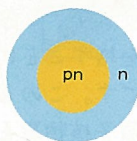


理研ニュース

理化学研究所

中性子スキンと中性子ハローの発見

中性子星の中だけに存在すると考えられていた
中性子物質の研究の可能性を開く



すべての物質の中心にある原子核は、陽子と中性子の混合物です。ところが原子核内の中性子の数が陽子の数より多いときには、中性子が表面付近に染みだし中性子だけの物質層が出来るという可能性が1950年代に指摘されました。（これを中性子の皮と呼びます。）ところが安定な核では中性子の皮は非常に薄くて、その存在は確認されませんでした。例えば ^{208}Pb （鉛208）核は陽子数82と中性子数126と中性子が陽子に比べて44も多いのに、中性子の皮の厚さは0.1fm以下（1fmは 10^{-13}cm で ^{208}Pb の直径は約8fm）としか分かりませんでした。不安定な原子核には中性子と陽子数の比がもっと多いものがありますが、人工的に作られる不安定な原子核では中性子や陽子の分布を測定することは数年前までは不可能でしたので、中性子の皮の情報は得られていませんでした。

リアック研究室では、人工的に作った短寿命（100ns位まで可能）の不安定核を反応させる“不

安定核ビーム”の方法を開発し、理研リングサイクロトロン及び米国ローレンス・バークレー研究所のベバラックを用いて不安定核の半径や密度分布の実験研究を進めてきました。また理論的にも不安定核は注目をあつめるようになり、都立大学、新潟大学、東京大学等のグループとも共同で研究を進めています。こうしたなかで ^6He 核（陽子2コ、中性子4コ、半減期0.8秒） ^8He 核（陽子2コ、中性子6コ、半減期0.1秒）を用いた反応の測定を行い、これを都立大の理論グループと共同で解析をした結果、これらの原子核の表面付近には中性子だけでできた層が1fm程度の厚さで存在することが確認されました。中心部にある陽子と中性子の混ざった部分の半径が1.7fmであり、これらの核の黄身と白身のある卵のようになっていることが分かりました。

そして、これをもとにより詳しい理論的計算をすると、このような分厚い中性子の皮は中性子過剰の不安定核では常に存在し、中性子のみの物質層

が多くの原子核の表面にあると予測されました。

また、

^{11}Li 核(陽子3コ、中性子8コ、半減期8ミリ秒)

^{11}Be 核(陽子4コ、中性子7コ、半減期14ミリ秒)

^{14}Be 核(陽子4コ、中性子10コ、半減期1ミリ秒)

^{17}B 核(陽子5コ、中性子12コ、半減期20ミリ秒)

などの核は半径が異常に大きく、中性子が薄い霧のようになって通常の核半径の数倍のところまで広がっていることが分かりました。

中性子だけで出来た物質はこれまで研究対象となりえませんでした。このような中性子のみの物質層や霧の発見により新しい研究対象として登場したことになります。少し詳しく述べてみましょう。

はじめに

原子核はすべての物質を構成している原子の中心にあって、陽子と中性子の集合体です。例えば ^4He 核(ヘリウム-4)は陽子2コと中性子が2コ、 ^{208}Pb 核(鉛-208)は陽子82コと中性子126コできています。この陽子と中性子の数の組み合わせにより原子核の性質はきまります。図1に示すものが元素の周期表の原子核版といえる核図表です。図の横軸は中性子数、縦軸は陽子数です。図中黒ぬりの正方形が地上に存在する原子核で約270種あります。これらは自然に崩壊することはないので安定核と呼ばれます。その他にも図の線に囲まれた範囲で6000種の原子核の存在が予測されていますが、これまでに発見されているのはこのうち2000種程度です。~270種の安定核以外は、自然にアルファ線やベータ線を出したり核分裂を起こしたりして崩壊するので不安定核と呼ばれます。

原子核の構造は加速イオンを衝突させ反応を起こして研究します。数年前までは加速イオンが安定核に限られていたため安定核の性質はよく研究されましたが不安定な核については反応を起こすことができずほとんど構造が知られていませんでした。

私たちのグループは米国ローレンス・バークレー研究所との共同研究で不安定核による反応を研

究する手法を開発しました。この方法は現在は理研のリングサイクロトロンでさらに発展し、精力的な研究が進められるようになりました。また世界的にも装置が建設され、研究が急激に広がっています。この方法で陽子に比べて中性子が多い極限状態にある(図の右の線の近くの)原子核を調べたところ、 ^{11}Li や ^{11}Be 核では中性子ハロー(原子核の周りに薄く霧のように中性子が広がっている状態)、 ^6He 、 ^8He 核では中性子スキンが存在することを発見できたのです。

核物質

すでに述べたように原子核は陽子と中性子の集合体で、この2種の粒子が一樣に混合されているものが安定です。図1からも分かるように原子番号の小さいものでは陽子数と中性子数がほぼ等しいところに安定な原子核があります。そして原子番号が大きくなるとこの関係は少しだけずれて、中性子の数が少し多い方が安定になります。これは陽子の電荷同士の反発力を中性子を増すことによって和らげてつりあっているからです。このように陽子と中性子が混合した物質を原子核物質と呼びこの性質を知ることが原子核物理学の重要なテーマですし、さらにこの性質は超新星が爆発できるかどうかの分け目を決めるものとなっています。

一方、陽子だけ又は中性子だけが2コ以上集合してできた物質は地上では見つかりません。唯一、宇宙の遠くにある中性子星が中性子だけでできており、その性質は種々の学問的、想像的興味を与えています。しかしこの物質の地上での研究は上の理由により全く不可能でした。

人類は遠くにある中性子物質に想像を馳せるだけで、それを自分達の手で触れる事は出来ないのでしょうか。

中性子の皮

失望

^{208}Pb 核は前に記したように中性子の数が陽子

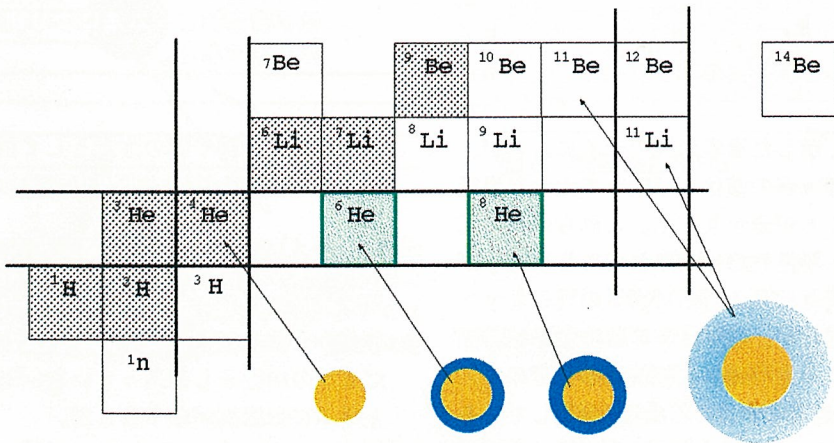
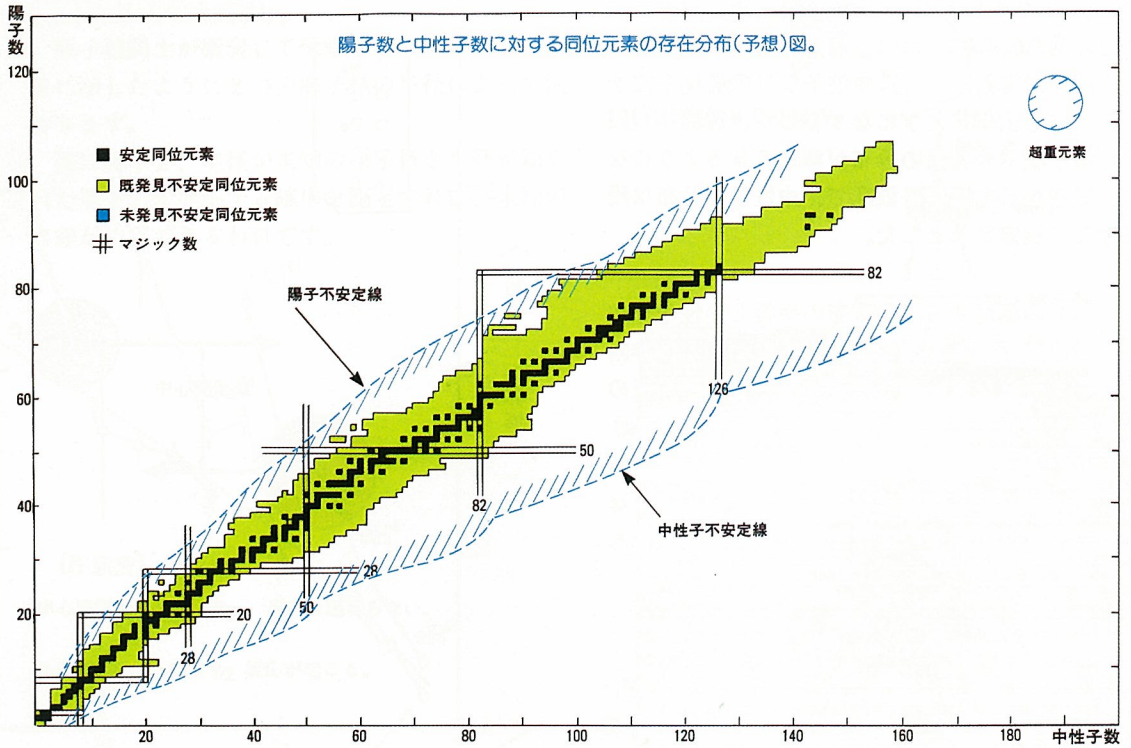


図1 原子核図表。全体(上図)と今回研究対象となったヘリウム付近の拡大図

の1.5倍もあります。そのため中性子の一部が表面にはみ出して中性子だけの層を作るのではないかと期待が持たれ、この中性子だけの層は中性子スキンと呼ばれるようになりました。1950年代以降は原子核中の物質の分布が測定できるようになり、陽子の分布は電子散乱で、中性子の分布は陽子散乱で測定されました。

これらの測定から陽子分布の半径と中性子分布の半径の差が詳しく調べられましたが、差は非常に小さく有意な違いは在りませんでした。最近の測定でもこの半径差は0.1fm以下(1fmは 10^{-13} cm)であり、 ^{208}Pb 核の半径4fmと比べて無視できるほどです。他の安定な原子核についても同じようなもので、厚い中性子の皮はついに発見されませんでした。

不安定核と中性子ハロー

安定な原子核では陽子と中性子の比はせいぜい1:1.5までですが、不安定核では陽子と中性子の比が1:3までのものがあります。例えば ^8He です。そのような顕著な例として ^{11}Li 核を調べたところ特異な構造を示すことが見つかりました。図2に不安定核ビームの方法を用いて決定した種々の核の半径を示しました。横軸は核の質量数で縦軸が半径です。また同じ元素のアイソトープは直線につながれています。この図を見るとほとんどの核の半径は点線で示した通常の値の近くにあるが、 ^{11}Li 、 ^{11}Be 、 ^{14}Be 等の核はとび離れて大きな半径を持っていることが分かります。これらの核の反応を調べると、中性子だけが取れてしまう確率が非常に大きく例えば ^{11}Li 核では3コの陽子と6コの中性子は共通だが、残りの2コの中性子は仲間はずれとなって薄く(通常の核物質の密度の1/100位)、広く(通常の半径の4倍位)分布していることが分かりました。これは中性子ハローと呼ばれるようになり、最後の2コの中性子は非常に弱く束縛されているためであると理解されています。 ^{11}Be ではリングサイクロトロンの特徴をいかして、反応確率のエネルギー依存性を見ることにより、やはり中性子ハローが確認されました。中性子ハ

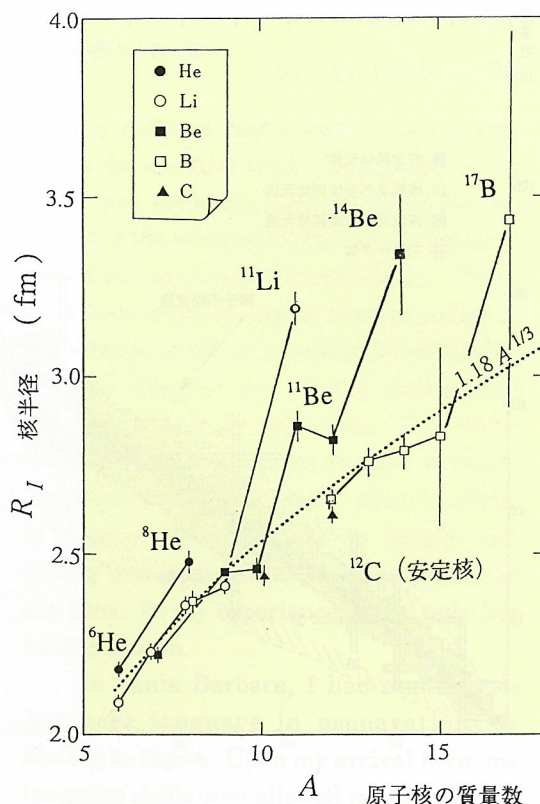


図2 核半径。このうち矢印で示したものは安定核で以前から半径が知られていたがその他は不安定核ビーム法により初めて決定されたものである。

ローは新しい原子核の形態として注目を集め、より詳しい性質の研究が世界中で進められています。

この中性子ハローは名の示すとうり、中性子だけで構成されていて中性子物質の存在のはしりとなりました。ただ密度が低く、またその中にはただ2コの中性子しか入っていないため中性子物質と呼ぶには抵抗がありました。

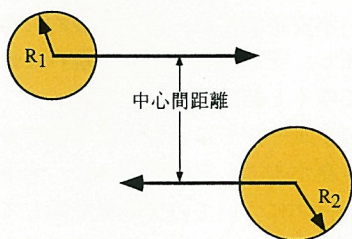
中性子スキンの登場

そして研究を ^6He 、 ^8He に進めた結果、最近になって厚い中性子スキンが発見できたのです。その方法についても少し詳しく述べてみましょう。

実験法と厚い皮の発見

原子核同士が衝突して反応を起こす確率は、図3に示したように2つの原子核の半径によって決まります。

逆に言うと、半径が未知の原子核と半径が知られた原子核が反応する確率を測定すれば、未知の半径が決定できるわけです。



中心間距離 $> R_1 + R_2$ 反応は起こらない。

中心間距離 $< R_1 + R_2$ 反応が起こる。

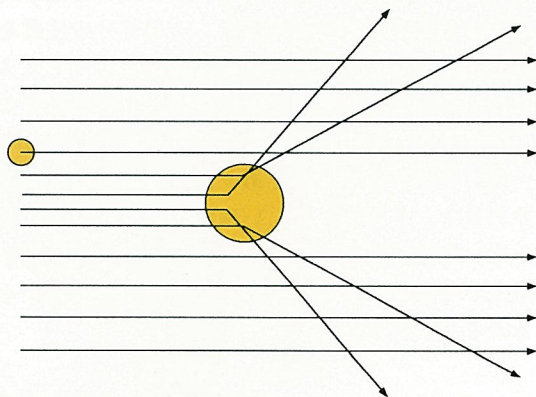


図3 二つの原子核が衝突する場合(上図)、半径の和が中心間距離より大きいと反応が起こる。下図のように散乱したものとそうでないものは区別して測定すれば、半径が決定できる。

この実験ではローレンス・バークレー研究所にある重イオン加速器ベバラックで核子当り800MeVに加速した(光速の0.7倍) ^{12}C を、ベリウムに衝突させて不安定核 ^6He 、 ^8He を作ります。これをさらに ^{12}C の標的に衝突させて反応確率の測定を行いました。(図4)そして比較のために安定なヘリウ

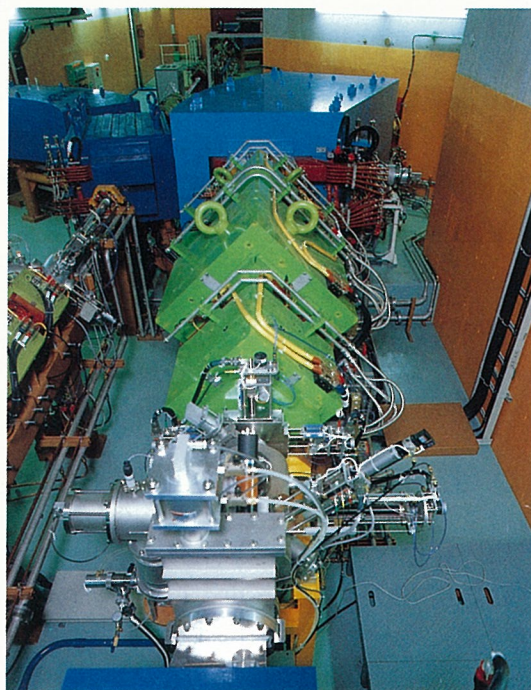
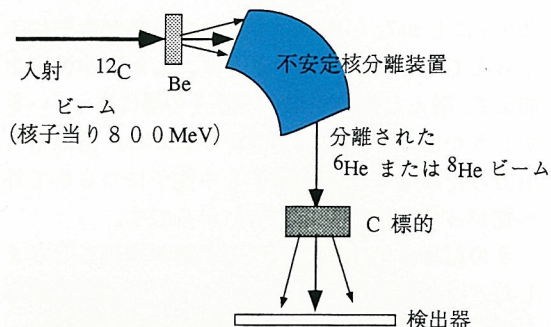


図4 実験装置RIPS

ムのアイソトープ ^4He についても同様の測定を行いました。 ^{12}C の半径は知られていたのをを使ってそれぞれの半径は

$$^4\text{Heは } 1.63 \pm 0.03\text{fm}$$

$$^6\text{Heは } 2.33 \pm 0.04\text{fm}$$

$$^8\text{Heは } 2.49 \pm 0.04\text{fm}$$

と決定できました。 ^4He に2コの中性子を加えて ^6He になると半径がぐんと大きくなっていることが分かります。また ^8He についても ^4He よりはるかに大きな半径となっています。普通2倍の量の物質を使って球をつくると、その半径は1.26倍(=

$2^{1/3}$)にしかならないはずだから半径が急激にふくらんでいることがわかります。しかし中性子を加えて、増えた部分が全部中性子の層になっているかどうかはこれだけではわかりません。何故なら引力のため中にあった陽子も中性子につられて外へ拡がっているかも知れないからです。

そのためより詳しい反応の観測が必要となりました。つぎに反応で ${}^6\text{He}$ がこわれて ${}^4\text{He}$ が残る確率を別に測定しました。

すると、

$$\sigma({}^6\text{He}) - \sigma({}^4\text{He}) = \sigma({}^6\text{He} \rightarrow {}^4\text{He})$$

となる関係が満たされることがわかりました。

ここで、

$\sigma({}^6\text{He})$ は ${}^6\text{He}$ が反応するすべての確率

$\sigma({}^4\text{He})$ は ${}^4\text{He}$ が反応するすべての確率

$\sigma({}^6\text{He} \rightarrow {}^4\text{He})$ は ${}^6\text{He}$ の2中性子がはずれて ${}^4\text{He}$ になる確率です。

この関係が満たされれば ${}^6\text{He}$ の中に ${}^4\text{He}$ がそのままの形で居て残りの中性子はその周りを回っていることの証明になると理論的に新潟大学のグループにより示されました。

又 ${}^8\text{He}$ も同様な測定により同じように ${}^4\text{He}$ 核がそのままの形で存在することが証明されました。

すなわち ${}^6\text{He}$ や ${}^8\text{He}$ 核の中心にある ${}^4\text{He}$ 核はごく通常の核物質(陽子2コ、中性子2コ)ですが、その周りの部分は中性子だけでできていることになります。図1の黄色の部分に示したように ${}^6\text{He}$ は半径 $2.56 \pm 0.04\text{fm}$ 、 ${}^8\text{He}$ は半径 $2.69 \pm 0.04\text{fm}$ の中性子物質の中に、それぞれ半径 1.6fm の通常の核

物質が浮かんでいるものであることが結論されたのです。

将来に向けて

このように中性子ハローや厚い中性子スキンの存在が確認されましたが、これはほかにも存在するのでしょうか？

ブラジルからの留学生を中心とし、都立大研究者とも協力し理論的検討を進めたところ、中性子が陽子に比べて多い不安定核では、ごく一般的に中性子スキンが存在し、安定な原子核から離れるほど皮は厚くなってゆくと結論されました。

そのため我々のグループではさらに他の核でも中性子スキンが存在することを示すために、ナトリウムのアイソトープについての実験を計画しています。ナトリウムのアイソトープでは陽子分布の半径がすでに測定されているため、中性子の半径を決めることで明確に結論を出すことができるからです。

中性子の多い不安定核では表面付近に中性子物質の層があることが確認され、この部分の性質を詳しく知ることが今後の重要な課題となってきました。このような層の生成の機構、この層自身の研究はまさしく中性子物質の性質を地上で知る唯一の手段を与えるものであり、今後の発展が期待されます。さらに、詳しい理解が進めば、手の届かない中性子星の特質を知る上での重要な情報を地上での実験により直接知ることができる日もくるかもしれません。

リニャック研究室

主任研究員 谷畑 勇夫



研究グループメンバー

後列中央は筆者とロシアのボス

日本 11人

ロシア 4人

ブラジル 2人(女性)

(韓国 1人)

理研シンポジウム（1月）

テ　ー　マ

担当研究室

開催日

第8回「生命現象のダイナミクス」 －生体における脂質の機能・構造研究の最近の発展－	生物物理研究室	1 / 8
生物科学とシンクロトン放射 III －生物系XAFSを中心として－	生体物理化学研究室	1 / 8
原子分子過程理論	原子物理研究室	1/13,14
リングサイクロトロンによる物性材料・原子物理・核化学・ 生物医学の研究	原子物理研究室	1 / 18
第11回「ライフサイエンスシンポジウム」 ウイルスと細胞、個体との相互作用－動物モデル系における解析－	安全評価研究室	1 / 20
サイエンティフィックアートの世界	結晶学研究室 電子計算機室	1/27~29

スポットニュース

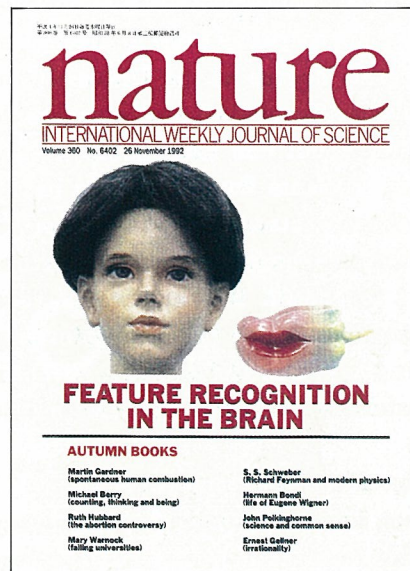
「nature」の表紙を飾った“脳の研究”

物体を認識したり想像するのはどのような脳のメカニズムか。11月26日発行の英国科学誌「nature」に、この解明につながるフロンティア研究システム・思考電流研究チーム（藤田、田中、伊藤、程）の研究結果が掲載された。

この成果を端的に表現したのが表紙の絵。少女の顔を見ると赤い唇に反応する細胞があり、ピーマンのくぼみにも反応する。このように中程度に複雑な部分特徴を検出する細胞が10個ほど集って、脳の中では物体像が表わされているという。

今回の発見は認識の脳内メカニズム解明に大きな一歩を記したほか、新たな情報処理システムの開発にも応用される可能性がある。

（明年2月号に研究紹介予定）





Diversity in Weather

SCIENCE BRINGS

by Jerome P. Lillis

When I was first asked to write an article for the Riken News I was at a loss as to what to write about. My impression of Japan was quite muddled, so I sat and thought about what is creating a lasting impression of Japan for me. The environment of Japan was what was forging this impression. More exactly it was the weather here that was real shocking for me. The weather? You are probably wondering why this is so fascinating for me. Yes the weather with snow, rain, typhoon and thunder and lightening was what was sensational.

To explain why weather is fascinating to me I should tell you about where I am from. I am from California and California doesn't have severe weather. Not to be a salesman or anything but California has perfect weather. Coastal California, where most of the people live, is never too hot nor cold and isn't visited by strong storms. The most boring job in California, therefore, is to be a weather reporter. I came to Riken after finishing my degree at the University of California at Santa Barbara, a beachside university about one hour north of Los Angeles. In Santa Barbara no one has to ask what the weather will be like tomorrow or on the weekend. A typical weather forecast for Santa Barbara would read something like, "Some Fog in the Morning, Clearing by the Afternoon with a temperature of 75 degree." (excuse me 24 degree)

Japan has been enjoyable so far. I have been able to experience a wide variety of weather from rain to snow, crisp evenings to a warm sultry summer night. It is like

being a child in many ways experiencing things for the first time. The people in my group are probably astounded to see me stare out the window at the various weather conditions as I experienced them. There have been many things to learn to adjust to the weather such as learning the difference between Summer and Winter clothes and the necessity of an umbrella. The worst thing so far has been that it rains too much. The California rainy season, when it comes, is usually only a month in length and during that period it rains only a quarter of the time. In my experience Japan only has a rainy season.

In Santa Barbara, I had studied the Japanese language in preparation for coming to Japan. Upon my arrival here, my language skills only allowed me to travel by train around Tokyo and everything else was a bewildering maze of neon signs, pretty to look at but containing little to no information. If it weren't for the plastic food in front of the restaurants I probably would have starved to death. It took me a number of weeks to figure out that most of the restaurants are on the second floor. I have yet to reach the third floor.

I have found that the Japanese people are quite friendly and willing to help a confused foreigner. However, some of the questions that I would have liked to ask would only get a puzzled stare. For example "Where can you get good Mexican food?" Luckily, for me, I have a number of friends in the Tokyo area which I had met through my language classes. They provide me with information like where is that restaurant or what is on the third floor.

US TOGETHER

魅力的な天候 (要訳)

米国から昨年(2018年)の3月来日、反応物理化学研究室においてカリフォルニア大学との共同研究「NO 錯体の光化学反応」に従事。歴史に関心を持ち、青森・恐山などを訪ねる温和な好青年です。

私の日本についての印象はまだ整理されていませんが、日本の環境、なかでも天候はショッキングでした。天候? 天候が魅力的とは不思議に思われるかも知れません。そうです。雪、雨、台風、雷や稲妻などは感動的な驚きです。

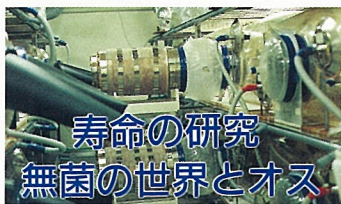
なぜ天候がそれほど魅力的なのかを解って戴くためには、私はどこから来たかを話さなければなりません。私はカリフォルニアから来たのです。カリフォルニアの天候はきびしいものではありません。セールスマンだけでなく、何にとっても申し分のない天候です。多くの人達が住んでいる海岸沿いは、暑すぎることも寒すぎることもなく、嵐がくることもありません。カリフォルニアの一番つまらない仕事は、天気予報のリポーターでしょう。私はロサンジェルスから北へ1時間ほどのビーチサイド、サンタバーバラにあるカリフォルニア大学で学位を得て来ました。ここでは明日や週末の天気はどうかなどとたずねる人はいません。天気予報はいつも「朝は霧、午後には晴れて気温は24度」のように伝えます。その点日本は何とおもしろいことでしょう。私は雨や雪、爽やかな夕暮れ、むし暑い夏の夜など、様々な天候を知りました。それは、まるで初めての経験をした子供のようなものでした。窓から外の天候を凝視している私を見て、研究グループの人達は驚いたこ

とでしょう。夏服と冬服の区別、必要な時には傘の準備というように、天候に合わせるということなど多くの学ぶべき点があります。ただ、悪いことは、これまで雨が多すぎたことです。カリフォルニアの雨の時期はほんの1ヵ月間、それも15分ほどしか降りません。日本には雨期しかないというのが私の印象です。

サンタバーバラで私は、日本へ行く準備として日本語を勉強しました。日本に来た当時の私の語学力といえば、東京周辺を電車で行ける程度、きれいだいが何の情報も得られないネオンサインに目がくらんでしまいました。もし、レストランの前にプラスチックの食物がなかったら、私は飢え死にしたことでしょう。ほとんどのレストランが2階にあることを知ったのは、数週間後のことです。でも3階には一体何があるのでしょうか?

日本人はフレンドリーで、困っている外国人をすすんで助けてくれることを知りました。しかし私の質問に困惑するときもあります。例えば「おいしいメキシコ料理はどこで食べられますか?」とたずねた時などです。幸いにも私には語学教室で知り合った東京周辺の友達があり、彼らはそのレストランがどこにあり、3階に何があるかを教えてくれるのです。





タイトルを何気なく「無菌の世界の雄」とタイプして気がついた。この場合の雄はオスではなく、すぐれて力のある人の意味にとられてしまう。それで表記のタイトルにした次第である。

不老長寿は、古今の東西を問わず人類の願いである。しかし、昨今の科学技術のめざましい発展にもかかわらず、寿命研究はほとんど進展していない。それは、寿命研究が研究対象として時間がかかりすぎ、敬遠されるためであると思われる。それにしても、最近の新聞報道では日本人の平均寿命が、男性76.11才、女性82.11才とさらにのびて、長寿世界一を維持しているのは、まことにおめでたいことではある。

寿命には遺伝因子や環境因子が関与するが、腸内にすんでいる細菌が草むらのようにみえる腸内菌叢がその環境因子の一つであると考えられている。腸内菌叢は、主として大腸内にすみついている百種類百兆もの数の腸内菌によってなりたち、宿主の生理や病態に直接的あるいは間接的に影響を与えていることがしだいに明らかにされている。われわれは、その腸内菌叢を死ぬまで持ち歩いているわけであるが、普段はそのことを意識しているわけではない。しかし、百兆もの数の腸内菌のそれぞれが深く静かに生命活動をして、彼らの代謝によって生じた有害物質や有用物質が慢性的に影響を与えていることは想像に難くない。

寿命に腸内菌叢がかかわっていることを最初に唱えたのは、メチニコフ先生（1908年にノーベル医学・生理学賞を受賞したロシア人生物学者）で、彼は、ヨーグルトを常食にしている地域に長寿者が多いことに着目し、ヨーグルトの乳酸菌が腸内の腐敗を防止するのではないかと想定し、ヒトの老化は腸内腐敗菌が生産する有害物質による慢性中毒であるとしている。しかしながら、その後、ヨーグルトの乳酸菌は腸内に定着しないこと、腸内の有害物質も確認されなかったことなどから、メチニコフの長寿説はすたれてしまった。近年、腸内菌叢の大勢を占める嫌気性菌の培養技術および無菌動物やノトバイオ（無菌動物に既知微生物のみを投与し、定着させた動物をさし、微生物構成のすべてわかっている動物）マウスの飼育技術の進歩によって得られた研究成績から、その長寿説を見直す必要が示されている。

われわれは、どの腸内菌が寿命にかかわるかをノトバイオトマウス(CF#1)系により探索し、興味ある実験結果を得ている。それは、大腸菌、腸球菌、バクテロイデス菌、ユウバクテリウム菌、ビフィズス菌、ウェルシー菌の6種類の腸内菌を組み合わせせて定着させたメスのノトバイオトの寿命の比較から、ビフィズス菌が寿命をのばす腸内菌である可能性が示唆されたのである（本ニュースNo.124で紹介）。

このように細菌の組み合わせだけでも、それが生体の寿命に反映することは驚異である。一般的に通常動物より無菌動物が長生きであるが、奇妙なことに、実験に用いたCF#1系マウスのオスでは、通常マウスより無菌マウスの方が早死であった。その死因を追跡したところ、無菌動物特有の生理現象である筋肉の緊張低下により精囊や凝固腺（交尾後凝固してフタの役目をする凝固液を分泌する）の括約筋が弛緩し、精液や凝固液が尿道内に漏出凝固し、尿円柱を形成し(写真)、尿道閉塞、尿路障害を起すことがわかった。この現象は老化にもなっていますますます顕著になる傾向を示した。このようにこのマウスの早死には無菌世界のCF#1系オスであるがゆえのきごとであった。無菌世界では、ある種のオスは長生きどころか、短命という悲しい宿命を背負っている。蛇足ですが、この話のような病態は「理研の雄」の方々には、たとえ老化してもまったく心配がないことを念のため付け加えておきます。

ノトバイオトマウスの寿命実験の成績を人間の寿命に、そのままあてはめるわけにはいかないが、健康で長生きするには、少なくともビフィズス菌がわれわれの腸内にたくさんすみついていることが大切のようです。そのためには、ビフィズス菌を増やすような食物、例えばニンジン、ゴボウ、カボチャ、サトイモなどの緑黄色野菜（食物繊維の豊富なもの）を十分とり、腸内を整えるのにヨーグルトや乳酸菌飲料をとることをおすすめします。きっとメチニコフ先生にも賛同してもらえらると思います。



動物試験室
室長 水谷武夫