力を入れている。重い星が最期に起こす大爆発で、星の中でつくられた元素は宇宙空間へばらまかれる。この元素が身のまわりの物質や生命を構成しているのだから、超新星爆発はすべての源である。ところが、従来の理論では爆発が起こりにくい。この問題を「カイラル輸送理論」を応用すると解決できるかもしれない。

「カイラル輸送理論」とは、山本さんが2012年に論文発表した理論で、素粒子のもつ“カイラリティ”という性質によって生じる輸送現象を理論的に記述したものだ。

身近な輸送現象として、電場をかけると電流が流れるというオームの法則があるが、この場合は電流に伴って熱が発生し、エネルギーを損失する。しかし、素粒子のカイラリティの性質を使うと、通常の物質では起きないようなエネルギー

損失のない輸送が可能になる。

従来の超新星の理論では、ニュートリノという素粒子が、まわりの物質に十分なエネルギーを与えることなく外に逃げてしまい、爆発に至らないという問題があった。しかしそこでは、「ニュートリノには左巻きのカイラリティしか存在せず、それによって左右の対称性が破れている」という性質(図2)が見落とされていた。「カイラル輸送理論」が、このニュートリノの性質によって生じるエネルギー損失のない輸送現象をも記述することから、超新星爆発の謎に迫る新たな方向性の研究に発展しつつある。

わからないことだらけの 「この世界」

精力的に研究を進める山本さんだが、「解きたいことはたくさんあって、“ネタ帳”にはまだ手付かずの問題が50以上あります」と話す。その中には、超新星爆発の研究のように、全貌の解明には膨大な計算が必要で何年もおかかるものから、アイデアさえ得られれば1週間程度で論文を書けてしまうものまでさまざまという。どの問題であっても、解ければ「新しい世界」が見えてくる。山本さんがどんな世界を見せてくれるか、ますます楽しみだ。

(取材・構成 池田亜希子)



理論物理なら時間も空間も超え、 遠いところに行ける

「大学院の時には物理学者になるか、他の道を選ぶか悩んだこともありましたが」と話す山本さん。物理の道に進むと決めたのも、大学の部活で競技ダンスを選んだのも、海外でボクシングの経験を積んだのも、その時々“感動”する気持ちに正直に従ってきたからだ。そんな山本さんの鋭い感性が、慶應義塾での教育と研究で発揮されようとしている。

——どのような子供時代だったのでしょうか。

滋賀県で生まれて、名古屋、大阪で育ちました。3人の男兄弟の一番下で、兄たちにだいふく鍛えられましたね。サッカーの相手をさせられて、一生懸命にボールを追いかけていたのを覚えています。

中学・高校時代は数学にのめり込み、難しい問題に出合いたくて、雑誌の懸賞問題などを解いていました。特に『大学への数学』という雑誌でピーター・フランクルさんが出していた“宿題”は、中高では習わない難しい問題ばかりでした。高校2年生の時には、東京大学の駒場キャンパスで行われたピーターさん主宰の数学の講義（合宿）に参加し、事務所に泊めてもらって、ほかの参加者と一緒に勉強しました。東京に出てきたのは、東京大学で数学を勉強しようと思ったからです。

——そんなに好きだった数学ではなく物理に進んだのはどうしてでしょうか。

高校までの物理は公式を使って計算するイメージでしたが、大学で改めて「量子力学」や「相対性理論」を学ぶと、宇宙や素粒子のことなど自然界の成り立ちがわかるのだと知りました。これが数学から物理へと進路を変更したきっかけです。実は、高校生の頃に量子力学を独学で勉強したことがありました。しかし、シュレーディンガー方程式で複素数の波動関数が出てきて……。波動関数そのものは観測できないのに、それがどうして現実の物理量と関係するのかがわからなくて、チンプンカンプンでした。大学の授業で、量子力学が構築されていく歴史的な経緯などを学び、高校時代にはわからなかった、その意味するところが理解できたのです。

——宇宙や素粒子を知りたくて、物理を選んだのですね。

私は数学のほかに宇宙にも興味がありました。ただ子供の頃は、宇宙に対してどのようなアクセス方法があるかあまり知らなかったのも、漠然と宇宙飛行士になりたいと思っていました。ところが大学で、物理は論理的な思考によって、“宇宙で何が起きているか”を、ある意味で“見るができる”ということを知りました。それは現在の宇宙に限りませんし、地球からの距離の制限もありません。だから、初期宇宙がどういう状態だった

たかや、ずっと遠くのブラックホールや超新星で何が起きているのかも想像できます。宇宙に行くよりも、もっと広い意味で宇宙にアクセスできるのです。

世界で勝負するなら物理だなと思い、理論物理学の道に進みました。

——東京大学で初めて所属した研究室はどのようなところでしたか。

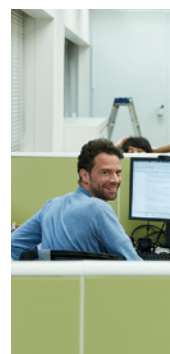
東京大学大学院時代の指導教員は初田哲男さんでした。2012年に理研に移られ、iTHEMS（数理創造プログラム）という新しいプロジェクトを立ち上げて研究されています。数学を使って、物理や生物などいろいろな現象を明らかにしようと、幅広く人材を募って、学際的に何かできないかと探っているようです。もともと初田さんの興味の幅は広くて、すごく柔軟に別の分野のアイデアを取り込んで自分の分野の問題に応用したり、逆にアイデアを提供して別の分野の問題を解いたりしていました。私が、ある物理の考え方をほかの分野で応用しようと考えるところなどは、まさに初田さんの影響を受けていると思います。

——海外経験もされていますね。

2010年3月に博士号を取った後、「海外学振（日本学術振興会の海外特別研究員制度）」という制度を使って、当時、一番尊敬していたダム・ソンさんのいたワシントン大学に行きました。ベトナム人のソンさんは、実に美しい論文を書く研究者です。論文を読んで、芸術作品を見た時のように感動したのは初めてでした。目から鱗が落ちるというか……。そして、どうしてこんな論文を書けるのかを知りたい、直接議論や共同研究をしたいと思うようになったのです。

——論文が美しいとはどういうことでしょうか。

まず結果だけ見ると、自明でなく驚くような結論なんです。ところが、その結論に至るステップの一つひとつは、修士の学生でもわかるような、非常にシンプルな論理で構成されている。そして、気付いたらすごく遠くまできているといった感じなのです。





問題を設定してそれにアプローチしていく理論物理学では、特に、問題をどう設定するかが重要です。その点をソンさんから多く学びました。そして、ニュートリノの輸送理論につながる「カイラル輸送理論」は、ソンさんと一緒に考えて2012年に論文にまとめたものです。

——慶應義塾は先生にとってどのような場所でしょうか。

2014年に、初めて教員として着任しました。驚いたのは、学生たちがとてもフレンドリーで、授業が終わるとよく質問をしに来てくれることです。「最近読んだ本のここがわからないのですが……」といって授業とまったく関係のないことも聞きます。そんな風に接してくれるのを、とても嬉しく思っています。

教員同士の関係や研究環境も良く、2015年には「トポロジカル・サイエンス」プロジェクト(私立大学戦略的研究基盤形成支援事業)を立ち上げました。これは、矢上キャンパスの物理学科の教員と日吉キャンパスで物理を教えている教員とで一緒に何かやろうと始めたもので、面白そうな研究をしている国内外の研究者を呼んで話をしてもらったり、国際シンポジウム

を開いたりしています。

2019年度からは、慶應義塾大学理工学部のKiPAS(慶應義塾基礎科学・基盤工学インスティテュート)の一員に選ばれ、5年間研究に専念できる環境をいただきました。これまで以上に超新星爆発の問題に力を入れています。教員としても研究者としても充実した日々を送っています。

◎ちょっと一言◎

学生さんから：

● 普段は優しい山本先生ですが、物理の議論になるととても鋭い人です。学部生の頃に授業を受けて、ある特定の問題を解くのではなく、物理の普遍的な側面に重きを置いていることに共感し、先生と議論をしたくてここに来ました。2人で黒板に計算式や物理法則を書きながら議論している時には、先生の直観力に圧倒されます。物理をよく知っているから、問題を解くために必要な直感をいただけるのだと思います(博士3年生)。

(取材・構成 池田亜希子)

さらに詳しい内容は
<https://www.st.keio.ac.jp/education/kyurizukai/>

ミクロからマクロまで、
階層を超えた普遍的な法則を
見出すのが物理の醍醐味です。

山本直希

Naoki Yamamoto

専門は素粒子・原子核理論。2005年東京大学理学部物理学科卒業。2010年同大学大学院理学系研究科博士課程修了。博士(理学)。ワシントン大学原子核理論研究所、京都大学基礎物理学研究所、メリーランド大学でのポストドクを経て、2014年より慶應義塾大学理工学部物理学科専任講師。2017年より現職。2019年よりKiPAS主任研究員を兼任。



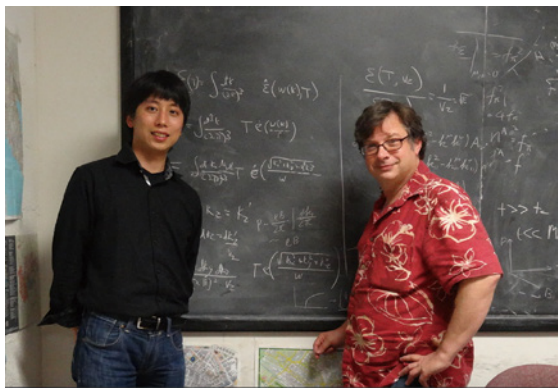


イタリアでのDoctoral Training Program

博士課程2年の時に、イタリアのトレントにある研究所(通称ECT*)でのDoctoral Training Programに約3カ月間参加しました。この間、様々な国から来た学生たちとアパートメントをシェアして共同生活をしました(自分は主に皿洗い係でした)。このちょうど10年後に、慶應での自分の研究室の学生も同じプログラムに参加することに。

山本直希のONとOFF

大学院時代から現在に至るまでを振り返ります。



メリーランド大学での ポスドク時代

メリーランド大学時代のボスだったTom Cohenさんと。当時は予想もしなかったことに、この後自分が慶應で教えていた学生が大学院からメリーランド大学に行き、現在は彼の下で研究しています。

慶應義塾での 「トポロジカル・サイエンス」 プロジェクト

2015年度から、慶應の日吉・矢上キャンパスで素粒子・原子核・宇宙物理の理論研究に携わるスタッフを中心に、「トポロジカル・サイエンス」プロジェクト(代表は商学部・日吉物理学教室の新田さん)を立ち上げました。写真は2019年3月時点でのメンバー。様々なバックグラウンドをもったポスドクとともに、これまで精力的に研究活動を行ってきました。



ある国際会議にて

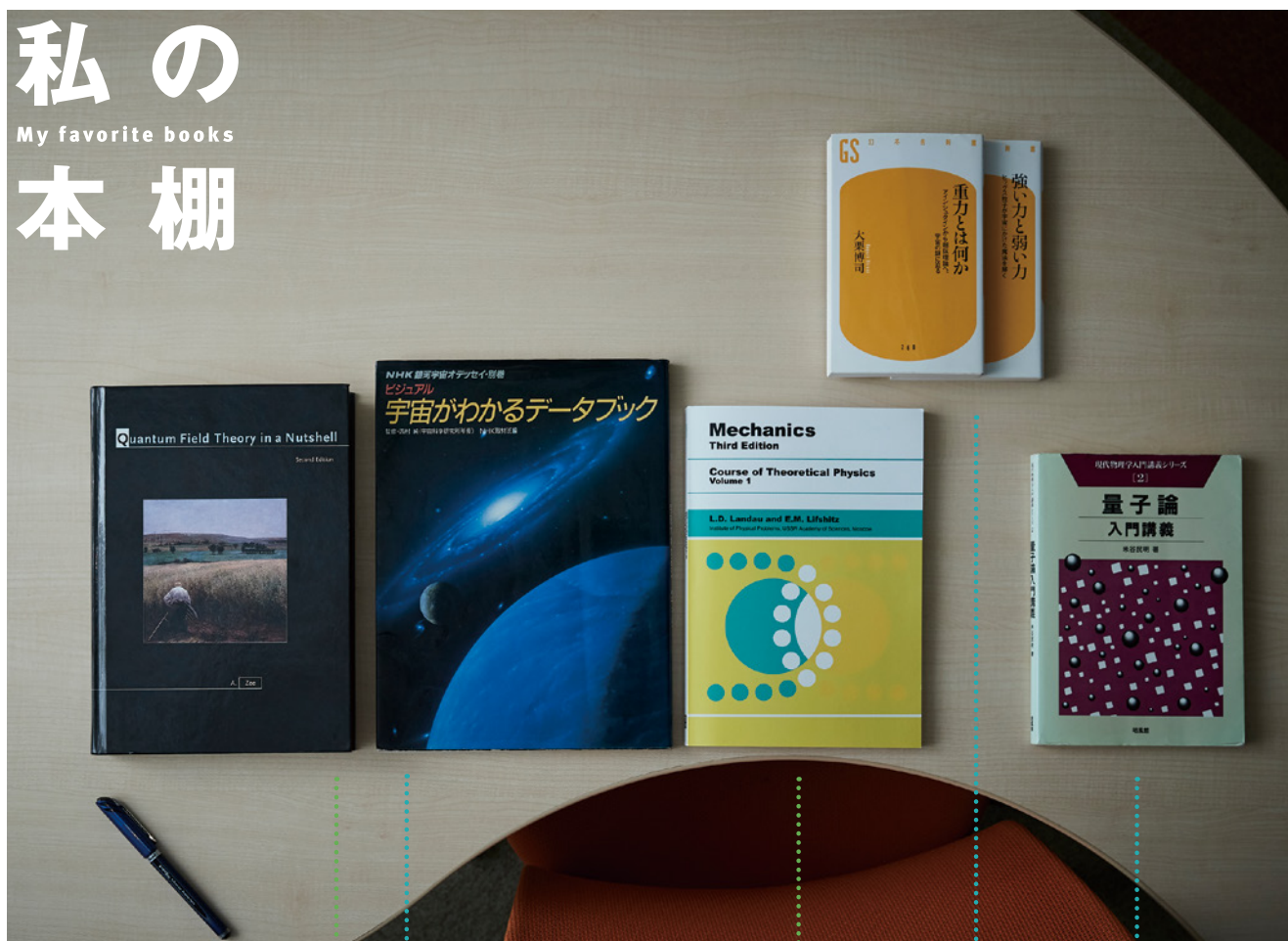
理論物理学者にとって欠かせないのは、他の研究者との議論です。写真は、京都での国際会議でMannque Rho氏と議論しているところ。私たちの研究を気に入ってくれたのか、この後、彼が書いた教科書の表紙に、私たちの論文の図を使ってくれました。



シアトルでの食生活

アメリカのシアトルでポスドクをしていた時の同僚の送別会。皆で食べているのはエチオピア料理。ランチは基本的に毎週、大学周辺にあるタイ料理、インド料理、メキシコ料理、ベトナム料理などのレストランのローテーションで、時折それ以外の珍しい料理を食べに行きました。ランチの後は、皆でカフェにコーヒーを飲みに行くのがお決まりのコースでした。

私の My favorite books 本棚



● 宇宙がわかるデータブック

子供の頃に父親に買ってもらった本。宇宙のはじまりから、物質を構成する素粒子とその相互作用、天体の誕生と進化、ブラックホール、太陽系と地球、生命の起源に至るまでの広範な内容を、写真やイラストを使って解説しています。結果的には、この本がその後の自分の研究者人生の原点になっているように思います。時折、初心にかえるべく本を見返しています。

● Quantum Field Theory in a Nutshell

場の量子論の基本的なアイデアから始まり、素粒子論や重力理論、超流動・超伝導現象に代表される物性物理、界面成長の非平衡物理など、スケールを超えた様々な物理現象への場の量子論の応用がエレガントに説明された教科書。場の量子論の普遍性と美しさをまざまざと実感させられます。フランクな講義を聴いているような感覚で、楽しんで読みました。

● 重力とは何か・強い力と弱い力

自然界の基本的な相互作用である重力、強い力と弱い力について、一般読者向けに明快かつ魅力的に解説した本。自分が子供の頃にもこういう本があったらと思うほど、わかりやすく噛み砕いて書かれています。「重力とは何か」、「強い力と弱い力」にはそれぞれ、最初のボスドク時代のボスだった Sonさんと、大学院時代の指導教員だった初田さんが登場し、個人的に感慨深く読みました。

● Mechanics

大学に入って最初に読んだ力学の教科書。高校までは単に公式として覚えていた物理法則が、シンプルな原理に基づいて論理的に理解できることを知って、目から鱗でした。Landau-Lifshitzの『理論物理学教程』は、この力学を含めた全10巻からなり、現在の自分の研究の至る所でそれらの考え方が基礎になっています。多くの理論物理学者は、従来のLandau的なパラダイムを超えることを目指して研究している、と言っても過言ではないでしょう。

● 量子論入門講義

大学1年時に受講した量子力学の講義の教科書。この世界が、量子力学という一見するとたいへん不思議な理論で記述されることに衝撃を受けると同時に、古典力学的な世界観に支配された当時の自分は、この世界のことを何もわかっていないということを思い知らされました。教科書の後半では、場の量子論や重力の量子論を構築する困難さまで解説しています。

子供の頃からの「宿題」

山本直希

9歳の頃のこと、父親が『宇宙がわかるデータブック』という本を買ってきた。宇宙のはじまりや素粒子、星の生死、生命の起源などについて、鮮やかな写真やイラストを使って説明されている本にすっかり魅了された。本の説明の中で、特に印象に残っていることが2つ。1つは、物質をつくる基本的な構成要素はクォークとレプトンと呼ばれる素粒子たちで、現在の宇宙にはどういう訳かクォークが単体では存在しないということ。もう1つは、宇宙はもともと空間のない無の状態から、泡のように突然有限の大きさの状態に遷移して誕生したかもしれないということ。しかし、当時は、それが何を意味しているのか、何故そう考える必要があるのか、理解することができなかった。この「宇宙の無からの創成」というアイデアは、ソ連生まれの物理学者ビレンキンが提唱した説ということで、世の中には想像を絶するようなこ

とを考える人がいるものだったと思った。宇宙のことに限らず、何かそういう自然界の根源的な問題について探求し、理解しようということがたいへん魅力的に映ったものである。

さて、それから四半世紀以上たった一昨年（2018年）9月、スウェーデンのある研究会に参加した。参加者にはそれぞれオフィスが与えられたのだが、自分と同じオフィスにいたのは、あのビレンキンだった！ちょうど自分が講演する日に彼が帰国する予定とのことだったので、最近自分の書いた超新星爆発に関する論文について、オフィスで議論してもらった（もちろん、自分が子供の頃に読んだ本のことも話した）。まさか自分とビレンキンの世界線が交わり、自分のアイデアを直接話せる日が来るとは、当時は思ってもいなかった。

子供の頃から現在に至るまで、世の中には「役に立つ」ものがかなり増えたように見えて、また様々な分野が流行を伴って発展してきたように見えて、宇宙や物質の成り立ちに関するそれ以前から

の積年の問題の多くは解明されないままだ。それでも、この間に着実な進展もある。この宇宙の年齢が約138億年であることが明らかとなり、素粒子の質量の起源となるヒッグス場の存在が実験的に確認され、最近、ついにブラックホールや中性子星同士の合体からの重力波が検出された。重力波については、アインシュタインが理論的に予言してから直接観測されるまでに、約100年もの時を経ている。このような人間のスケールをはるかに超えたことまで、長いタイムスパンで科学的に突き止めてしまうのだから、純粋に人類は凄（すご）いと思う。

確かにそこに存在しているけれども、今はまだ誰にも見えていない自然の普遍的な仕組みを明らかにしていくことに、自分も少しでも貢献できたらと思うし、若い人たちにも一時的な流行だけにとらわれず関心をもってもらえたらと考えている。そして、様々な方向性でそういう根源的な問題に挑戦することの意義について、理解のある社会であってほしいと願っている。

理工学 Information

ビジネスアイデアコンテストを開催

KEIO TECHNO-MALL 2019 第20回 慶應科学技術展にて、
ビジネスアイデアコンテストを開催しました。

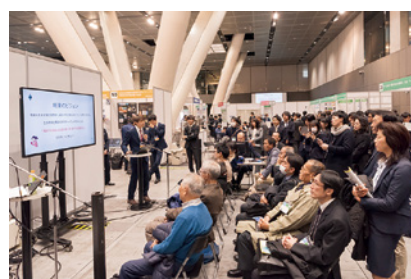
【コンテストの概要】

慶應義塾先端科学技術研究センター（KLL）では、理工学部等での教員・学生による研究成果を社会に実装、還元するために、ベンチャー企業創出、投資、またベンチャー企業への技術支援、協力を積極的に行っています。このコンテストでは、KLLの取り組みの一つであるインキュベーション活動・準備支援に本年度採択されたベンチャー企業の卵となる学生の事業アイデアを、4分間のショートプレゼンテーションによるピッチコンテスト形式で紹介しました。

8チームの参加があり、それぞれのビジネスアイデアについて、技術面、ビジネス面での審査を行い、最優秀賞1チーム、優秀賞4チームを選出しました。

【参加チームと発表者、および審査結果】

最優秀賞 Zip Infrastructure 須知高匡（学部3年）
優秀賞 コンジュゲート金ナノ粒子による簡易・迅速な遺伝子定量技術の開発と実用化 江刺家 恵子（博士課程後期）
優秀賞 Toy Step 山本剛毅（博士課程前期）
優秀賞 SC-Ring 菅 琢哉（博士課程前期）
優秀賞 LABLIC 長友竜帆（博士課程後期）
（以下発表順）
検索行動に注目した情報銀行業 小野寺 稔（学部4年）
ライブ型SNSの提案 倉田 彩司（学部4年）
債権譲渡スマートコントラクト 豊泉 喜一郎（学部2年）



編集後記

小さい頃から「解く」ことが好きだったという山本准教授。「解きたい問題がたくさんある」と目を輝かせながら話す姿が、とても印象的な取材でした。大学に入ってから新しいことに挑戦しようと、競技ダンスや格闘技を見学したり、いろいろな人に会いにいたり、それまでに経験したことがないことに挑戦しようとする姿勢は、問題を解くことができたときと似た感覚を得られることが原動力になっているのかもしれません。

（萩原いずみ）

今号の表紙：山本准教授が研究している「超新星」を背景にして制作しました。

新版 窮理図解



No.32 2020 February

編集 新版窮理図解編集委員会
写真 邑口京一郎
デザイン 八十島博明、石川幸彦（GRID）
編集協力 サイテック・コミュニケーションズ
発行者 岡田英史
発行 慶應義塾大学理工学部
〒223-8522 横浜市港北区日吉 3-14-1
問い合わせ先（新版窮理図解全般）
kyurizukai@info.keio.ac.jp
問い合わせ先（産学連携）
kl-liaison@adst.keio.ac.jp

web版
https://www.st.keio.ac.jp/education/kyurizukai/
facebook
https://www.facebook.com/keiokyuri