

甲南大学 総合研究所所報

甲南大学総合研究所

〒658-8501 神戸市東灘区岡本 8-9-1

電話 (078) 435-2754(ダイヤルイン)

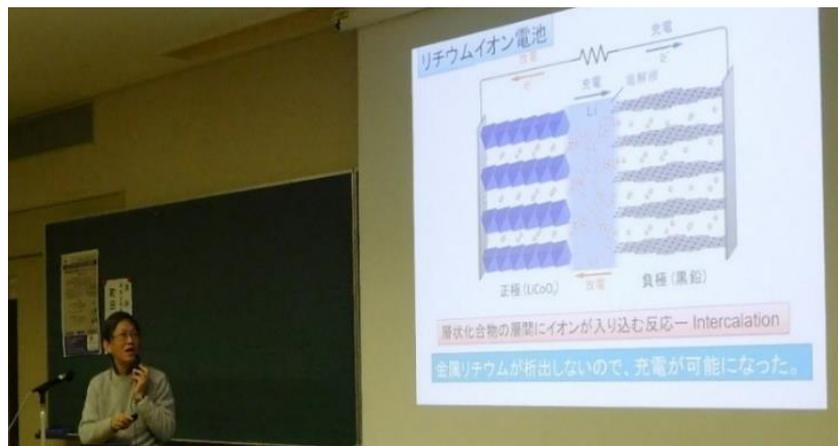
第 71 回 総合研究所公開講演会 「甲南の教員が解説する Nobel Prize 2019」

～ノーベル物理学賞／化学賞～

講 師 町田 信也 (甲南大学 理工学部教授)
須佐 元 (甲南大学 理工学部教授)

2019 年 12 月 21 日 (土) 開催

町田先生



須佐先生



【稲田】 ……先生方に解説していただくと、こういうふうな段取りになっております。

きょうのスケジュールだけ簡単に申しておきます。ここに皆さんのチラシがございますように、きょうは13時30分から15時ということで、90分で、それで、きょうは2人の先生にしゃべってもらいます。ですから45分ですので、間に1回トイレ休憩ぐらい数分とりますので、そんなイメージで、先生方に各30分ぐらいしゃべっていただきまして、バックグラウンド、トピックスをしゃべっていただきまして、そして、少し皆さん方のご質問に答えると、そういうふうな流れになっておりますので、よろしく願いいたします。

早速ですね、時間少し前ですけど、これだけたくさんの方に来ていただきまして感謝しております。

それでは最初に、きょうのところは、チラシにもございますように理工学部の町田先生のほうからリチウム電池についてのところの解説等々、ノーベル賞に関してのご講演がございまして、そして、後半は須佐先生から、前半の部分は化学賞でありますけど、物理学賞、物理学のほうということで、今回は2人の先生に少しオムニバスのようにノーベル賞の今回のトピックスということで、それを解説していただくことになります。私は何を言うよりも、早速先生方の講演に移りたいと思いますので、よろしく願いいたします。

念のため申しておきますと、トイレはここを出て向こう側でございますので、よろしく願いします。

それでは、先生、よろしく願いします。

【町田】 ご紹介ありがとうございます。私、甲南大学理工学部の町田と申します。どうぞよろしく願いいたします。(拍手) また、稲田先生をはじめ総合研究所の方々にはこのような機会を頂きましたことを感謝申し上げます。

私事で申しわけありませんが、一月ほど前にぎっくり腰というやつになりまして、非常に動きが緩慢なんです。腰のほうもベルトを巻いているような状況で、本来でしたら、きちんとネクタイ締めてスーツを着て講演させて頂くのですが、スーツのズボンが腰痛ベルトのために入らないという状況なので、ラフな格好で講演させて頂くことをお許しいただければと存じます。よろしく願いいたします。

私の講演内容なのですが、ちょっと明る過ぎてスライドが見えませんか。これで見えますでしょうか？このようなタイトルでお話しさせて頂きたいと思っています。2019年度のノーベル化学賞は「リチウムイオン電池の開発」というタイトルでノーベル賞が与えられたのですが、副題は勝手に私がつけました。「リチウム電池からリチウムイオン電池へ」ということで副題をつけさせていただいています。

「リチウム電池」というものと「リチウムイオン電池」というのはちょっと違うんですよ。非常に似ていますが。今回の受賞は「リチウムイオン電池」です。そこら辺の違いというものも含めながら、バックグラウンドについてお話をさせていただければなと思っています次第です。

今回の受賞はこのような方々、すなわち、グッドイナフ先生とウィットニング先生と吉野彰先生が、お三方ノーベル賞をとられたということです。

今回の総合研究所の講演会に先立ちまして、理工学部のほうではランチョンセミナーという形で、お昼休みのお弁当を食べる時間に学生さん向けにノーベル賞などのトピックスのお話とかをする機会がございまして、そちらでもちょっとお話をさせていただきました。そのときに使った、作ってくださったポスターです。僕がつくったわけじゃありません。

これがリチウムイオン電池の構成図になっています。電池ですからプラスの極とマイナスの極があるわけですね。その間を電解質溶液という溶液が満たしていて、リチウムイオンが、このプラスと書いてあるやつが動くわけです。プラスの正極もマイナスの負極も特徴的なことは、層状の化合物、こちらはコバルト酸リチウムという化合物で、こちらはペトリウムコークつまり、石油からつくった炭です。黒鉛みたいなものが使われるというよ

うな形で描いてある図です。

どちらの極も、特徴的なのは、ちょっと層の構造が見えますよというところなんですけど、この層の構造というのが特徴です。もう少し大きくして書いたのがこんな形の絵なんですけども、これはリチウムイオン電池の構成図で、マイナスの極、負極と呼びますが、こちらは黒鉛が使われています。プラスの極はこっち、正極と呼びますが、こちらはリチウムとコバルトの酸化物。こういうふうにならなっているんですね。このオレンジ色で描いた小さな粒がリチウムイオンのつもりで描いています。この紫色というか青色のところはコバルトと酸素のつくっている層がずっと並んでいますよ というような構成になっています。

これを見ていただいてすぐわかると思うんですけども、一般にリチウムというのは金属なんです。この金属リチウムはこの中に一切ない。一切いません。だから、こちらは黒鉛、こちらはコバルト酸リチウムです。だから、金属のリチウムというのはこの中に存在しない。この金属リチウムが存在しない電池のことを「リチウムイオン電池」というふうに呼んでいます。

今回の受賞対象になったリチウムイオン電池の定義を、ここに書きました。カーボン材料を負極、リチウムイオン含有遷移金属酸化物、ちょっと難しい言葉ですけど、このコバルト酸リチウムのことですね。この酸化物を正極として、電気化学的インターカレーションに基づく非水系電解液二次電池。なかなか難しい言葉が並んでいますが、1つずつ言葉をご説明させていただけたらなと思っています。

この中でキーポイントになるのは、この層状の化合物をどうして使ったかということなんですけども、この層の化合物の中にリチウムイオンが入っていったり、あるいは出ていったりする、そういう反応のことをインターカレーション反応と呼びます。この層状の化合物の中にリチウムイオンが出たり入ったりするんだよというのが1つの大きなポイントだというふうにお考えいただけたらいいかなと思います。

ここで、ノーベル賞をとられたお三方をご紹介だけさせていただきます。グッドイナフ先生です。非常にご高齢で97歳、多分、最高齢でノーベル賞をとられた方です。この方の恐ろしいのは、いまだに現役で論文を書かれていますところ。この業界では、グッドイナフ先生が言うてるから、少し奇抜な論文でも「ほんまに起こるん？」とか言いながら、やっぱりどこのメーカーさんも追試みるというぐらいの影響のある先生です。もともとはドイツ生まれの方なんですけども、イェール大学の数学科を卒業されて、その後、物理のほうに転向されるんです。物理のほうへ転向されて、半導体物理を専攻されます。半導体物理で学位を取られて、それから、MIT (Massachusetts Institute of Technology) で研究され、その後、オックスフォード大学に移られます。今現在はアメリカのテキサス大学のほうにいらっしゃいますが、このオックスフォードにいらっしゃるときに行われたご研究が今回のノーベル賞の対象になっているものです。

次の先生は吉野彰先生。これはテレビによく出てこられるのでよくご存じだと思いますが、旭化成という会社にずっといらっしゃった先生です。御年71歳と、今回の化学者の中で一番お若い先生になります。

最後、ウィッティンガム先生ですね。ウィッティンガム先生は非常にお優しい先生で、にこやかな感じの先生です。この方はオックスフォードをずっと卒業されて、EXXON という会社がアメリカにございますが、石油系の大きな会社です。そのEXXONの研究所にいらっしゃったんですね。今現在はニューヨーク・ステート・ユニバーシティーのほうにいらっしゃいますけれども、EXXONの研究員をやられていたときのご業績が今回のノーベル賞につながったということです。

いずれもノーベル賞の受賞につながったご業績というのは、私がまだ中学生ぐらいのころにやられているご業績なんです。だから、私が紹介するのもちょっとどうかなと正直思います。業績内容としてはわりと昔からある内容のご業績だにご理解いただきたいと思います。

これは、とある本のタイトルですが『Solid State Chemistry of Energy Conversion and Storage』という本が1977年に出ています。これを編集したのは今のグッドイナフ先生とウィッティンガム先生。だから、もうこのころにはノーベル賞の基礎になった概念が確立されちゃっているということです。つまり内容としては、現在の最先端のお話ということにはならないと思いま

すが、ご了解いただければと思います。

冒頭に申し上げた「リチウム電池」と「リチウムイオン電池」の違いですが、「リチウム電池」というのは基本的には金属リチウムをマイナスの極、負極に用いた電池のことです。これは1980年代までに市販化されています。

どんな特徴を持った電池かという、非常にエネルギー密度が高い電池です。しかし、基本的に放電のみの反応しか起こらない。使い捨ての電池です。いわゆる乾電池みたいな使い方をするやつです。充電したりすることはできなかったんです。なぜ充電することができなかったかという、充電しようとするとうと発火、破裂、爆発したからです。

なぜ爆発するのかという、金属リチウムをマイナスのところに使っている、今度充電するときには金属リチウムを析出せないといけないんですね。その金属リチウムを析出するときに、きれいに平面上に金属リチウムが出てきてくれたらいいんですけども、とんがった針みたいな感じで出てくるんですね。デンドライトというんですけど、とんがった針みたいな形で金属リチウムが析出します。そうすると、セパレーターと呼ばれる、間に挟まっている電解質溶液をしみ込ませた壁を突き破って向こう側、反対の極まで針が突き抜けちゃうんですね。そうすると電池の内部で短絡、つまりショートが起きちゃって暴走するというので、これは一次電池にしか使わない。充電できないよねと言われていたものです。

リチウムイオン電池、今回のノーベル賞の対象になった電池は、先ほども申し上げましたように金属リチウムを使っていないんですね。金属リチウムを使っていなかった、充電ができるようになったわけです。充電も放電もできる、いわゆる二次電池という形で使うことができるようになった。こちらのことを「リチウムイオン電池」というふうに名前をつけています。

この「リチウムイオン電池」は、最初に、1991年に日本のソニーが世界に先駆けて市販化しました。そのときにソニーさんが、いろんな特許を書く上でリチウムイオン電池という名前をつけられたと私は聞いております。ソニーとここで言うと、「テレビで出てきている吉野先生は旭化成の人じゃない？」と、「何でソニーなの？」という話も出てくるんですが、後でおいおいそのお話もさせて頂きたいと思います。

この「リチウムイオン電池」というのはどんな特徴を持っていたかですけど、これはよくあるラゴンプロットと呼ばれる図面なのですが、横軸に単位重量当たり、単位質量当たりのエネルギー密度をとっています。縦軸に単位体積当たりのエネルギー密度をとっています。昔から、今でも車に使われている、あの鉛蓄電池がこの辺です。ニッカドがあって、「エネルーブ」という商品名で一世を風靡したニッケル-水素電池がこの辺です。リチウムイオン電池は図面のこの辺に位置しており、体積エネルギー密度も大きいし、重量エネルギー密度も大きいしということで、発売と同時に爆発的に売れたというのがリチウムイオン電池がたどった歴史です。

リチウムイオン電池の構成図、先ほどもお見せしたのと全く一緒ですけども、特徴的なのは層状の化合物を使って、この層の中にリチウムイオンが出たり入ったりするんだよという反応、インターカレーション反応というのを使って構成されています。すなわち、金属リチウムが析出しないので充電が可能になった。ここがわりと大きなブレークスルーだったわけです。

このことが、それぞれの先生方のご業績とどういうふうに関連していくかということですが、この文章はリチウムイオン電池の定義ですね。「カーボン材料を負極、リチウムイオン含有金属酸化物を正極とし、電気化学的インターカレーションに基づく非水系電解液二次電池」というのがリチウムイオン電池の定義です。この「電気化学的インターカレーション」というこの部分ですね、この部分を確立されたのが、ウィットティング先生です。

ウィットティング先生のご業績というのがどんなにかということなんですけど、これは私が学生のころに読んだウィットティング先生の総説です。いつ出ているかという、ちょっと見にくいんですけど、1978年に出版されています。総説と言っていますから、ほんとうの論文はこの二、三年前に出ているわけです。このウィットティング先生がタイトルで『Chemistry of Intercalation』ですね。私事ですが、私は最初から電気化学をや

っていた人間ではなくて、もともと学生ときはガラス屋さんとして教育を受けました。それで、こんな総説を読む気はあまりなかったんですけど、とあるきっかけで読まなくてはいけなくなりました。ウィットニング先生が大好きだったのは、この **Titanium disulfide** という物質で、二硫化チタンというものです。ここにも二硫化チタンっていっぱいワードが出てくるんですけど、私がほんとうに読みたかったのはこの下の、この下のあたりが読みたかったんですけど、行きがかり上、全部読むことになりました。

この総説の一番最初のイントロダクションがこのスライドですが、ちょっと見にくくて申しわけありません。ここに何が書いてあるかという、「カレンダーに2月の29日が入ることをインターカレーションと呼びます」と、最初の第1文が書いてあります。はじめて読むと「何やそれ」となるわけですが。化学の論文のはずやのにと思って読み始めるんですけど、その次にケミストリーではねと、「化学の世界では層状の化合物の中にリチウム、別の化学種が入っていくことですよ」というふうなことが書いてあります。

どういうことかという、要するにカレンダーなんですよ。カレンダーとして日めくりを思い浮かべていただいたら、2月の28日があって、3月の1日がありますよね。それがずっと重なっているのがカレンダーじゃないですか。その2月の28日と3月の1日の間に別の2月の29日というページを外からぎゅっと押し込むと、それがインターカレーションという意味合いです。だから、日常用語としたら、辞書を引くと「うるう年」とかって書いてあるんですけども、化学の世界では、層の間に外から別のものが押し込まれる反応のことをインターカレーションというんだよというふうにご理解いただければと思います。ここですね。

ここに書いてあるんですけど、インターカレーション、層状の化合物の中に外から物質が入ってくるというのは、何もウィットニング先生が最初に見つけたわけじゃないんです。この反応は、昔から知られている、1926年ぐらいから知られているのだと。どんなことが知られているかという、グラファイト、つまり黒鉛の中にアルカリ金属がその層間に入っていくよということが知られていますねと。1959年にもこういう人たちが研究していますねということが書いてあるわけです。

ウィットニング先生のご業績は、こういう層状の化合物の中にアルカリイオンが入っていくのを電気化学的に行ったことです。この人たちは何をやったかという、溶液の中に黒鉛の粉末を入れて、その溶液にアルカリ金属を溶かしてぐるぐるぐるぐると混ぜていたら、その黒鉛の層間の中にリチウムやナトリウムが入っていきますよというのを見つけたのがこの辺の人たちです。

溶液反応ではなく、電気化学的に、ウィットニング先生が行ったのは、この二硫化チタン TiS_2 というこの化合物なんですけど、この化合物で電極をつくっておいて、リチウムイオンが入っている溶液の中に浸して、その電極にマイナスの電圧をかけると、プラスのイオンであるリチウムがこの層間の中に入ってくるということを発見された。それが可逆的に起こる。電圧を反転させてやったら、リチウムイオンが出ていきよると。また、マイナスのほうに戻すと入ってきよるといようなことを見つけられて、電池に使えますよねということをおっしゃったわけです。

そのとき、これは違う人のデータで申しわけないですけど、縦軸は電池の電圧やと思ってください。横軸はキャパシティーと書いてありますが、電池がもつ時間だと思っていただけたらいいと思います。電圧の高いところから低いところへ下ってくる曲線は放電曲線です。ずっと放電していったら電圧がだんだんだんだん低下して、最後おしまいになるよと。放電が終わった電池に反対方向に電気を流して充電すると、このカーブに沿って電圧が上へ上がっていくぞということで、放電もできるし充電もできるしというような構成を見つけられたわけです。

それが何回ぐらい繰り返せますかというので、横軸はその繰り返し回数ですね。縦軸はこのときの電気化学容量で、何時間電池がもちましたという数字ですけど、1回目はちょっと多いんですけど、2回目からちょっと下がってます。しかし120回繰り返してもずっと同じだけ充電したり放電したりできますよというのをご報告されたというのがウィットニング先生のご業績というふうにご理解いただければと思います。

次、グッドイナフ先生です。ほんとうに御年97歳なのにまだ論文を書かれる、ほんとうに私どもは化け物かと、ちょっと言葉は悪いですけどってしまう方なんですけど、この方のご業績はここです。「リチウムイオン含

有金属酸化物を正極とし」という部分です。どういうことかということなんですが、先ほどウィッティンガム先生が見つけれられた TiS_2 という物質は、もともとリチウムを含んでいませんので、外にリチウムの源、リチウム源を置いて、そこが供給してやらないといけません。グッドイナフ先生が見つけたのは、このコバルト酸リチウム ($LiCoO_2$) というやつで、ここがコバルトと酸素がつくっている層です。この紫色が。この緑がリチウムイオンなんですけど、こういうきれいな層に並んでいます。最初にリチウムイオンが入った物質を作っておいて、ここからはリチウムイオンを引き抜けるよね、それも電気化学的にきれいに引き抜けるよねということ報告されたんです。

その論文がこいつですね。この1980年の論文で、『Materials Research Bulletin』というところに出ているやつです。著者は水島さんと、それからジョンズとワイズマンとグッドイナフです。この水島さんというのはこの写真の人です。もちろん日本人。東芝の方です。この方がお若いときにグッドイナフのところへ行って、この実験をやった。この方はもともと半導体屋さんなんです。半導体屋さんです。グッドイナフ先生ももともと半導体屋さんなんです。半導体屋さんなんですけども、オックスフォードに行かれて、そのとき水島さんがかかわっておられた半導体のほうのプロジェクトがあまりうまくいかなかったみたいで、お若かったから、ちょっとイギリスで気分転換みたいな感じでオックスフォードへ留学されたみたいなんですけども、そのときに「どうせ1年か半年しかおられへんから、こんなんでもやってみろよ」みたいな感じで出されたテーマだというふうに聞いています。そういうような形で、これを見つけられたわけですね。

このコバルト酸リチウムを正極として電池に用いたときの優位性としては、リチウムイオン電池一つ当たりの電圧です。リチウムイオン電池一つで4.1ボルトという非常に高い電圧を出せる。今まで使われていたいわゆる乾電池というやつは1.5ボルトぐらいですね。その2本分は十分にあるよねということです。それと、もとの構造にリチウムを含んでいるので、充電反応から電池反応を開始できます。つまり、負極にアクティブなリチウムをためておく必要がないわけです。それは工業的に生産する際の工程がとても安全になります。だから、そういう意味合いでこれはとても良いことだったわけですね。

一方で、コバルト酸リチウムという正極もいろいろと課題がございます。コバルトは希少金属で、南アフリカのほうで産出量が多いんですけど、いろいろ政治的に不安定な地域ですので、なかなか難しいことがあります。そこで、コバルトが最初は使われていましたが、いろいろ代替えが今現在行われています。その代替えの1つとして、グッドイナフ先生は、鉄を使うことを提案されます。鉄、どこにでもありそうな。

これも有名な論文なんですけど、これは1997年にグッドイナフ先生が出したやつで、 $LiFePO_4$ オリビンと言われるこういう化合物です。オリビン型のリン酸鉄リチウムという物質なんですけど、これでも3ボルト以上の電圧が出てくる、充放電ができる電池が組めますよということで、現在、市販の電池にも使われております。

駆け足で申しわけありませんが、吉野先生ですね。吉野先生のご業績はどんなのかということですが、吉野先生のご業績はリチウムイオン電池の定義の中のこの部分です。「カーボン材料を負極とし」というところですね。ここが吉野先生のご業績です。

この写真は2000年にノーベル賞をとられた白川先生です。白川先生のノーベル賞はどんなことだったかというと、ポリアセチレンという物質を合成されたんですね。ポリアセチレンって、ここのユニットのことをアセチレンといいますけど、ここ、三種結合になったやつですが、それを重合させて、こういうジグザクの構造を持つポリマーをつくったんです。これにドーピング、アルカリ金属をちょっと入れるとか、ヨウ素を少しと入れるとかすると、ものすごく高い電子伝導性を示します。ものすごく電気がよく流れるんですよというのを見つけられて報告されたんですね。

これが白川先生がノーベル賞をとられた理由なんですが、これと吉野先生のご業績は密接に関連していて、吉野先生というのはこのポリアセチレンを電池に使えないかということをやっておられました。こいつをマイナスの極に使えないのかなということを一生涯懸命旭化成でご研究になっておられました。ポリアセチレンは良い特性を示したようなんですが、結局、工業化はされておられません。なぜかということ、アセチレンというのは保存する

のがすごく大変なんです。タンクにためるのが。ボンベぐらいの大きさでためるのはいいんですけど、工業的にバンバン生産しようとする大きなタンクでためないといけない。それは相当危ないことなんですよね。そういう意味合いで旭化成さんは工業化を断念したと聞いております。しかし、これを吉野先生はやっておられる。

だから、どこでノーベル賞をとったのという話になるんですが、多分、このノーベル賞に値したのはこのパテント、特許です。この特許、実物を拡大したのがこの図面ですが、ここにある吉野彰と書いてあるやつですね、アメリカに出した特許です。中身としてはいろいろ書いてあります。特許を読むのは難しいですが、ここら辺に、プラスの極はさっき言ったリチウム含有の遷移金属酸化物を用いるとあり、この辺にカーボン材料を負極に用いますということが書いてあります。この部分が多分ノーベル賞の対象になったんだというふうに思っております。

要するにここの部分、この負極の部分に黒鉛系の材料、カーボン系の材料を使われて、この中にリチウムイオンが出たり入ったりしますよと。それをマイナスの極にして、プラスの極は先ほどのリチウム含有遷移金属酸化物で、現象としては電気化学的インターカレーションを正極・負極の両方の極で使うということの特許として申請されて、それでリチウムイオン電池をつくられたというのが吉野先生のご業績というふうに理解しています。

ここの部分、ここ、黒鉛と書きましたけど、いろんな炭素系の材料が使えるんですね。黒鉛って非常に難しい分野で、これがちょっとゆがんでいるやつとか、ちょっと斜めになっているやつとか、いろんな種類の、ハードカーボンだとかソフトカーボンだとか、いろんな種類がございまして、最初、吉野先生が出しておられるのは、この黒鉛という限定はないんですけどもカーボン系の材料を使ってという形で書かれているところで、また、それを実際に実用化まで持っていったというところでノーベル賞になったというふうに理解しています。

リチウムイオン電池の特徴としてはここに書いてある通りで、それまで使われていたニッカド電池と比べて非常に大きなエネルギーが取り出せるよとか、3.6ボルト以上の電圧が出せるよとか、大電力が取り出せるよとか、有害な水銀とかカドミウムとか鉛とかは入っていませんとか。金属リチウムを使っていたいわゆるリチウム電池というのはIATAの、飛行機の規制ですけど、それで規制がかかっている、カメラ用のリチウム電池2個までしか機内に持ち込んではいけませんという法律がその当時ございました。リチウムイオン電池は金属リチウムを使っていないから自由に持ち込んでいいよということになって、この辺も大きかったと思います。

注意点というか、いろいろデメリットもあるんですけど、きちっと使えば安全です。時々新聞で、リチウムイオン電池が熱を持ちましたとか、膨らんで危ないですとか、いろんなことが報道されますし、いろいろそういうまだまだ開発を続けなきゃいけない部分はあるんですけども、とりあえずこんなところですよ。

リチウムイオンの工業化ですけども、先ほど申し上げたみたいに1991年にソニーが電池に名前をつけて、つまりリチウムイオン電池として市販したのが最初ということになっているんですが、実は旭化成さんは1987年に、電池は名前をつけずにセミコマーシャル、つまり試供品みたいな感じで出しておられた。旭化成さんはもともと電池メーカーではございませんので販売には非常に慎重だったようです。だけど、ソニーが先に製品を市販してから、慌てて翌年に旭化成さんと東芝さんと合弁会社をつくられて、A&Tバッテリーというんですけども、そこでこういう電池を量産されて市販化されたと聞いています。

この写真は吉野先生です。たまたま先月かな、電池討論会という学会が京都であって、吉野先生のご講演がございました。ちょっと行ってきたので、とりあえず記念写真みたいな感じです。私、個人的には吉野先生はそんなに面識がないというか、私は知っていますけど向こうは僕の名前は覚えてないだろうと思います。

今、このLIBTEC（リブテック）という形で私はいろいろお世話になっています。LIBTECというのは企業組合さんで、いろんな企業が、リチウム電池に関することをやっている企業さんがいっぱいあるんですけども、それが集まっている組合です。そのところが今、次世代の蓄電池開発ということで、経産省傘下のNEDOというところから資金をいただいて、より安全な電池をつくらうということで取り組んでおります。私もここら辺でちょろっとだけ拘わっております。今まで溶液だった電解質溶液の部分、この電解質溶液には有機溶媒を使っているんですけど、ここが燃えやすいので、そうじゃなくて全部が固体で構成して、全く溶液を使わない電池をつくらうとしていて、全固体電池という名前をつけているんですけど、それに取り組んでいる次第です。

大学としては、いろいろなところが参画しています。東京工業大学とか北海道大学とか九州大学とか入っているんですけども、私立の大学としては唯一、甲南だけが入っております。大学の宣伝もさせていただいたということで私の講演は終わらせていただきたいと思います。ありがとうございました。(拍手)

(反訳省略)

【稲田】 時間が参りました。非常にタイトな時間で申しわけないですが、先生方の話を十分聞きたいと思います。

さて、第2のセッションは、日本人がノーベル賞をとったということでみんな注目しているわけですが、実はもう1つの物理学賞ですね、ここでも大きなことがございます。そのあたりの展望を本学の教員の須佐先生からご講演いただきます。須佐先生の講演は非常にわかりやすく定評がございますので、請うご期待ということで、先生、じゃ、よろしくお願ひします。

【須佐】 どうもありがとうございます。ちょっとハードルを上げられて緊張してるんですけども、理工学部の須佐と申します。きょうは寒い中お集まりいただきましてありがとうございます。

きょうは今年のノーベル賞の解説ということでお題をいただいていたので、お話をさせていただきます。

物理学賞というのはここ七、八年ぐらいの間、大体、交代交代になっていまして、1つはいわゆる役に立つ物理学といいますか、物をつくったりとか、何か物の性質を調べるといような、さっきのリチウムイオン電池のような感じの研究と、ちょっと役に立つかどうかかわからないけれども非常に基本的な、宇宙の研究であったり、あるいは素粒子の研究であったりというのがもらうということになっていまして、今年は宇宙の番でしたので、何かこういうのがあるかなという予想はしていたんですけども、やっぱりこうなりました。

今年のノーベル賞をいただいた方は、ご存じの方も多と思いますけれどもこの3人の方々です。赤線を引いていますけれども、実は今年のノーベル賞は全然違う、僕らから言ったら全然違う内容で2組の先生方がもらわれたと。まず、左側がジェームズ・ピーブルス先生という方ですけども、この方はちょっと漠然としたタイトルをつけたのですが、現代宇宙論の理論的基礎の確立ということで、非常にたくさんの研究をされています。現代宇宙論で基本的な部分を構築する中の先頭にずっと立ってこられたという方ですね。もう1つは、太陽系外の惑星を発見したと。これはわかりやすいですね。太陽系の外の星、ほかの星があつて、その星の周りに惑星がいるということを実際に観測で確かめたという功績で、このお二人ですね、マイヨールさんとケローさんという方がノーベル賞をもらわれました。

この時間で2つの内容はなかなか難しいものがあるんですけども、ちょっと頑張っていきたいと思います。

まず最初のピーブルス先生なんですけど、ピーブルス先生といえば僕が最初に思い浮かぶのは教科書です。主に2つここに挙げましたけども、『Physical Cosmology』とか、『Principles of Physical Cosmology』という、こういう教科書を書かれました、僕が大学院生になったときにちょうどこの左側の新しいほうの教科書が出版された時期で、これを修士の1年生のゼミのときに、怖い先生に「これを読め」と言われて勉強したという記憶があります。こっちの古い本は、僕よりも世代が上の人々はほとんど全員勉強しているというぐらいの、非常にバイブルみたいな、そういう教科書を書かれた方で、ご自身の研究成果をまとめてこういう教科書を書かれたということで、そういうことも非常に有名な先生です。

具体的にどういうことをされてきたのかというと、いろいろあります。大きく分けて3つ書きました。宇宙背景放射及びその異方性の理論的予言ということを書かれました。これが多分一番大きいのではないかなと僕の中では思っています。それから、宇宙の構造形成ですね。銀河とか銀河団という大きな構造が宇宙の中にはあるんですけども、それがどうやって生まれて来るんですかということの理論的な基礎を築かれたと。それから、聞いたこともあると思うのですが、ダークマターとかダークエネルギーという、こういうものの基礎的な概念を実証的な形で推進したということで、特にダークマターの方の基礎づけを行ったという意味で非常に有名な仕事があります。

ということで、これを全部説明すると宇宙論の講義を1年分やらないといけないということになりますので、無理です。なので、きょうはちょっと絞ってこの宇宙背景放射のところの話させていただきたいなと思います。

とはいえ宇宙論の話なので、宇宙全体の話をおお体理解していかないとなかなか難しいということで、宇宙論の話をお少し最初にしたいと思ひます。昔の人は宇宙のことをどう思っていたのかというところ、いろいろな国の人があることを思っていたわけですね。これは須弥山という山。これは仏教の中ではこういう考え方だったわけですね。須弥山ってすごい高い山があつて、この下のほうに南贍部洲(なんえんぶしゅう)というのがあるんですけど、あそこに我々が住んでいる。日本はあの辺にあるらしいですね。それで、多分これはインドとヒマラヤの関係だと私は思ひますが、こういう国があると。これが小世界という1つの世界を構成して、1,000個集まって小千世界となつて、それがまた1,000個集まって中千世界で、大千世界で。これを全部合せて三千大千世界というふうに言うらしいですが、こういう世界観を持っていたんですね。階層的になっているところは(現代的に見ても)そんなに悪くないんですけど、現在ではやはり全然違ひます。

現在はどうなつているかというところ、いわゆるビッグバン宇宙論というもので宇宙全体のことがお理解されている。すなわち宇宙の中にはたくさんの銀河とか星とかがあるわけですが、それは未来永劫の昔から無限に広がつた宇宙の中におずっとあるというわけではなくて、何かあるときに始まつたと。そのことをビッグバンと呼びます。時間とともに宇宙が広がりながら、膨張していきながら、いろいろな構造が生まれてきた。その中に我々が住んでいますよというふうにお考えられています。これはそのコンピューターシミュレーションの様子を描いたものです。さっきの話と違ひるのは、やっぱり空間というだけじゃなくて、時間と空間が渾然一体となつた1つの概念としてこの宇宙論というのがあるということをおまず覚えておいていただきたいと思ひます。

その宇宙、広がっているという話なんですけれども、それを少しお話しします。これは皆さんもお知っていますよね、お月さんです。満月のお月様です。お月様の大きさに比べて、これぐらいのすごい小さい領域を選んできます。どうやって選んでくるかというところ、できるだけ何もないところ。できるだけ何の星もないし、何の銀河も見つかっていないような小さい領域を探してきます。そこをこういう、これはハッブル宇宙望遠鏡という望遠鏡ですけども、すごい望遠鏡でじつと見るんですね。長いこと、じつと見るということをおすると、何が見えるかというところ、この領域を拡大するとこんなふうにお写真が写ります。何か染みみたいなのがいっぱい、ぶわーとお写るんですが、これ実は全部銀河です。天の川です。我々の銀河系の外の天の川です。大体全宇宙で1,000億とかいう数の銀河があるのではないかと考えられています。

ちょっと拡大してみるとこんな感じで、確かにこの辺とか、何かいかにも銀河という感じの形をしているのがわかると思ひますが、この中で注意していただきたいんですが、銀河は大きく分けて2種類ありまして、丸っこいものとおこういう円盤みたいなものがあります。大体丸っこいものというところは色が赤いんです。どういうことかというところ、観測するとわかるんですが、非常に古い星ばかり集まっている。年寄りの星ばかり集まっている。このような星の集まりは赤くなります。

こういう円盤型の銀河というところは、これはまだたくさんガスを持っている銀河で、ガスを持っているということは次々若い星が生まれ続けている銀河なんですね。若い星というところは青く見えるので、そうすると、ちょっと色が白っぽく、青っぽくなるということになって、それで、こういう色とりどりの色になっています。しかしよく見ると、そんなことを言いつつこの辺とか見ると、これとかいかにも円盤なんだけど、何か赤いんですね、これとかもそうですね。必ずしも僕がお言ったことが正しくないように見える。

これはどういうことかというところ、ご存じの方も多しと思ひますが、いわゆるドップラー効果というのがお起きます。ドップラー効果というところは、ここに救急車の絵を描きましたが、波の性質です。救急車がお我々に近づいてくるときというところはちょっと音が高く聞こえるという経験がおありだと思ひますが、一方で、遠ざかるときにはちょっと音が低くなって聞こえます。これはどういうことかというところ、物理的に言うところ、音の波長が近づいてくるときには短くなるんですね。圧縮されて短くなります。遠ざかるときには波長が長くなる。波長が長くなる短くなるというのが、音の高低というふうにお人間は感じるようにできているわけですね。

さて、光も波なんですよ。音波と同じで波です。ということは、光でも同じことが起きます。もし銀河がお我々にすごい勢いで近づいてくると、光の波長が短くなると。もし銀河がお我々からすごい勢いで遠ざかっている

と、光の波長がちょっと長くなる。光の場合に波長が長くなると、色が変わります。音の高い低いじゃなくて色が変わって、赤くなります。波長が短くなると色が青くなるということになっています。

ということで、さっき赤い銀河がいっぱいいたということは、これはどういうことかということ、彼らは遠ざかっているんですね、我々から。しかもすさまじい勢いで遠ざかっています。光速の何%とかそんな感じで遠ざかっています。

これを最初に気づいたのはこのエドウィン・ハッブルという方で。私が生まれる前に亡くなっていますけれども、1953年。彼がハッブルの法則というのを見つけました。

このグラフは、横軸が銀河までの距離ですね。縦軸が銀河から遠ざかっている速さ。遠ざかっている速さというのは、赤くなりぐあいを見て速さを計算するわけです。この点一個一個が一個一個の銀河に対応するんですが、この点を見てこの線を引いたのかというのはなかなかすごいんですけど、引いたんですよ。引いて、銀河までの距離に比例した速さで銀河は遠ざかるんだと言ったわけですね。

これは現在どうなっているかということ、現在こうなってるんですよ。縦軸と横軸のスケールを見てもらったらわかるんですけど、さっき、同じ単位ですけど、1、2であったものが100、200、300とこうなっていますから、観測機器の進歩ですごく遠くを見られるようになったので、すごく遠くの銀河の観測ができると、こういうことになっているわけですね。確かに正しいと、ハッブルの法則は成り立ってるなということになったんですけど、実はここにハッブル先生が引いた線をこの上に引いてしまうとこんなところに来るんですよ。ずれてるんですけど、ハッブル先生が引いたので、ハッブルの法則です。

ということで我々からの距離に比例してその天体はその速さで遠ざかっていくと。遠ければ遠いほど、速く遠ざかっていくという性質があるんですね。

これを理解するのにどういうことを考えたらいいのだろうか。まず普通に考えたら、我々の住んでいる太陽系なり地球なり銀河系なりが宇宙の中の特別な躰にいると思うと、天動説みたいな感じなのでちょっとおかしいだろう。普通の場所にいるんだけど、こういうことが成り立っているというモデルはないんだろうかと考えたときに、実はその当時、同じ時代に発見されて出てきたアインシュタインの一般相対性理論というのがあったんですね。これによると、宇宙が完全に一様であると考え、宇宙というのはずっと広がり続けたり縮み続けたりするということが予言されていました。アインシュタイン自身はそれが気に入らなかったんで、そんなのはないと言って「宇宙項」というものを足すことにして、バランスを保っているのである、と言ったんだけど、あれは間違いだった、とこの法則が明らかになってからアインシュタインは言ったと言われています。

どういふふうを考えるのかということ、完全に一様な宇宙は、一様なまま広がっていくと考えると、この一個一個の星があるところが銀河のいるところだと思ってもらうと、お互いの間隔は時間がたつと広がっていきますよね。風船の上に点を打って、ふーっと吹いたみたいなイメージですね。こうすると、実は、ちょっと計算したらわかりますが、距離が遠ければ遠いほど速い速度で遠ざかっていきます。もし興味のある方はうちへ帰ってやってみられたらわかります。こういうモデルで、授業ではこれを計算して確かめますが、きょうはそこまでやりません。

ということで、何か宇宙は膨張しているぞという話になるのですが、当然この帰結として何が起きるかということ、今広がっているということは時間を逆行しにしたら縮むんです。縮むと何が起きるかということ、物が圧縮されると熱くなるんですよ。熱くなります。どこまでもどこまでも熱くなります。昔にさかのぼればさかのぼるほど、めちゃくちゃ熱くなります。そんな熱くなるのかということのを疑う人もいるかもしれないので、きょうは実験をしようということで実験道具を持ってきました。これを見たことある人も、結構理科の先生はみんな知っているんじゃないかなと思います。

これは試験管です。種も仕掛けありません。要するに、マジックをしようというのではなくて、実験をしようという話です。これは試験管です。種も仕掛けもない試験管。試験管の中に鼻紙を切って入れます。これ、鼻紙です。鼻紙を入れてですね。それで、ここをこういうピストン、Oリングがついているんですけど、このピス

トンでぎゅっと押すんですね。圧縮されます。どうなるでしょうかというのをちょっとやってみます。

これが一番疑わしいんですけど、別に単に支えるためのガイドでありまして、何も不正はありません。こうとめて、この窓を見ておいてください。じゃ、失礼して。力が入らないと失敗するんですよ、これ。失敗したら目も当てられないので。行きます。見えますかね、これ。ここの窓のところ。後ろの人、大丈夫ですか。行きます。大丈夫かな。

(ピストンを押す)

(「おおっ」の声あり)

【須佐】 よかった、よかった。

(「マジックだ」の声あり)

【須佐】 いや、マジックじゃないですよ、これ。誰がやってもできます。うそだと思う人は後でやっていただいたら大丈夫です。

ということで、物は圧縮されると温度が上がるんですね。これがどれだけ温度が上がるかとかいうのは、ほんとうに高校3年生とか大学初年次ぐらいの物理の知識で計算すれば、すぐ、ああ、なるほどなとわかるということになっているんですけど、大体400℃とかそれぐらいまで温度が上がります。

ということで、宇宙も宇宙全体でこれをやるわけですね。それは紙が燃えるところじゃない。本当にどれだけでも縮んでいくわけですから、圧縮率もすごいことになるわけなので、最後には要するに全てのものが溶けてばらばらになります。例えば原子も、原子というのは原子核と電子がいるわけですけど、それは剥ぎ取られちゃいます。エネルギーが高くなる。原子核自身も壊れていきますし、その原子核の中を構成している核子も溶けていきます。ということで、ほんとうに全部溶けてスープみたいになったような宇宙に、最終にならなきゃいけないよなということになったわけですね。宇宙が膨張しているんだから、逆回しすると。しかも今の膨張しているスピードを考えたら、何年前ぐらいから始まったんだというのがわかるわけですよ、大体ね。計算できます。それが計算すると大体100億年とかいう昔だということが、結構これは早い段階から知られていまして、138億年とかすごい数字にきちっとなったのは最近です。

これがそのビッグバン宇宙論というものの基本的なフレームワークです。証拠はあるのかいと。もちろん膨張しているという証拠はあるわけです。それは今膨張してるだけだろうと。昔はわからない。熱かったのか、本当に？ということになるわけです。その辺でさっきのピーブルス先生の活躍があったわけですね。

宇宙背景放射という話をしたんですけど、それは証拠の1つなんです。宇宙のごく初期というのは非常に熱い状態ですから、物質もあるんですけど光もあるんですね。光も大量にあります。物質がお互いに相互作用しながら、吸ったり吐いたり散乱したりしながら渾然一体となった、物理では熱平衡状態という難しい言葉を言うんですけど、いつもエネルギーをやりとりしているような、そういう状態です。一様な状態。これが初期の宇宙で、光が満ちあふれている状態。

それで、ちょっと想像してほしいんですけど、初期の宇宙にいますと思ってください、今、自分が。座っているんです、こうやってね。目をつぶって、周りに光が飛んでいるんだと思ってください。いいですかね。宇宙は膨張していきます。そうすると、膨張していくので数が減っていきます、周りの光子の数が薄まっていきます。だんだんだんだん薄まっていく。薄まって行って現在まで来るんですけど、現在まで来てもなくちゃいけないんですよ。十分遠くからやってくる光が必ずいて、我々は今当たっているはずですよ。昔にそんな光があったのなら。この光を宇宙マイクロ波背景放射と呼んでいます。

これを見つけたんですよ。見つけたのはピーブルス先生じゃなくてペンジラスさんとウイルソンさんという方。彼らはベル研究所という電話会社ですね。そのベル研究所というのは非常に基礎的なことをずっと研究している研究所で、彼らはパラボラアンテナの雑音をとるのに一生懸命頑張っていた。雑音をとるのに頑張っていたんだけど、何をどうやっても消えないと。これは何だとなっていたときに、プリンストン大学にいるピーブルス先生がいるグループの人々が、いや、それは宇宙の初期に背景放射というのがつくられていて、それは現在まで

来ているはずだと、その予言をしたわけですね。これは間違いなくそうだということになって、アメリカ天文学会誌に、1965年というのはこれも私が生まれる前ですけど、ちょうど並んで2つの論文が同時に掲載されました。なぜか実験のほうの論文だけがノーベル賞に最初になりました。これが1978年のノーベル賞になったということです。なので、ピーブルス先生はそもそもの理論的な予言のところで貢献をされています。

そのときの光の、どういう光がやってくるのかということなんですけど、まずマイクロ波といったら何かというと、宇宙のごく初期というのはすごく熱いんですけど、宇宙が膨張していく中を光が伝播してくるので波長が引き伸ばされるんですね。ということは、もともとすごい高温の紫外線とかいった光なんですけど、それがちょうどマイクロ波、マイクロ波というのは電子レンジぐらいの波長ですけど、まで引き伸ばされて我々のところに届く。しかもごく初期の光というのは最初熱平衡状態にあったといいましたから、熱平衡状態になっているときの光というのは、黒体放射というスペクトルをもっていなきゃいけないと、これはわかっています。実際観測するとびっくりするぐらいきれいな黒体放射なんですね。ということで、あらゆる証拠から、これはきっとビッグバンのときの光を見ているんだというふうに考えたわけです。

この背景放射についてもうちよっと説明していきます。では、この宇宙初期の背景放射は実際、宇宙が始まってどれぐらいの時代の光なのか。例えば始まった瞬間だったらものすごく高エネルギーです。だけど、もうちょっと後の時代に来たものなのかとか、その辺を説明したいのですが、それを理解するには宇宙の晴れ上がりということをちょっと説明しないとイケません。

これは何かというと、宇宙って膨張していきます。膨張していくんですが、膨張していくのでだんだん温度が下がっていきます。下がっていくと、宇宙のごく初期には、さっきも言いましたけども原子というのが原子核と電子に分かれてばらばらに存在しているんですけども、温度が下がっていくと結合するんですね。途中で中性化します。

その絵がこれで、横軸は時間軸で、水素原子ばかりと思ってください。ある時期、昔は電子と原子核がばらばらになっている。つまり電荷がむき出しになったような状態。ある時期よりも後の宇宙というのは中性化しているということになります。そうすると、その中を光が飛ぶとどうなるのかということ、この黄色い丸が光だと思ってください。僕が適当にこう描いたんですけど、こんな感じというイメージ図ですね。この辺を飛んでいるときにはガクガクするんですよ。何故かということ、光というのは電気を帯びているものと相互作用するので、電荷がむき出しになっていますから散乱されます。ここを通り抜けて、この時代よりも後まで光がやってくると、それは世の中のものが全部中性になっているので、ほとんどのものと相互作用することなく、そのまますーっと真っすぐ飛んでくる。

そうすると、ちょっとこれは難しい話ですけども、例えばこの辺に誰か居て、懐中電灯を照らした。そうすると、こっちの現代の宇宙で我々はその懐中電灯を見たらどうなるかということ、これ、散乱されますから、ブワッと広がりますよね。すりガラスの向こうのライトのようなもので、はっきり見えない。広がって我々まで届いています。だけど、この辺で誰か懐中電灯をつけたら、超強力でない無理だけでも、超強力な懐中電灯なら点に見えるわけですね。目が十分よければ点に見えるわけです。

何を意味しているかということ、この宇宙中性化、これを晴れ上がりというんですけど、晴れ上がりの時期よりも前の光の情報というのは消されてしまいます。ここに何かへのへのもへじと光で書いて、ライトで書いても見えないです。へのへのもへじが見えない。だけど、ここにへのへのもへじと書いたら見えるという、そういうことなんです。なので、結局のところ、我々がさっき言った背景放射で見ている光というのはどこから来る光を見ているかということ、ちょうどここですよ。最後に散乱された光が我々のところに届くという様子を見ているはずですよ。ここを最終散乱面といいますけど、この光の様子を我々は見えています。

ところが、そうかといって納得するわけにいかなくなって困ったことがありました。どういうことかということ、背景放射を観測すると、どの方向から来る光も完璧に同じです。違いが全くない。完全に等方な光がやってきます。それは何を意味するかということ、宇宙が始まったときに、宇宙が始まってこの最終散乱面ぐらいの時代に、

宇宙は完璧に等方だ、一様で等方だったということを意味しているわけです。

それはちょっと具合が悪くて、何故かという、我々は、今ここに存在しています。地球もあるし、太陽もあるし、銀河系もあるし、今の宇宙は全然一様じゃありません。凸凹もいいところなわけです。ものすごい密度の差があって、全然一様じゃありません。ということは、宇宙が始まったときに何か種が仕込まれていなかったら具合が悪いわけです。こっちから来る光のほうがちよっと強いとか、こっちから来る光がちよっと弱いとか、そういう情報が欲しいわけです。それがなかったら、みんな安心できないわけですよ。

ピーブルス先生はそこでまた大活躍でありまして、1970年と82年の論文で、理論的に、これこれこういう理由でこの程度の揺らぎがあるべきだということを予言したんですね。それに基づいて、大分後になりますけれども、これはちょうど私が大学院生になった年なんですけど、COBE衛星が宇宙のこの辺から来る光はちよっと強いとか、この辺から来る光はちよっと弱いとかいうのを初めて発見した。すごい微妙な違いです。さっきの温度でいうと10万分の1ぐらいの差があるということも発見して、それで2006年に彼らがこの衛星観測の貢献でノーベル賞をもらっています。

現在どうなっているかという、現在はプランク衛星というのはこの2世代後の衛星でありまして、こうなっています。大分様子が違いますよね。目がよくなっているんですね。衛星の角度を細かく見る能力が上がっています。10万分の1というのは変わらないんですけど、これぐらいの構造が実際に見つかっています。

そして、ピーブルス先生の寄与で一番大きいのは、この揺らぎの波長ごとの強度を予言したということだと思います。これは今のプランク衛星の観測した揺らぎで、光の強度の差のマップですが、ちょっとここが難しいんですけど、物理学ではしばしば波の重ね合わせでこういうのを表現します。分布はランダムなんですけど、ランダムなものを長い波長の波と細かい波長の波の重ね合わせで考えるわけです。たとえば細かい点々がいっぱいある場合には、細かい波長の波のほう優勢になるわけですね。細かい波長の波がどれだけの強さでまじっていますかというのを描いたというのがこの図で、これは詳細を理解するのはなかなか難しいのでいいんですけど、横軸は角度で、ここは角度ですね。全天の角度をあらわして、こういうフィーチャーを持っているということが解析するとわかります。

驚くべきことは、この赤い点が観測データです。赤い点が観測データで、緑の線が理論曲線です。宇宙論の理論が、背景放射のわずかな揺らぎをびっくりするぐらい、これは本当にびっくりするぐらいちゃんと説明するんですね。ビシッと予言できるという、この理論的な基礎を築いたのがピーブルス先生の業績ということになります。

では、ピーブルス先生の話はこのぐらいにして、マイヨールさんとケローさんの話に行きます。

これはわかりやすい話で、太陽系の外に惑星を発見したという、そういう話であります。古来、こういう我々の世界以外の世界が世の中にあるということを何となく妄想して、夢想してSFをたくさんつくってきたわけなんですけど、これもSFの1つですが、どうやって見つけたかという、これはわりと簡単でして、星のふらつきを探しました。

これはどういうことかという、これがどこかの星だと思ってください。どこかにいる星。周りに別の星が回っていると。そうすると、物理学によると2つの星がお互いの重力を及ぼしながら回っていると、お互いの重心の周りをくるくる回るんですね。お互いの重心の周りを回ります。もし同じぐらいの太陽が2つある、これを連星といいますけど、連星の場合だったらちょうど真ん中をお互いがぐるぐる周る。では一方が木星だったら、ちよっと大き目の木星がいたとしましょう。太陽の周りを回ると、こっちの太陽はほとんど動かない。何故かという、重心がほとんど太陽のところにあるので動かないんですけど、太陽も一応動きます。その木星の周期に合わせて動きます。この動きを探そうという作戦です。これが実際ふらふらしているというのを観測で発見してやれば、見えないけれども木星が回っているはずだという、そういうことを考えたんですね。

この動きをどうやって見るんですかという、実際望遠鏡で横に動くのを見るのはなかなか、最近はこちらでできるようになっているんですけど、難しいので、さっきのドップラー効果を使うんです。ドップラー効果とい

うのは、要するに我々が望遠鏡を見ていると、例えば木星があって、太陽があつてと、こうなります。太陽だけ見えているんですけど、太陽がこっちを向いてきているときにはちょっと青くなるんですね。光が青くなります。それで、逆に向こうを向いているときにはちょっと赤くなると。この赤くなり方、青くなり方から速度を測定します。それを実際測定したよというのがこれで、速度の変化を縦軸に置いて、横軸に時間をとっている図ですが、きれいにこういうサインカーブみたいなプロットが出てきたということで、見つけたという話であります。

見つけたということもさることながら、この発見で驚くべきだったのは、思いもよらないものを見つけたということです。どういう意味かということ、ホットジュピターという名前と呼ばれているのですが、地球の軌道の5%ぐらいのところを回っている木星の半分ぐらいの質量の惑星が見つかりました。このような重い惑星というのは我々の地球よりもずっとずっと外側の軌道をぐるぐる回っているものだというふうに通常思われていたんですね。何かみんな信じてたんだけど、実はそういうんじゃないのが最初に見つかりました。

これは理由があつて、なぜ見つかったかということ、重い惑星が近くにいたらよりふらふらするんですよね、太陽が。だから、木星みたいな惑星が、すごく近所にいるものが最初に見つかるのは当たり前で、観測ししやすいわけです。それで見つかったということで、惑星の形成理論のほうにも大きなインパクトがあつて、どうやってそんなものをつくるんだと言って、ワッと理論が盛り上がっていったということになります。

これは最初の1発なんですけど、ノーベル賞なんですけど、現在どうなっているかということ、その後、ずっと観測が進みました。こうだったらいけるのだということ、みんなが調べたんですね。調べに調べて、いろんな別の方法も見つかつて、ここ、点が今打つてありますけど、横軸が太陽からの距離ですね。太陽というか、星からの距離ですね。ちょっと変なグラフになっていまして、ここが太陽からの距離の、単位がここはちょうど地球がいる場所。地球と太陽の距離。その10倍、100倍、これは10分の1、100分の1と。地球はこの辺にいます。縦軸は重さですね。どういう重さの星なんですかということでありまして、木星の質量が1として、地球はこれぐらい、300分の1ぐらいということで、ここに赤い点、青い点がいっぱいあるんですけど、これは全部我々の系外で見つかった惑星です。3000個ぐらい、既に我々は太陽系の外に惑星を見つけているんですね。こういう別の世界を探すという基盤を築いたという功績が非常に大きいというふうに考えられて、ノーベル賞をとられたということでもあります。

最後に、ちょっと時間が超過してはいますが、こういう話をすると、大体こういう話をしたほうがみんな喜ぶので、宇宙人の話をします。宇宙人がいるのかとよく聞かれるんですけど、僕はいると思います、正味の話ね。地球まで飛んできてるかって、いや、それはないでしょうと思うんだけど、いると思います。そのいると思うという根拠を話したいんですが、それほどちゃんとした話ではありません。

まず、我々の住んでいる天の川に何個知的生命が住んでいる星があるんだろうかということ、計算した人がいます。ドレイクの公式という公式で計算した人がいるんですけど、これは僕が子供のときからあります。

どういう計算をするかということ、まず、銀河の中にある太陽みたいな星の数から始めます。大体2,000億個ぐらい、これはわかっています。

次に、そのうち惑星を持つ太陽の割合、これは大体1です。これもわかっています。みんな持っています。ほとんど持っていると考えべきだというのが現代の理解です。

次、そのうち地球のような惑星を持っている太陽の割合。地球のような惑星というのは、つまり生命が住めるような、ハビタブルプラネットといいますけど、住めるような惑星を持っている割合、これはちょっとわからないので、わからんから100分の1だということで100分の1にします。

次、そのうち実際に生命が誕生した割合という、これもちょっとわかりません。地球みたいな惑星があつたとき、そこで本当に生命が生まれるのかと言われたらそれはわからないので、100分の1と。

次、そのうち生命が誕生したけれど、アメーバだったらおもしろくないじゃないですか。知的生命までいくという割合がわからない。これは100分の1。

次、そのうち通信技術を持たないと我々と話ができませんので、電波望遠鏡を持っているという割合、これが1

00分の1と。

それで、最後に出てくるのが、その惑星の寿命のうち通信技術を持つ期間の割合。これはちょっと難しいんですが、どういうことかという、我々が電波望遠鏡を発明してから100年もたっていないわけですね。もし、もしですよ、あした、〇〇〇がそこら中にミサイルを撃ちまくったと。それで、△△△△も撃ちまくったと。□□□□も、俺もまぜろと言って撃ちまくったとしますよ。そうすると、世界は滅亡します。人類はいなくなるんですよね。ということは、我々は一応知的生命なんですけど、知的生命が電波望遠鏡を持っていた期間って100年なんですか。100年です。それに対して、惑星の寿命というのが大体今、地球が始まって46億年で、太陽の寿命があと50億年ぐらいですから、本来ずっと人間が生きていけば50億年ぐらい残りあったんだけど、それが100年しかなかったとなったらすごい短いわけですよ。そんなことはなくて、十分我々賢いと、あるいは宇宙の知的生命は十分賢いというふうに思うと、ここのファクターは100億分の残りの50億年になりますから0.5ということで、そんなに減りません。

計算するとどうなるかという、1000個ぐらいいるということになります。すごいいいかげんな計算ですけど、何かそれらしいですよ。それらしいと思う理由は、ここ、適当に100分の1と置いたんですけど、実はこれ、最近一部わかってきました。住めるような星がどのぐらいあるのかという割合がわかってきました。これはそういうプロジェクトがあって一生懸命調べているんですけど、それによると、さっきのファクターというのは100分の1と置きましたけど、実際見つかっている惑星に対して55個ぐらい実際に地球と同じような環境をつくれる星があるということがわかっていますので、これを計算すると0.02程度になるのでさっきより多いですね、むしろね。だから、意外にいけます。だけど、その上でほんとうに生命が生まれるんですかって、これはちょっとわからないので、ちょっとお遊びみたいなのところもありますけども、「いるんですか」と言われたら、「それは普通いるでしょう」というふうに思うのが多分僕は自然かなというふうに思っています。

ということで、大分適当な話で申しわけなかったですけども、これで終わりにします。ありがとうございました。(拍手)

【稲田】 須佐先生、ありがとうございました。ほんとうに時間制約のある中に物理学賞の2つの領域の話と、最後、とてもおもしろい話をしていただきました。皆さん、あれでしたら孫にもこういう話をしておじいちゃんやおばあちゃんにはきょうは知的な勉強をしてきたということで自慢していただけたらいいと思います。

ちょうど時間が参りましたので、あと、もし質問等々がございましたら個別にお声がけしていただけたらいいと思いますので、本日はほんとうに長い間、ありがとうございました。こういう計画をわかりやすくまた伝えるということをやってまいりますので、また今後ともよろしく願いいたします。本日はありがとうございました。

(拍手)