

「モノの本質を知りたい」から生まれた 原子核研究への Frontier Spirit — 物質の起源と宇宙の歴史が刻まれる 核図表に魅せられて —

Eagerness to know the essence of things generates Frontier Spirit of Nuclear Research

— fascinated by the chart of the nuclides, where the origin of
matter and the history of the universe are engraved —

小浦 寛之 先端理論物理研究グループ
KOURA Hiroyuki Research Group for Advanced Theoretical Physics



小浦寛之研究主幹は「宇宙の錬金術」のタイトルで、これまで多くの講演会やサイエンスカフェで、原子核の世界地図といわれる核図表の普及のためのアウトリーチ活動を行ってきました。2019年には核図表を全国の高校等に配布するためのクラウドファンディングにも挑戦し目標額を達成しました。

小浦研究主幹の原子核物理の研究や、核図表とその啓蒙にかける思いについて話をさせていただきました。

核図表との出会い

核図表を初めて見たのは大学4年生の時でした。その時は一般の方がこの図を見て「??？」と首をかしげると同じように、私も「なんだこれ・・・八岐大蛇（ヤマタノオロチ）のようだ」というのが第一印象でした。

よく知られている元素の周期表は元素の化学的な性質の観点から作られています。それに対し核図表は、原子核の中の陽子の数（元素の種類）と中性子の数を縦軸と横軸にとって、あたかも地図のように原子核の性質を一覧できるもので、どの原子核が安定であるのか、また放射線を出して崩壊するのか、その半減期はどれくらいかなどかが一目でわかります。

核図表は、宇宙の始まりであるビッグバンの時点で水素やヘリウムなどわずかな種類しかなかった元素が、星の中でどんどん作られ広がっていった様子を、ひとすじの道のように表していて、原子核の長い長い旅のまだまだ途中の図だとわかった時、私はすっかり魅了され、核図表を中心とした原子核の研究に進んでいました。

Under the title of “Alchemy of the Universe”, Dr. Hiroyuki Koura, a principal researcher has conducted outreach activities at several lectures and science cafes to popularize the Chart of the Nuclides, or the Nuclear Chart, which can be called the “world atlas” of atomic nuclei. In 2019, he took up the challenge of crowdfunding to distribute a copy of the nuclear chart to senior high schools across the country and succeeded in reaching the target amount.

Dr. Koura talked about his research on nuclear physics, the nuclear chart, and his thoughts on disseminating scientific knowledge.

First encounter with the chart of the nuclides

The first time I saw the chart of the nuclides, I was a senior in college. At that time, just like everybody else, I also was tilting my head and thinking “???”. “What is this? It looks like Yamata no Orochi.” [a multi-headed dragon of Japanese mythology] was my first impression.

The well-known Periodic Table of the Elements is constructed according to the chemical properties of the elements. On the other hand, the nuclear chart lists the properties of nuclei with the number of protons (i.e. the atomic number) on the vertical axis and the number of neutrons on the horizontal axis, just like a map. With just a glance at the chart, one understands which nuclei are stable, which ones decay by emitting radiation, and how long their half-life is.

The nuclear chart shows how a large variety of elements was produced in the heart of stars, following a specific course, from the Big Bang at the beginning of the universe, where only few kinds of nuclei like hydrogen and helium existed. path. When I realized that the long, long journey of the atomic nucleus is still ongoing, I was completely fascinated and decided to study atomic nuclei focusing on the nuclear chart.

新しい原子核を作る錬金術とは

原子は原子核と電子からできていますが、原子核が見つかったのは今から百年あまり前、1911年ニュージーランド出身のイギリスの物理学者ラザフォード(E. Rutherford)とその協力者ガイガー、マースデン(J. H. W. Geiger, E. Marsden)によります。そして1932年ラザフォードの指導を受けたチャドウィック(J. Chadwick)による「中性子」発見によって、原子核が陽子と中性子で構成されていることがわかりました。

また、ラザフォードは原子核と原子核をぶつけて人工的に元素が作れることを実証しました。ラザフォードが作ったのはすでに知られていた元素でしたが、このことによって原子核同士をぶつくと新しい原子核が作れるという発想が生まれました。この方法をさらに発展させて1934年に自然界には存在しない新しい原子核(新しい元素)を世界で初めて人工的に作ったのが、マリー・キュリーの娘夫婦であるフレデリック・ジョリオ＝キュリーとイレーヌ・ジョリオ＝キュリーです。彼らはこの人工放射性元素の発見によりノーベル化学賞を受賞しました。

実はこのことが現在行われている原子核研究の始まりになります。私が錬金術と呼んでいるのは、こうした原子核の合成によって新しい元素を作ることなのです。

宇宙ではこうした錬金術が星の中で行われています。星の中では原子核が星の重力による圧力で押されたり、高温によって激しく衝突してくっつけられ新しい元素が作られてきました。星は寿命がくると超新星爆発を起こして終焉の時を迎えます。その時に星の中で作られた元素が宇宙に飛び散ります。またこの1、2秒の爆発の瞬間に、それまで作られた以上に重い元素が作られ、地球の成分にもなっています。自然に存在する一番重い元素であるウランもこうして出来たものです。ウランは半減期が45億年あり、まだ寿命に達していないウランを我々はエネルギーに利用しています。

人工的に新しい元素が作れることがわかってからは、自然界には存在しない原子核が次々に見つかり、核図表も少しずつ広がっていきました。

The alchemy of making new nuclei

Atoms are made up of electrons orbiting around the nucleus, but the nucleus was only discovered about 100 years ago in 1911 by New-Zealand born British physicist E. Rutherford and his team of collaborators J. H. W. Geiger and E. Marsden. Later, in 1932, under the guidance of Rutherford, J. Chadwick discovered the neutron and revealed that the nucleus is composed of protons and neutrons.

Rutherford also demonstrated that elements can be artificially created by colliding nuclei with other nuclei. The element produced by Rutherford was already known, but his experiment gave birth to the idea that new nuclei can be created by making nuclei collide with each other. By further developing this method, in 1934 Frederick and Irene Joliot-Curie (the son-in-law and the daughter of Marie Curie) created the first artificial nucleus (new element) which does not exist in nature. They won the Nobel Prize in Chemistry for the discovery of this artificial radioactive element.

Their experiment was in fact the beginning of nuclear research which is still ongoing. The creation of new elements obtained via the synthesis of colliding nuclei; this is what I call alchemy.

In the universe, this kind of alchemy takes place inside stars. In the stars, atomic nuclei are pushed by the pressure of the star's gravity, or they collide violently due to high temperatures and get stuck together to create new elements. At the end of its life, a star will explode into a supernova and reach its end. At that time, the elements created in the stars are scattered in the universe. Within about 1 or 2 seconds during the explosion, elements heavier than all those created up to that point are produced, elements that also make up the Earth. Uranium, the heaviest element that can be found on our planet, is also made by this process. Uranium has a half-life of 4.5 billion years, and we use the uranium which has not reached the end of its life for energy.

Since it was discovered that new elements could be artificially created, atomic nuclei that do not exist in nature were discovered one after another, and the number of known elements gradually expanded.



原子力機構の核図表の大きな特徴

原子核が陽子と中性子で構成されていることが発見された1930年代から、核図表的なチャート図を作る動きがありました。当時よく知られたものとしてイタリア出身のアメリカの物理学者エミリオ・セグレのセグレチャートがあります。セグレチャートは、現在の核図表とは違って縦軸に中性子の数、横軸に陽子の数で作られていました。

しかし実験によってどんどん増えていく新しい原子核のデータはだいに旧来のチャートでは対応できなくなっていました。1970年代、原子力機構の前身である日本原子力研究所（原研）では、陽子と中性子の組み合わせが異なる新しい原子核データがすでに1900種類も蓄積されていました。これら全てを一覧で見るために進められたのが原研の核図表を作るプロジェクトでした。実験のデータベースは広島大学の吉沢康和先生が作られましたが、当時核分裂によって出てきた正体不明の原子核もたくさんあり、実験で調べきれないそれらをどうするかという課題がありました。それらを原子核理論で予測しデータベースを作られたのが私の恩師である早稲田大学の山田勝美先生でした。

この理論予測によって得られた未知のデータも収録して作られているのが原子力機構の核図表の大きな特徴で、世界中どこでも作られていないオリジナルの核図表です。

これは当時の原研で山田先生をはじめ核図表を作るプロジェクトに携わった研究者たちが、理論予測の有用性を確信して進めたことによる成果で、まさに卓見でした。

この理論予測により得られた、正体不明であるが現象として存在する未知の原子核データは、未発見の原子核を作る際の重要な指針となります。このような研究を進めたことで2004年の日本初の新元素「113番元素ニホニウム」の発見に関わることになりました。

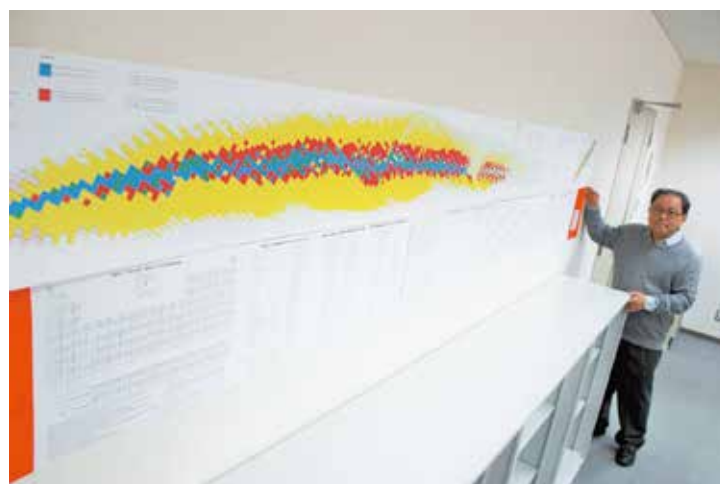
Major features of the JAEA Chart of the Nuclides

Since the 1930s, when it was discovered that the atomic nucleus is composed of protons and neutrons, there was an interest to arrange the known nuclei in a chart-like table of nuclei. The most well-known chart from that time was the one made by the Italian-born American physicist Emilio Segrè, called the Segre chart. Unlike the current nuclear chart, the Segre chart displayed the number of neutrons on the vertical axis and the number of protons on the horizontal axis.

However, the steadily increasing amount of data on new, experimentally produced nuclei eventually could not be supported any longer by the old charts. In the 1970s, the Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI), the predecessor of the Japan Atomic Energy Agency, had already accumulated data on 1900 new nuclei made by different combinations of protons and neutrons. Hence the project to create a JAERI nuclear chart was promoted to make all this information visible. Professor Yasukazu Yoshizawa of Hiroshima University created a database of the experimental data; however, there were several unidentified nuclei produced by nuclear fission, and the question arose of what to do with those nuclei that could not be experimentally investigated. It was my teacher, Professor Masami Yamada of Waseda University, who used nuclear theory to predict them, and created a database.

A major feature of the JAEA nuclear chart is that it includes data on unknown nuclei obtained by this theoretical prediction, which makes it a unique nuclear chart not made anywhere else in the world. This was the result of the fact that Prof. Yamada and other researchers involved in the project to create the JAERI nuclear chart were convinced of the usefulness of the theoretical predictions, and it was truly an excellent idea.

The inclusion in the chart of unknown nuclei, which are still experimentally unidentified but theoretically predicted to exist, provides important guidance to discover new nuclei. By advancing such theoretical research, in 2004 I became involved in the discovery of the first new element to be discovered in Japan, element 113 “nihonium”.



日本で初めての新元素ニホニウム (Nh) 合成実験に参加

私は現在、原子核の性質を理解するために、主に理論物理の立場から研究に取り組んでいます。113番元素ニホニウムも偶然見つけたものではなく、実験の積み重ねデータから類推される外挿値とともに、理論計算からの予言値も参考にして実験を実施しています。例えば原子核をどのようなエネルギーでぶつけると効率的か、また、合成される元素がどのようなエネルギーで壊れるか、などです。新元素の発見については世界中の研究グループがしのぎを削って競争していて、その当時はまだ見つかっていなかった、陽子の数が113個の元素を作ろうということで理化学研究所（理研）で始まったプロジェクトでした。この113番元素についてはロシアとの競争に競り勝って命名権を獲得できました。

私は2000年に学位を取り、2001年から2004年まで理研に所属していました。研究者としてのスタートから113番元素合成実験プロジェクトのキックオフに関わる事ができ、発見という成果の場に立ち会えたのはこの上もなく喜ばしいことでした。

どこまでも広がる未知の原子核への興味

未知の原子核を見つけようという原子核物理の研究はまさにフロンティアです。知りたい・見たいという純粋な欲求が原動力になっています。

原子力機構の核図表には、陽子・中性子ドリップ線という原子核の存在できる限界の目安になる境が描かれています。いわば原子核の旅の終着地です。

原子核の存在限界については、原子番号に関しては172番か173番が限界であろうと考えられています。原子番号が大きくなると、原子核の寿命が急激に短くなり原子として存在することが難しくなります。そのギリギリが173番の手前であるというのが私の理論的な予測です。

現在、118番までの原子核が見つかっていて、次の超重元素実験の興味は119番、120番元素の合成で各国で競争しながらプロジェクトが進められています。

モノの本質への興味と自分で考える面白さ

両親の話によると、私は幼稚園の頃、非常に落ち着きがない子どもようでした。しかし小学生になって本を読むようになると集中できるようになり、それで父親が次々と本を買ってきてくれたのです。そのおかげでものすごく本が好きになりました。

それと庭の木に登るのが大好きでした。私の場合冒険心で登ると言うよりは、どの枝を掴み、どの枝に左右どちらの足をかければいいのかなど、テクニカルなことを理詰めで考えながら登るのが好きでした。手順を考えて達

Participating in the synthesis experiment of nihonium (Nh), the first element discovered in Japan

Currently, in order to understand the properties of atomic nuclei, I am working mainly from the standpoint of theoretical physics. Element 113 nihonium was not discovered by chance: the experiment that discovered nihonium was devised by considering both the extrapolated value inferred from accumulated experimental data as well as the predicted value from the theoretical calculation. For example, at what energy is most suitable for nuclei to collide, and at what energy would the newly synthesized element be destroyed? The search for new elements is carried out by research groups around the world in fierce competition with each other and, at that time, it was RIKEN that decided to focus on the production of an element with 113 protons, which had not yet been found. In case of element 113, we won the competition with Russia and obtained the right of deciding its name.

I got my degree in the year 2000, and between 2001 and 2004 I belonged to RIKEN. So, from the very beginning of my research career, I was able to get involved in the kick-off of the project for the synthesis of element 113, and it gives me a profound joy to witness the consequences of that discovery.

Interest in unknown nuclei, however far they extend

The nuclear physics search for unknown nuclei is true "frontier" research. It is driven by a pure desire to see and to understand.

The JAEA nuclear chart depicts the so-called proton and neutron drip lines, which are guidelines for the limit of existence of atomic nuclei. They are, so to speak, the last stop in the nuclear journey. Regarding the limit of existence of atomic nuclei, it is thought that the highest possible atomic number might be 172 or 173. As the number of protons increases, the life of the nucleus sharply shortens, making it difficult to exist as an atom. My theoretical prediction is that the largest possible atomic number should be just a little below 173.

Currently, nuclei with up to 118 protons have been found, and the focus of the next superheavy element experiment is the synthesis of elements 119 and 120; several countries are competing in this search.

Interest in the essence of things and the fun of thinking for yourself

According to my parents, when I was in kindergarten, I was a rather restless child. However, during primary school I became able to read books and to concentrate, and my father kept buying me book after book. Thanks to his encouragement, I turned out to be really fond of books. I also used to love climbing trees in our garden. In my case, rather than climbing with an adventurous spirit, I liked climbing while thinking about technical matters such as which branch to grab or on which branch to step with my left or right foot. I guess that it is the kind of joy that you feel

成した時に「うまくできた」と感じる喜びとでもいうのでしょうか。

高いところだけでなく小学校3, 4年の頃は、庭にトンネルを掘ると決めて、体が埋まるほど深く掘って母に叱られたこともありました。発想したらやってみたい性分で、やり出すと集中しすぎて周りが見えなくなることも多々ありました。

中学生の頃は歴史や古典が好きでしたが、高校生になって理科にも興味を持ちました。その根本にあるのは、いろいろな事、いろいろな仕組みを知りたいという思いでした。私にとって原子核研究の魅力もまさにそういうことです。その事象がどこからきているのか、どんなしくみなのか、本質は何なのかを知りたいという探究心は文系も理系もなく、今でも趣味として日本の文化等に影響を与えた中国の古典をワクワクしながら読んでいます。

アウトリーチ活動で広めたい核図表の世界観

私たちのまわりには現実にたくさんの自然放射線があります。たとえば1本のバナナに含まれるカリウム40は1秒間に数十個のベータ線を出しています。私たちは好むと好まざるとにかかわらず放射線の中で進化し、放射線とともに生きていることを核図表は教えてくれます。私は放射線とはいったいどういうものなのか、その成り立ちから正しく知ってほしいと思うのです。核図表で見ると我々の身体も、星の進化の中で何十億年もかけて作られてきたことが分かります。こうした壮大な知見は自分が何者であるかと考える上で、実はきわめて重要なことではないかと私は思っています。ビッグバンからひとすじにつながって広がっている原子核の世界観を、核図表を通して高校生とか一般の方に伝えることで、自分の生命や存在に対して今までとは少し違う見方ができるのではないかと思います。

そうした思いで、2019年度には高校生向けの日本語版核図表を制作し、国内の高校へ配布する「1校に1枚核図表」を目指したクラウドファンディングを実施し、目標を達成しました。2020年度にまず1200部を茨城県と福島県、全国のスーパーサイエンスハイスクール (SSH) に配布し、今後希望があれば出張講演を行ってきたいと思っています。

今後も原子核の研究とともに、いろいろなアウトリーチ活動によって核図表を身近なものに感じてもらえるよう広めていきたいと思っています。

when your success comes from a procedure that you have devised yourself.

Not only attracted by high places, when I was in the third or fourth grade of elementary school, I decided to dig a tunnel in the garden, and I dug so deep that I could almost get buried. I ended up being scolded by my mother. In general, I was a child who wanted to try immediately when I came up with some new idea. Oftentimes, I concentrated so much that I forgot everything else around.

In junior high school, I liked history and classics, but as a senior high school student, I became interested in science. At the root of this interest was a desire to know different things and their working mechanism. That is exactly what makes nuclear research attractive to me. The inquisitive mind of wanting to know where a phenomenon came from, how it works, and what is its essence, is not exclusive of either humanities or science; even now, as a hobby, I am excited to read Chinese classics that influenced Japanese culture.

To spread the world view of the chart of nuclides: outreach activities

There is actually a lot of natural radiation around us. For example, the potassium-40 contained in a single banana emits dozens of beta rays per second. The nuclear chart tells us that we have evolved and live in a radiation-filled environment, whether we like it or not. I want people to know what radiation is, and where does it come from exactly. Looking at the nuclear chart, we can see that our bodies are made of nuclei created over billions of years during stellar evolution. I think that these magnificent findings are in fact extremely important in understanding who we are. I think that by communicating the world view of the atomic nucleus, which is connected to the Big Bang, and by sharing it with high school students and the general public through the nuclear chart, I think that it may give us new insights into our own life and existence.

With that in mind, I produced a Japanese version of the nuclear chart for high school students and carried out a crowdfunding project aiming at “one chart per school” to be distributed to high schools in Japan in 2019. And the goal was achieved. In 2020, the first 1200 copies were printed and will be distributed to all high schools in Ibaraki and Fukushima prefectures and to all Super Science High Schools (SSH) nationwide; also, if there are requests and possibilities, I am willing to visit schools and present the nuclear chart to give lectures on their request. In future, along with my research on atomic nuclei, I hope to make a large number of people feel familiar with the nuclear chart through a variety of outreach activities.



本インタビュー内で紹介しましたとおり、日本原子力研究開発機構ではクラウドファンディングプロジェクト

「1校に1枚核図表」を！原子核の世界観を届けたい

を実施しています。本プロジェクトは、日本の各高校へ「核図表 日本語版」を配布し、高校生に原子核の理解を深めることを目指しています。

クラウドファンディングの詳細は以下のHPをご参照ください

アカデミストHP

URL: <https://academist-cf.com/projects/169?lang=ja>

原子力機構HP

URL: <https://www.jaea.go.jp/news/newsbox/2020/013001/>