

2015. 1. 15

第100回アブダクション研究会開催のご案内

アブダクション研究会

世話人 福永 征夫

TEL & FAX 0774-65-5382

E-mail : jrfd117@ybb.ne.jp

事務局 岩下 幸功

TEL & FAX 042-35-3810

E-mail : yiwashita@syncreatep

■ホームページ■

<http://abductionri.jimdo.com/>

第100回アブダクション研究会の開催について、下記の通りご案内を申し上げます。

(1) 第99回アブダクション研究会のご報告をします。

2014・11・29(土)に開催致しました、前回の第99回アブダクション研究会では、『シノ・セグレに学ぶ「温度と宇宙・物質・生命」＝セグレ著・桜井邦朋訳「温度と宇宙・物質・生命」(2004・講談社ブルーバックス)を輪読して新たな領域の知見を研鑽する＝』というテーマの下に、次のように5人の会員(敬称略)に解説発表をしていただいで、きわめて内容の濃い有意義な研鑽をすることができました。

- 第1章 37.0度C 北村 晃男
- 第2章 尺には尺を 中山 貞望
- 第3章 地球を読み解く 大河原 敏男
- 第4章 極限状況下の生命 八尾 徹
- 第5章 太陽からのメッセージ 福永 征夫
- 第6章 量子飛躍 福永 征夫

まずは、本会と懇親会において、すばらしい研鑽と探究の機会を得ましたことに対し、発表者にご出席の皆様にご心から感謝しお礼を申し上げます。

著作の原題は、「温度という問題——温度がわれわれの種、星、宇宙の過去と未来について明らかにすること」(A MATTER OF DEGREES ——What Temperature Reveals About the Past and Future of Our Species , Planet , and Universe——by Gino Segre) となっています。

この本の裏表紙には、編集者が次のように簡明な紹介を載せています。

《「温度」によって開かれる科学の扉——数千年も前から使われてきた「長さ」や「時間」に対して「温度」はつい300年ほど前によく測定できるようになった。

膨張宇宙論が証明されたのも、量子力学が確立したのも、温度の測定によるところが大きい。この現代科学に欠かすことができない尺度である「温度」を道案内役にして、物理学のみならず、気象学、生物学にいたるまで様々なふしぎな現象に迫る。》

[1] アブダクション研究会は、前々回（97回）の『地学・天文学史』の研鑽を、言わば、着手のホップの場、前回（98回）の『銀河の世界』の研鑽を、前進のステップの場、今回の『温度から見た宇宙・物質・生命』を、仕上げのジャンプの場、として位置づけながら、《宇宙・物質・生命》という物理化学的な広域学の知見の一端に、研鑽のウィングを拡げて、今後の発展ために、重要な一步を踏み出すことができました。

[2] セグレは、主題の科学の中で、これまでにまだ明解な説明ができていない、基本的で不思議な現象の幾つかについて、それぞれの領域の知識をタテ系にし、綿密に組み立てられた熱力学の知識をヨコ系にして、広域的な知識の織物を編み上げることに成功し、わかりやすい統合的な知見を提議しています。

[3] 近代科学の年代記を綴りながらセグレが説いていく、熱力学が、類書に勝って理解をゆき届け、われわれに愁眉を開く思いをさせるのは、どこに秘密があるのでしょうか。

[4] それは、近代の科学の扉を開き、開きつつある、傑出した大テーマを素材にして、これらを、温度・熱・エネルギーを基軸にした熱力学の論理を駆使して、その因果の筋道を矛盾なく描き切っている点にあるのでしょうか。

[5] また、それは、近代以降の先達たちの営みの歴史における、本質的な部分の連続と不連続を、過誤なく見定めて、よく整合したスムーズな認知につながるストーリー線を描き出しているという点にあるのではないかと思います。

[6] さらに、セグレが用いる、術語や概念の説明が、端的で明解な表現に練り上げられているのも際立った特色の一つで、読み手が迷いに陥りやすい陥穽をよく心得ている名人の領域に立つ人のようです。

[7] 1996に設立したアブダクション研究会は、自己や人間という部分域の最適化と他者や生態系を含めた全体域の最適化を調和させるべく、タテ系の知識とヨコ系の知識が織りなす広域的な知識を発明し、さらには高次の包括的な知識を創造する道への入り口をどのように切り拓くかを探究してきています。

[8] 今後のアブダクション研究会では、生理学のシステム、生態学のシステム、気候学のシステム、感覚と運動のシステム、健康科学のシステム、人間の能力発展のシステム、環境経済学のシステムなど、より複雑なシステムやネットワークの領域が重要な探究の対象として、われわれの視野に入ってきています。

[9] 今回学んだ、このセグレの著作は、われわれが目指す広域学の探究と研鑽にとって欠くべからざる基本文献となるに違いありません。

■主題に関するわれわれの現在および先行きの研鑽と探究、および実践のために資する糧とするために、
『シノ・セグレに学ぶ「温度と宇宙・物質・生命」——セグレ著・桜井邦朋訳「温度と宇宙・物質・生命」（2004・講談社ブルーバックス）に学んで新たな広域的な知見を研鑽する——』
と題する資料を編集して、この案内状の最後部に掲載しました。

■この資料は、セグレ著・桜井邦朋訳「温度と宇宙・物質・生命」（2004・講談社ブルーバックス）を構成する、はじめに十全6章の必要な要点を抜粋し、分節化して、縮約する形で引用し、構成したものです。
なお、先に学んだ「地学・天文学史」の資料と重複する話題については、紙幅の関係で、割愛をさせていただきました。

■皆様には、広域学の研究と研鑽のために、広域的な知識の多元的・多面的で包括的な研鑽と探究に、実りの多い成果を挙げられますようご期待を申し上げます。

■そのため皆様には、記述の各部分を相互に参照し、相互につき合わせ、相互に矛盾なく補完させ合いながら、積極果敢に、何度も繰り返して、整合的に読み取る、実行力を発揮してくださることに、心より期待しています。

（2）アブダクション研究会は本年12月に創設20周年を迎えます。

今年は歩んできた道を踏みしめ、次なる30周年に向けて、新たなステージの夢と展望を描いて共有し、気持ちも新たに有意義なスタートを切ってまいりたいと存じています。

（3）各界、各分野の皆様の積極的なご参加をお願いします。

既存の領域的な知識をベースにして、新たな領域的な知識を探索し、それらを広域的な知識に組み換えて、より高次の領域的な知識を仮説形成的に創造することを目標に、アブダクション研究の飛躍を期してまいりますので、各界、各分野、各層の皆様の積極的なご参加をお願いします。

(4) アブダクション研究会は、知識の広域化と高次化を目指し進化を続けてまいります。

1996年に設立されたアブダクション研究会は、地球規模の難題に真正面から対処するために、知識の広域化と高次化を目指し、いつまでも、真摯に、勇気を持って、粘り強く、積極的に、可能性を追求し、多様な探究を積み重ねて、一步一步進化を続けてまいります。

(5) 発表をしてみたいテーマのご希望があれば、世話人宛に、積極的に申し出下さい。

皆様には、今後、ぜひとも発表をしてみたいテーマのご希望があれば、世話人宛に積極的に申し出をいただきたく、お願いを申し上げます。お申し出は、通年的にいつでもお受け入れをいたします。上記の方向に沿うものなら、いかなる領域に属するいかなるテーマであっても、将来の可能性として、誠意を持って相談をさせていただき、実現に向けて調整を果たす所存であります。

記

◇ 日時： 2015年1月24日(土) 13:00~17:00(本会)
17:15~19:15(懇親会)

◇ 場所： NEC 企業年金会館 1階中会議室 (中山氏のお名前で申し込み)

東京都 世田谷区 代沢5丁目33-12 電話：03-3413-0111(代)

* 当日の連絡先(岩下幸功・携帯電話)070-5541-4742

* 小田急線/京王・井の頭線 下北沢駅 下車 徒歩約8分

* 会場の地図は、グループメールのブリーフケース内「下北沢 NEC 厚生年金基金会館 Map」に記載。

<http://groups.yahoo.co.jp/group/abduction/files/>

◇ テーマ：『アブダクションと「やわらかい論理」』

澤 宏司 氏

＝参考文献のご案内＝

(1) 世界の名著 パース・ジェイムズ・デューイ 中央公論社
第四章 人間記号論の試み pp.128-167

(2) 内部観測 郡司ペギオ-幸夫 松野孝一郎 オットー・E・レスラー
青土社
特に 適応能と内部観測 含意という時間 郡司ペギオ-幸夫
(できれば松野孝一郎の論文2編もお読みください)

◇プログラム：

- | | |
|------------------------------|-------------|
| (1) 研究発表[PART-1] | 13:00~14:30 |
| <小休止> | 14:30~14:35 |
| (2) 研究発表[PART-2] | 14:35~16:05 |
| <小休止> | 16:05~16:10 |
| (3) 総合的な質疑応答： | 16:10~16:55 |
| (4) 諸連絡： | 16:55~17:00 |
| (5) 懇親会：<皆様の積極的なご参加を期待しています> | 17:15~19:15 |

第100回 アブダクション研究会(1/24)の出欠連絡

●1/21(水)までの返信にご協力下さい。ご連絡なしの当日出席も無論可ですが、会場や資料の準備の都合もありますので、できるだけ、ご協力くださるようお願いいたします。

FA X： 042-356-3810
E-mail： yiwashita@syncreatep 岩下 幸功 行

●1/24(土)の研究会に、	出席	●懇親会に、	出席
未定ですが調整 します。	欠 席	未定ですが調整 します。	欠 席

ご署名 _____

■次々回 2015年3月度の第101回アブダクション研究会は、
2015年3月14日(土)に、NEC 会館2F 和室で開催します。

■2015年3月度の発表者とテーマは、次の通りです。

発表者 : 須藤 秀紹 氏

テーマ : 「分かった」と感じるためのコミュニケーションの構造

発表者は、空蘭工大の教員で、ご専門はシステム科学です。

＝参考文献のご案内＝

(1) と (2) が主要文献です。

(1) J. Barwise, J. Seligman: Information flow,
Cam- bridge University Pr.1997

(2) 川上浩司: “チャンネル理論とそのシステム科学への応用”,
システム/制御/情報, vol.49, no.2, pp.58-63, 2005.

(3) J. Habermas. The Theory of Communicative Action I,
Heinemann, 1984.

■皆様には、大いにご期待をいただき、奮ってご参加ください。

<定例アンケート調査>

もしご協力がいただければ、という趣旨であり、必須ではありません。

皆様のメッセージ集として他の会員にも伝達しますので、情報の交流に積極的に参画下さい。

- (1) 今、アブダクションの研究・実践と関連のある事項で特に興味をもって取り組んでおられること。
- (2) 研究会の議論の場を通して INTERSECTIONAL なアイデアや知見の INCUBATION が進んでおり、例会で発表したいと思っておられること。
- (3) これまで(第1回～第99回)の研究発表やなされた議論(「議事録」を参照下さい)に関して、さらに改めて質疑や意見を表明したいと考えておられること
- (4) アブダクションの観点から、注目すべき人・研究グループ・著書(古今東西不問)。
- (5) 細分化された「知」の再構築を図るという視点から、注目すべき人・研究グループ・著書(古今東西不問)。
- (6) 貴方ご自身がお考えになられている「知」の定義とは?
- (7) その他のご意見、ご要望、連絡事項など。

特に他学会・研究会での発表内容や発表論文等についても是非お知らせ下さい。

.....
.....

.....
.....
.....

『ジノ・セグレに学ぶ「温度と宇宙・物質・生命」
——セグレ著・桜井邦朋訳「温度と宇宙・物質・生命」
(2004・講談社ブルーバックス)に学んで新たな広域的な
知見を研鑽する——』

1. はじめに——定規、時計、温度計

【1】長さ、時間、温度の三尺度

◇長さ、時間、温度の三つは、日常生活の三つは、日常生活のリズムを決める。
この中で一番捉えどころのない温度に、私は魅せられている。
長さや時間に関する日常的な理解は、過去何千年にもわたってあまり変わっていない。
長い間にわたって私たちは、定規と時計とを利用してきた。
だが、私たちが温度を測れるようになったのはやっと 200~300 年ほど前のことである。
気体の温度が実は、熱的平衡にある分子の平均の運動エネルギーであるということがわかったのは、
さらにずっとあとのことである。

【2】科学の未解決問題のいくつか

◇本書で、これまでに提起された科学の未解決問題のいくつかについて提議をしたい。
その際に、温度は単なる脇役ではなく、欠かすことのできない存在であることがわかってくる。
ここで、三つの例を考えてみよう。

◇とても言い尽くせないほど、温度の謎は興味深く、そして、重要である。
北極に住んでいようが、サハラ砂漠に住んでいようが、私たちの身体が一定の温度を維持している
理由、その温度が 37 度 C である理由、あるいは、大部分の哺乳類や鳥類が大体同じ体温をもつ理
由について、簡単な答えがあるわけではない。

◇次に、ビッグバンによる宇宙の誕生について考えてみよう。
初期には想像を絶するほどの熱さだった宇宙は、30 万年にわたる時の経過の中で、約 3000K に
まで冷えた。
観測によって、約 3000K の宇宙では、温度はほぼ完全に一様であり、あらゆる地点でおおよそ等
しかったことがわかっている。
だが、完全に一様というわけではなかった。
もし一様だったとしたら、銀河も、星々も、惑星たちも現れることはなかったであろう。
初期の宇宙にあった 1 度 C にも満たない温度のゆらぎが、今では、現代天文学の道具を用いて研究

されているのである。

◇三つ目の例として、存在しうる最低温度、つまり、絶対零度という少し不思議な概念について考えてみよう。

およそ 200 年前に、初めてこの限界に近づくという試みがなされ、新しい世界への道は開かれた。この世界では、量子力学の法則が物質をとりしきっており、導線は電気抵抗を失い、流れる液体には摩擦が生じないのである。

2. 37. 0度 C

【3】代謝で生じる熱の行方

◇37. 0度 C。

体温は、どんな人でも驚くほど近い値をとる。

ストレスで鼓動が高まったり、呼吸が激しく乱れたり、自分で抑えが利かないほどの震えがきたり、滝のような汗をかいたりしても、体温は一定にとどまる。

呼吸、発汗、排泄、その他の身体的機能が大きく変わるのは、体温を一定に維持しようとする工夫である。

したがって、体温がほんの2%変わっただけでも、たいていの人は病気だと感じる。

もし、体温が5%以上も上下するようなら、今すぐ病院へ向かうべきである。

◇人は誰でも同じ体温をもつのだという考えは、17 世紀以前であれば、不思議なことと思われていたに違いない。

当時は、精度の悪い体温計があっただけで、注意深く計測されていたわけでもなく、体温の比較も行われなかった。

体温は、気候を反映して、熱帯地方の人のほうが中緯度帯の人より高いのだと思われていた。

1578 年にヨハネス・ハスラーが著した『医の論理』に書かれた第一の課題は、「年齢、季節、極までの距離（つまり、緯度）、その他の影響によって各人の体温がどのように決定されるかを見出す」ことであった。

今では、私たちの体温が居場所によって変わるものではないことがわかっている。

体温は 1 日の間にわずかに変わるが、それは、夜間の最低値から、正午過ぎの最大値まで、通常 0. 8度 C だけ、徐々に上がるにすぎない。

37. 0は単に1日の平均にすぎない。

◇体温が普通より高いと、発熱、あるいは単に、「熱がある」と言われるし、普通より体温が低いと低体温症と呼ばれる。

普通の範囲に体温が保たれるのは、脳内深く埋め込まれた制御機構の働きによる。

体温の調節をする器官である視床下部は、他にもさまざまな分泌作用を制御している。

視床下部と脳下垂体の働きを研究した、20 世紀初期のアメリカの偉大な医者であったハーヴェイ・クッシングは、視床下部について次のように記述している。

「親指の爪で隠せるほどのこの場所に、成長、感情、生殖という原始的存在の源が横たわっている。その場所を人間は、抑制という皮質で覆っているのだ。」

◇私たちの身体は代謝機構を通じて、熱を生成している。

その熱の約 85%は皮膚を通して消散し、残りは発汗と排泄により失われる。

皮膚は熱の出入りの主要な場で、視床下部と何らかのつながりがあるはずだ。

重要な経路の一つは末梢神経系で、もう一つは、その下に横たわる、手の込んだレース細工のような毛細血管である。

◇この二つの経路から送られてくる信号は、視床下部の体温調節部位で統合される。この調節部位が寒いと判断すると、毛細血管が縮小して熱を保持し、逆に熱すぎると、毛細血管は拡張する。

同時に、ホルモンによる信号が汗腺へ送られ、皮膚にある毛穴を通じて水分、つまり、汗を出すように命令する。

数百万年にわたって進化してきたシステムの有用な働きに、私たちは驚くばかりである。

【4】一定の温度

◇恒温動物の哺乳類や鳥類は高度の代謝系を有し、内部で熱を発生し、体温を一定に保つ精密な冷却機構を備えている。

一方、哺乳類と鳥類以外のすべての動物からなる変温動物は、このような機構をもっていない。体温を一定に保つという機構は、洗練された制御機構をもつ複雑な脳を必要とするため、既知の生物種の中でごくわずかな種が採用できるにとどまったのである。

◇恒温動物がなぜこのような機構を獲得したかについては、多くの仮説があるが、現在のところ、これだという唯一の解答はまだ出ていない。

◇ある種の動物は、初期の水生動物の段階から陸上生活への移行の時に一定の体温を保てるようになったようである。

水中では生物は、天候の変化からおおむね守られている。

特に、深海の温度はかなり一定に維持されている。

これとは対照的に、地上の生物たちは、昼夜、晴雨、あるいは、風や嵐を経験しながら、四六時中、温度の変化を受けている。

◇さらに、地上の動物たちの多くは、複雑な決断を急いでしなければならないのである。

例えば、サバンナでライオンに追いかけられる人類の先祖を想像してみよう。

走るためには、すべての手足を規則正しく動かさなければならない。

その間、脳は生き残りのためにはどの戦略が最適かを考え続けるのである。

どうすればよいかのいろいろな計算が、手足を動かし、汗を噴き、肺が締めつけられている間にも、ずっとなされ続けている。

いろいろな決断の積み重ねによって、生き残りの選択肢を選んでいるのである。

◇人間の思考や行為を司るのは脳である。

脳は、相互に連携した何千億もの神経細胞からなる想像を絶する回路系である。

その中で信号の伝達や受容を引き起こす複雑な化学反応は、多様なホルモンによる情報が特定の器官に送られる場合と同じように、温度に依存している。

回路のすべてが温度に依存しているので、特殊な環境の下では例外があるものの、一定の体温を保つことは、私たちと同様に複雑な動物たちにとって、進化における最善の選択なのである。

◇体温を一定に保つ機能が進化したのは、脳の温度を一定に保つためだけではない。

一般に化学反応は、温度が上がるのに応じて速くなるので、体温のサーモスタットを高温にセットするほうが、ある段階までは、より活発な活動が可能となる。

しかし、余分な熱が発散されなくなり、情報があまりに急激に入ると、システムはこわれてしまう。

過去数百万年にわたって人類は、他の哺乳類や鳥類と同じく、37度Cの辺りで自分の体が最も有効に機能することを見出してきたのだと思われる。

◇一定の体温に維持されている時に人体が最も確実に機能するのは良いとして、ではなぜ体温は37.0度Cなのだろうか。

その答えは、進化のしくみと代謝の働きを組み合わせるとわかってくる。

例えば、機械はそのほとんどが非常に効率の悪いものだが、哺乳類も同様である。

摂取したエネルギーの70%以上が、熱に変換されてしまう。

この熱は、周囲に放散しなければならない。

そうしないと、オーバーヒートしたエンジンのように体はますます熱くなり、まともに機能できなくなってしまう。

◇皮膚の温度より10度Cから15度Cほど低い外気の中で、私たちは一番過ごしやすいと感じるが、それは、この温度の違いが、熱損失の速度をちょうどよい程度に保つからなのである。

これよりもっと寒かったら、熱がもっと速く失われるし、もっと暖かかったら、熱がずっと残ってしまう。

前者の場合には、着物や毛布、また、身震いのような筋肉活動により、体温を調節する。

後者の場合には、汗をかいたり、風を送ったり、のんびりと休んだりして、温度差を調整するのである。

◇熱発生の機構は、脳がとりしきる複雑な機構である。

脳と、心臓、肺、腎臓のような内臓は、体重のやっと10%ほどを占めるに過ぎないのに、安静にしている時に体熱の三分の二以上をも発生させている。

運動中は、筋肉による熱の発生は10倍にも増え、他の熱発生源のすべてを凌駕するようになる。このような熱発生の劇的な変化にもかかわらず、体温はかなりよく一定に保持され、基本的な機能も平常のままである。

このような状態は熱を体外へ逃がす機能により維持されているが、その間も、体内での熱の発生は続けられているのである。

◇熱伝導の基本的な物理的原理は、熱は常に熱い物体から低温の物体へと流れるということである。あらゆる物体は熱を放射したり吸収したりする。

体温より低い温度の石の壁でできた大きな部屋では、私たちは冷えるし、この部屋の壁が体温より高ければ、温められるのである。

少なくとも温度差があまり大きくない場合には、放射と伝導のどちらにおいても、熱の伝わる速度は温度差に大体比例する。

この法則は、昔の本には、熱流に関するニュートンの法則として紹介されている。

金属の棒を手にした場合、この棒が25度Cの時の方が、31度Cの時に比べて、手は二倍も速く熱を奪われるのである。

それは、37.0という温度を基準にすれば、前者は12度C、後者の場合はわずかに6度C違うだけだからである。

15度Cの石壁の部屋にいと、壁が25度Cの場合に比べて、寒く感じられる。

◇約20度Cの部屋で私たちは気持ちよく感じるというのと、私たちの体温が37.0度Cになったのは、同じ理由であると言うひともいる。

およそ200万年前に、人類は、1日の平均気温が20度C台前半だったアフリカの地方に出現したのだった。

37度C程度の体温は、このような気候のもとで狩人にして採集者だった人々の熱の散逸を最適なものとしてくれるのである。

普通に活動していて生じる熱の発生速度と、周囲が20度C台前半の時に体が熱を放出する速度は、計算すれば算出できる。

どちらも体温によって決まり、大雑把な計算では、体温が37度Cの時に、これら二つの速度がおおむね一致することを示している。

この温度のときに発生する熱と出ていく熱が等しくなるのである。

◇後に、人類は毛皮を身にまとったり、火をおこすというユニークな能力により、熱的に許容しうる生活圏を寒冷地にまで拡大したのであった。

だが、気候に対するこのような適応は、私たちが 37.0 度 C の体温をもつ理由のごく一部にすぎない。

私たちと大きく異なる進化をたどった鳥類や哺乳類は、大体において、私たちと同じ体温で安定している。

恒温性の主な理由は、複雑な化学変化に対する適応に関わっている。

これらの化学変化は、私たちや動物たちが生きていくうえでの、複雑な諸活動を可能にしてくれているのである。

【5】サハラへ

◇体温を維持する上で、効率のよい冷却機構は保温機構と同じくらいに重要である。

熱は物質中を高温から低温へと流れるので、もし何らかの調節機構がなかったとすれば、例えば、40 度 C の環境に置かれたら、我慢できないほど熱くなり、私たちは死んでしまうであろう。

だが、私たちは生き残っている。

実際に人類はもっと高い温度のサハラ砂漠でも十分に生存していけるのである。

◇カギを握っているのは蒸発作用だ。

冷たい外部環境下では代謝から発生した熱のおよそ 25%が、そして気温が高いともっと多くの熱が、この作用でもち去られるのである。

どのようにして蒸発が起こるのか理解するために、液体、即ち動きまわって互いに衝突し合う水分子の集団について考えてみよう。

◇水の温度は、これら分子の平均の運動エネルギーに関係している。

より速く運動する水分子がいくらか液体の外へ出て行けば、残った液体は熱伝導によって再び平衡に達し、平均のエネルギーは下がって、全体的な温度が下がることになる。

これが蒸発による冷却の理由だが、この過程は、液体の外の大気が十分に乾燥している時のみ、有効なのである。

高速で運動する水蒸気分子が、液体から離れるのと同じ速度で再び戻ってきてしまえば、冷却の効果は打ち消されてしまうのである。

◇水が蒸気になる時には、大量の熱を奪うので、蒸発は大変に重要である。

熱量の単位はカロリーで表される。

水 1 グラムを 1 度 C 上げるのに 1 カロリーを必要とする。

つまり、水 1 グラムを零度 C から 100 度 C まで上げるのには、100 カロリーが必要である。

だが、100 度 C の水 1 グラムを同じ温度の水蒸気 1 グラムに変えるには、500 カロリー以上の熱が必要である。

言い方を変えると、水が水蒸気に転移するのに必要な熱量は、氷点温度から沸点温度にいたるまでに費やされる熱量の五倍以上になるのである。

つまり、体内の水を水蒸気に変換することは、身体を冷やすために非常に有効な手段である。

【6】体温を下げる巧みな手段

◇体温を下げる必要のある動物たちは、さまざまな巧みな手段で、この基本的な機構を利用している。

蒸発作用を助ける一つ的手段として、体表から出た高速の水分子にすぐに風を送ったり、吹き飛ばしたりすることがあげられる。

これは、熱いコーヒーやスープを息で吹くのと同じである。

◇風を送れば確かに冷却は加速されるが、その前に、そもそも体表面に蒸発させるべき液体を作り出すことが必要である。

もっともよく見られる蒸発の方法の一つは激しく呼吸すること、二つ目は発汗することである。

◇鳥類には汗腺がないし、哺乳類でも、例えば、犬にはこうした器官がほとんどない。

したがって、これらの動物は、咽頭を通じて蒸発をさせるために、“あえぎ呼吸”と呼ばれる短く速い浅い呼吸をするのである。

◇この方式にはちょっとした利点がある。

その一つは頭を冷やし続けるのに役立つことである。

平原を全速力で5分間も走る東アフリカのガゼルは、体内で大量の熱を発生するので、体温は約39度Cから約43度Cにまで上がる。

ところが、43度Cの体から流入した血液が循環するこのガゼルの脳は、それより3度C以上も低い温度にとどまっている。

◇こうした巧妙な冷却への適応は、逃げるときに激しく呼吸する必要性から生まれた副産物である。体の中心から脳への主要な血管である頸動脈は、脳へ入る前に、頭蓋の基底で数百本の小さな動脈へと一旦枝分かれしているのである。

この枝分かれした部分で、血液は隣接した咽頭内の速い空気の流れによって冷やされる。

この興味深い冷却機構は、逃走する動物の意思決定能力にもうまく適合している。

そのようなわけで、ガゼルは、体温が上がっても、脳の温度をほぼ一定に維持できるのである。

このように、動物がまず第一になすべき工夫は、体の制御中枢である脳内を一定の温度に維持することに向けられることになる。

◇あえぎ呼吸には発汗以上の別の利点がある。

汗腺から分泌される液体は、貴重な塩分を持ち去ってしまうが、これに対し、激しい呼吸の場合、ミネラルは体内にとどまっている。

しかしながら、この呼吸法には不利な点がある。

その一つは筋肉の動きを必要とすることで、それ自体が熱を発生する行為となってしまうのである。どんな解決法も完全ではない。

すべては、動物たちが生き残りをかけ、長い間にわたって進化してきた適応なのである。

◇人類は毛皮をほとんど失ってしまっていて皮膚だけが残っているが、ヒトの上皮には全体で約200万の汗腺がある。

視床下部による制御の下で、汗腺は少しだけ塩分を含んだ汗を分泌する。

この分泌は意志でコントロールできるものでもないし、かといって外部環境だけでなされるわけでもない。

緊張やイライラもまた、発汗を促すのである。

それでも発汗は急激に上がった体熱を逃すのに、非常に効率のよい冷却機構である。

この急速な冷却法は、祖先が野生の地で生き残るのに大変有効であった。

◇発汗による冷却作用には、注意すべき点の一つがある。

すでに触れたが、水分子が体表を離れていく速度が、体表に付く速度より速くなければならない。

外気の湿度が高いと、汗は蒸発による冷却には作用せず、体表を流れ落ちることになる。

発汗はまた、別の問題も引き起こす。

気づいていない時でさえ、私たちは平均して、一日に約1リットルの汗をかいている。

実際には、この数値は天候や活動の量によって変わり、少ない時にはほとんどゼロになり、多い時には約 16 リットルにもなることがある。
このような大きな水分の損失は、発汗に伴う深刻な脱水の危険性を生じさせ、点滴による水分補給が必要になる場合もある。

◇蒸発による冷却は、気温が 50 度 C 以上に達するサハラの大砂漠での生き残りのカギでもある。よく乾燥した砂漠の大気中では、水蒸気の飽和について気にする必要は全然ない。
サハラ砂漠のナツメヤシの葉陰で、自分の体をあおぎながら坐っているだけで、人は一日に約 8 リットルの水分を失う。
さらに少し運動した場合は一日に約 16 リットルもの水分が蒸発する。
激しい運動など論外である。
だから、水の補給を絶やさずに行う必要がある。
脱水の最初の兆候は約 0.5 リットルの水分を失うと現れ、約 4 リットルの水分を失うと、疲労と発熱とが始まる。
約 8 リットルの水分を失うと、意識がもうろうとして、呼吸が困難になり始める。
約 11 リットルにもなると、応急措置や点滴ができない場合、回復不可能の状態に立ちいたってしまう。

◇そうではあっても、人々は砂漠でも繁栄している。
ほとんどの人は、一日に数時間、高温に少しずつ曝すことを 5 日から 10 日行うことによって、暑く乾燥した気候に適応できるようになる。
つまり、人間は多量の発汗ができるように、肉体を鍛えられるのである。
生理学者で動物の体温について研究しているカール・ギソルフィとフランシスコ・モーラが次のように指摘している。
「これが、人間のなしうる最も目覚ましい生理調節であり、それは汗腺の進化に負うところが大きい。」
この適応によって発汗のレベルが高まるだけでなく、汗の塩分も低下する。
それによってナトリウムやカリウムなどのミネラルが保持されると、体が正しく機能するとともに、のどの渇きを引き起こしてもっと水分を摂取するように促すことにもなる。

◇砂漠に住む人々はまた、10 分間に約 120 リットルの水を飲み、体にためるといって、ラクダというユニークな動物に助けられている。
ラクダは砂漠での生活に適応した注目すべき動物である。
ラクダは二週間にわたって水を飲まずに、体内に蓄えた水を取り出しながら生きながらえることができる。
また、ラクダは水分を保持するさまざまな機能をもっている。
例えば、大小便にはほとんど水が含まれていない。
だが、ラクダの最もユニークな機能は、体内の水分量に応じてサーモスタットを調整することである。
水をいっぱい摂ったラクダは、蒸発による冷却に依存しながら、体温を約 36~38 度 C の間に維持する。
水の供給が足りない場合には、ラクダは、体温の上限と下限を変える。
夜間では約 34 度 C ほどの低さから、日中のいちばん暑い時の約 41 度 C というふうに変えるのである。
太陽の下で体温を高くすることは、蒸発による冷却の必要性を低くする。
そして、日中に蓄積した熱は夜間に可能な限り多く排出するのである。

◇賢い砂漠の旅行者たちは、蒸発によって自分たちの水筒も冷たくなることを発見した。
政治から避雷針まで、あらゆる物のしくみについて関心をもっていたベンジャミン・フランクリンは、砂漠の気候の中でも蒸発が驚くべき力を発揮することを見逃さなかった。

アメリカへの移住者の権利を擁護していたフランクリンはイギリスで、エーテルで温度計を濡らすという実験を行った。
彼は、温度計のいごを使って吹くと、薄い氷の層が温度計の水銀溜まりの周りにでき始めることを発見した。

◇友人に宛てた 1758 年 6 月 17 日の手紙で、フランクリンは自分の実験について綴っている。砂漠の旅行者がすでに知っていた事実を、彼は次のように記した。

「私が行った実験から、人は、強風が吹く場所に立って、ワインから造られる蒸留酒やブランデーより燃えやすいエーテルでたびたび濡らされると、暖かい夏の日中でも凍死する可能性のあることがわかる。

ヨーロッパの知識人が、蒸発により肉体を冷やすという自然の力について知るようになったのは、ここ数年のことにすぎない。

だが、東方では、人々は、ずっと以前からそのことを知っていた。

ある友人が言っていたことだが、100 年近くも前にベルニアが書いた本『インドスタンの旅』の一節に、(暑い気候の下で、乾燥した砂漠中を旅する際には)濡れた羊毛の布で包んだ容器に水を入れ、ラクダの日蔭側の傍に吊るしてもち運ぶという記載がある。」

【7】南極へ

◇冷却の場合と同様に、人間は熱を生み出して蓄えるためのいろいろな調節機構をもっている。

体の震えは熱を生み出し、表皮は外界に熱が奪われるのを防ぐ。

冷たい空気に曝されると、体表への血流は急速に減少し、皮膚の温度は下がる。

こうすることにより、外気と皮膚の間の温度差が小さくなるので、外部への熱の発散は減る。

ある意味で、皮膚は体内の重要な器官を隔離する被覆となるのである。

これは寒さに対する短期的な防御なのである。

◇人間も、冬には脂肪を増やすといった、長期的な防寒対策をもっているが、ある種の哺乳類や鳥類のもつ冬眠という驚くべき能力は、それとは比べ物にならない。

冬眠の状態では、動物は少なくとも約 11 度 C も体温を下げ、数カ月わたって食べ物も水もなく過ごす。

◇暑さに対する人間の長期的な代謝機構の調節については多くの研究がなされてきたが、極めて寒い環境に人間がいかに適応するかについての研究は少ない。

最もよく研究されたものは、海藻や海産物をとるために海中深く潜ることを一年を通じて行っている日本と朝鮮半島の女性たちに関するものである。

海女(あま)と呼ばれる彼女たちは、10 代初めからこの仕事を始め、60 代まで潜り続ける。

彼女らは、今ではウェット・スーツを見に着けているが、1960 年代後半までは、10 度 C の海中に、簡単な木綿の着物を着て潜っていたのだった。

1960 年代に行われた研究によれば、彼女らは、冬場には 30% も代謝速度を上げていた。

それは、潜水中に奪われる体温の低下を補うために体熱を発生させるためのものだった。

これが冷たい環境への適応なのだという仮説は、海女たちがウェット・スーツを身に着け始めるとすぐに、代謝率の上昇が止まったという事実により裏づけられている。

◇水泳や潜水の場合、体温の変化に対する蒸発の寄与を考えなくてよいため、特に関心がもたれている。

1987 年に、遠泳選手のリン・コックスはベーリング海峡にある二つの島——一つはアラスカに、他の一つはシベリアにある——の間の約 3.9 キロメートルの距離を二時間あまりで完泳したが、その間、通常の体温を維持した。

では、コックスはどのようにして、この偉業をやったのであろうか。

精神力も並々ならぬものがあるが、偉業達成の一因として、このような水泳に理想的な彼女の体格をあげることができる。

身長 167 センチメートル、体重 82 キログラムの彼女は、平均的な女性に比べ、ほとんど二倍の体脂肪を蓄えていた。

その上、脂肪層が体表全体に一様に広がっていた。

つまり、彼女は体内の諸器官と外界との間に、自然な断熱層を備えていたのである。

◇コックスの脂肪層は確かに注目に値するが、タテゴトアザラシに比べれば見劣りしてしまう。彼ら驚くべき泳者は体温を 37 度 C に維持して、凍りつく北極海の水中ですら代謝の働きを不変に保つのである。

彼らを保護するのは、皮下にある厚さ 6 ミリメートルの脂肪層である。

この層の内側では、アザラシの体温は、体の中心温度とほとんど同じである。

つまり、タテゴトアザラシの皮膚の温度は基本的には周囲の水温と同じだが、6 ミリメートルの被覆層は体内の温度をそれより 37 度 C も高く維持するのである。

◇しかし、このアザラシの脂肪層は、サーファーのウェット・スーツと同じではない。アザラシがどのようにして、代謝を変えないままで温かい水中でも生きていけるのか考えてみよう。何か秘密があるのだろうか。

この脂肪層には毛細血管が張りめぐらされており、アザラシが冷水中を泳ぐ時にはこれを閉じ、温水中を移動したり、激しく移動したり、または、岩上で日を浴びたりする時には開くのである。熱を通さないウェット・スーツと違い、アザラシの脂肪層は能動的に働く極めて効率的な熱調整器なのである。

◇生理学者のクヌート・シュミット＝ニールセンによれば、海洋動物と陸上動物に見られる冷却機構の相違は、熱を外部に散逸するための器官である皮膚と断熱層との位置関係にある。

アザラシには皮下に断熱層である脂肪層がある。

陸上動物の断熱層である毛皮は体の外側にある。

私たち人類はその中間の道を選んだが、明らかに陸上動物の側に寄り気味である。

◇極地から赤道直下まで、あらゆる所に住んでいるのは人間だけである。

人間は、ほかの動物よりも対応力に富んではいる。

そうであっても、私たちの制御機構はしばしば壊れる。

その最たる症状こそ、発熱なのである。

【8】事が悪く進む時

◇現代医学をもってしても、発熱の原因を見出すことは、しばしば困難である。

病院で 1、2 週間検査しても、少なくとも約 38 度 C の熱が、何の説明もつかずに 3 週間も続くことがある。

こうした謎めいた発熱は特に困ることなのだが、病気の原因がわかっている時でも、発熱の経過を記録することは重要である。

体温、血圧、脈拍、それに呼吸の状態は、患者のベッドに張りつけられた表に記録される四つの必須項目である。

その理由は、これらの項目が、時に病状を反映するからなのである。

たとえ、病気が何かわからず、どのように扱ったらよいかわからない時でも、これら四つの機能は病気の進み具合を教えてくれ、回復のヒントを与えてくれるのである。

◇高熱は特に重大な危険性のあることを示す。

髄膜炎、チフス、肺炎のような急性の感染症では、持続的な発熱で 42 度 C 以上にまで体温が上が

り、発熱をもたらした病気そのものとは無関係に、患者に重大な危険を生じさせることになる。震えや意識の混濁、けいれんが起こり得る。

◇発熱を引き起こす物質は、発熱因子（pyrogens）の名で知られているが、これはギリシャ語の火（pyro）という語幹をもつ単語である。

細菌のような発熱因子は、宿主の体内でサイトカインという一連の化学物質を使って発熱を引き起こす。

サイトカインは血流に乗って運ばれ、最終的には視床下部にまで到達する。

そこで、さらに別の化学物質であるプロスタグランジンが生成する。

この過程が体のサーモスタットをもっと高い体温設定にリセットしてしまい、発熱を誘発するのである。

◇発熱と運動をした場合とでは、この体温のリセットに際して、逆の反応が生じる。

どちらの場合も、体内温度が上がるが、運動の場合は、温度を正常値にまで下げようとする発汗が起こる。

発熱の場合は、体が震える。

そして肉体は無意識の筋肉の収縮により、体内の熱を発生させ（リセットされた高い体温の）正常値に体内温度をもっていくようにする。

いいかえれば、“もっと熱くしなければ”と体は思うのである。

◇熱がある時、視床下部にセットされた温度を正常に戻すには二つの方法がある。

一つ目は発熱因子を取り除くこと、つまり、サイトカインを生産する細菌を殺すことである。

二つ目は、プロスタグランジンの合成を阻止するアスピリンなどの薬品を服用することである。つまり、情報媒体の破壊と、情報の末梢である。

アスピリンがもつ、プロスタグランジンを抑える働きが証明されたのは、1970年代のジョン・ヴェーンの研究によってである。

彼はその功績で、1982年にノーベル賞に輝いた。

◇けれども、現代医学のあらゆる手段を用いても、医者も患者も発熱の原因についての明確な診断が得られないことがしばしばある。

20世紀に至るまでは、感染を処置する有効な薬剤がほとんどなかった。

抗生物質の使用が始まってから、やっと50年にしかならない。

◇感染の危険性に気づいたのはパストゥールだが、けがや手術のあとに起こる感染を抑える殺菌処置という考え方を発展させ、系統化させたのは、スコットランドの若い外科医、ジョセフ・リスターである。

◇私たちはしばしば細菌を体内への侵略者だと考えるが、細菌の多くは体内で静かに生きており、何の問題も起こさないのである。

悪名高き大腸菌は、実はどこにでも棲んでいる。

この細菌は私たちの結腸中に静かに棲んでおり、実際にこの細菌が繁殖していない哺乳類を見つけることは難しいのである。

大腸菌が腸の外へ出て、例えば、尿管へと移動すると、炎症を引き起こすが、通常は、それほど大きな問題にはならない。

◇大腸菌の中には有害な系統もあり、中には危険な系統が発現することもある。

中でもO（オー）157：H7は特に危険である。

この細菌は、汚染されたハンバーガーで感染者を出した1980代初期に、初めて同定されたのだった。

大腸菌O157：H7が発生してパニックが起きると、その治療の方法と、汚染を防ぐ手段が探し求

められた。

幸いなことに、ハンバーガーについては、約 70 度 C で 15 秒間調理すれば、殺菌に十分だということであった。

だが今もなお、O157:H7 の感染は、アメリカ全体で年間 7 万 5000 例もある。

◇約 70 度 C に加熱しても、常に十分とは限らない。

『ネイチャー』2001・1・25 号には、大腸菌 O157:H7 の完全なゲノムの配列を示す論文が出ている。

この著者たちは、「O157:H7 の病因検出法に対する研究を推進したのは、この病気の激しさ、有効な治療法の欠如、それに汚染した食品供給から生じる大規模な流行への潜在的脅威があったからである」と言っている。

完全な配列の解明が、よりよい診断法と治療法の導入につながるかもしれない。

しかし、今のところは、ハンバーガーにしっかりと火を通すしかない。

◇発熱を伴うさまざまな病気の治療法はないし、それどころか、なぜ熱がでるのか、まだ明確にはわかっていない。

発熱に対する説明として、数度の体温の増加が侵入してくる細菌を殺すのだという説だけでは、明らかに十分ではない。

例えば、肺炎球菌のような細菌は温度に特別な感受性があり、41 度 C 以上ではほとんど増えないが、一般的にほとんどの細菌を殺すためには、体温を人体の限界以上に上げなければならないのである。

医療器具の消毒や肉類の調理は、決まって 70 度 C 以上の温度でなされる。

もし、細菌を殺すことが体温上昇の理由でないとしたら、本当の理由はなんだろうか。

【9】熱によるショック

◇身体が発熱に費やす代価は、それによってもたらされる利益より大きいように見える。

例えば、体温が 0.5 度 C 上昇すると、約 7% 余計に酸素が必要になり、より多くの水分が費やされ、さらに、心臓や他の内臓へより多くの負担をかけるからである。

発熱は精神の働きを弱め、死に至らなくとも精神錯乱状態をもたらすことがある。

発熱は身体全体にショックを与える。

◇しかしながら、発熱が免疫系の機能を強化するという事実がある。

免疫系の一員である白血球は、体温が約 40 度 C に近づくにつれて、より活発に動き回るようになるのだ。

しかし、これは発熱を起こす機能が進化した理由の一つにすぎない。

◇発熱は時には、周囲への感染を防ぐ役割を果たすとの見解もある。

実際、大したことの無い感染ならば、免疫系の強化を通じて急速に回復するが、感染者に急死をもたらす猛烈な高熱は、激しい伝染性の感染が家族にまで拡大するのを抑えている。

この説明が妥当なものならば、それは、動物界の広い範囲の種に対して成り立つと予想できよう。

◇哺乳類や鳥類は熱を出すし、冷血動物たちも感染には反応する。

体温を上げることができないトカゲ類は、有毒な細菌に侵入されると、温かい場所へ移動する。

魚たちも同じ行動をとるが、移動ができない場合には、感染による死亡率は著しく上がる。

昆虫類ですら同じ振る舞いを示す。

マダガスカルのごキブリからアメリカの移動性バッタにまでおよぶ研究では、感染すれば、これらの虫たちも同様に温かい環境へと移動することがわかっている。

◇体温についてより深い理解を導く発見が、ショウジョウバエでなされた。
このハエのすべての細胞が四対の染色体をもっているが、唾液腺にある細胞は特別である。
その小さな、のどの突起中に、各染色体の数千のコピーが整然と並んでおり、元の染色体の巨大なレプリカを作っている。
拡大鏡がなければ、30センチメートルの長さの染色体の細糸にある色つきの帯を見分けることはできないが、その同じ細糸 5000 本ものコピーを集め、それらを揃えて並べると、これらの色の帯は容易に目に見えるようになる。
同じように、通常のハエの染色体上の構造はあまりに小さくて、光学顕微鏡では見えないが、唾液腺中にある巨大な唾液腺染色体は詳細にわたって微細構造を見せてくれる。

◇1962年に、F・M・リトツサは、このハエが通常に比べて幾分か高い温度に曝されると、その唾液腺染色体がぱっとふくらむのに気がついた。
この膨張は30分ほど続き、染色体は元の二倍にまでふくらむ。

◇分子生物学的には、1974年にアルフレッド・ティシエールとハーシェル・ミッチェルが、このふくらみが起こると、新しい種類のタンパク質が大量に生成することを見つけた。
これらのタンパク質は「熱ショック・タンパク質」(heat shock protein) とか、単に「hsp」と呼ばれるようになった。

◇当初は、これらのタンパク質が果たす役割は明らかではなかったが、その後の数年間で、興味深い事実が浮き彫りになった。
細胞を機能させるためには、多くの異なったタンパク質が動きまわり、適切に相互作用しなければならない。
そのためには、DNA 暗号が正しい物質の生成を指示する必要がある。
さらにそれだけではなく、タンパク質は、その構造を決めるアミノ酸の鎖を正しく折りたたむことが必要なのである。
正しい構造をとれなければ、タンパク質の分子は互いに形が合わず、相互に認識すらできないのである。

◇長いタンパク質分子がどのような方法で折りたたまれるのかは、今でも謎のままである。
タンパク質の鎖上のアミノ酸の配列が、細胞液中での分子のおおまかな構造を決めるのだということを実証したクリスチャン・アンフィンセンは、1972年のノーベル化学賞を受賞した。
水溶性のアミノ酸は鎖の外側へと移動しようとするのに対し、非水溶性のアミノ酸は水から遠ざかろうとするのである。
熱力学にしたがって、外側に前者のアミノ酸分子が、内側に後者のアミノ酸分子が並ぼうとする。
しかし、これで終わりではない。

◇そこで、hsp が介入してくるのである。
このしくみは、自動車の修理工場に少し似ている。
ある分子が何かの間違いでゆがんだとすると、レッカー車である hsp70 が、この分子を掴んで、修理工場である hsp60 のところへもっていく。
そこで、小さな hsp10 という道具が、この分子に作用し、細胞に送り返す。
Hsp60 は二つのリングのような形をしていて、互いに重なり合っている。
これが、ゆがんだ分子の修理場となるのである。

◇加熱は分子構造に間違いを起きやすくさせるが、それは、温度が上がるにつれて、分子の動きが速くなるからである。
長くて、精緻に形作られた分子が速く運動すれば、それに応じて、その形がより偶発的にゆがみやすくなるのである。

◇秘密を解き明かしてくれたのはショウジョウバエだが、この hsp70 の生成はあらゆる種に見られる。
1970 年代の終わりまでに、類似のタンパク質が、細菌、植物、それに動物で見ついている。それらは常に温度の上昇に反応するのである。
大腸菌では、hsp の生成は約 38 度 C で始まり、約 49 度 C になると、生成されるタンパク質は hsp だけになる。
大腸菌は死に向かうが、hsp は自分の役割を果たそうとし続けるのだ。

【10】 ストレス・タンパク質

◇この修復作業が hsp によってなされるということだけでも話は面白いのに、さらに話題は広がるのである。
温度の上昇は、細胞内で分子が変形したり、正しくない折りたたみを引き起こす多くの外因的なストレスの一つにすぎない。
毒、重金属、あるいは、いろんな種類の汚染物質はしばしば悪い振る舞いを起こす。
1970 年代も終わりに近づいた頃、研究者たちは、これらの細胞内への侵入物が、温度上昇と同じように、細胞内に hsp を生成することを見出した。
こうしたストレスに対する反応はどれも共通しているので、熱ショック・タンパク質は今ではストレス・タンパク質と呼ばれている。

◇これらのタンパク質が人間の病気でも重要な役割を果たしているものと信じられている。
例えば、免疫系は侵入者を認識し、攻撃をしかけ、破壊するが、その過程で、侵入者によってストレス・タンパク質の生産が引き起こされ、それが免疫系に警告を発するらしい。
これらのタンパク質は、人間の発熱反応でも重要な役割を演じているものと思われる。
多分、病気の時の体温の上昇は、私たちの身体が hsp の生成を増やすように刺激する一つの方法なのであろう。
ショウジョウバエから人間にまでわたる生命が共有する、hsp の生成のような基本的な反応は、発熱を説明する一要因となっているのだ。

【11】 温度調整の機能はすべての生物種に共通

◇19 世紀の後半に、人類は自分たちが大型類人猿と近縁関係にあることに気がついた。
これは、どの生物も共通の適応機構をもっているということに気づく大きな第一歩であった。
20 世紀半ばには、すべての生物が遺伝情報を暗号化するのに、DNA と RNA をりようしていることが明らかにされた。
これを、フランシス・クリックは“分子生物学のセントラル・ドグマ”と呼んだ。
それなのに、最初、私たちは生物はどれも大きく異なっているという信念から、遺伝子に含まれる情報が生物種ごとに違っているのだと考えたのだった。

◇しかしながら、20 世紀後半の遺伝子配列の研究は、私たちが類人猿だけでなく、カエル、ウニ、魚類、さらにはイースト菌といかに近縁関係にあるかを実証したのである。
こうした近縁性に対する認識が、生物学におけるここ 20 年での最高の洞察であったのだと、私は思う。

◇例えば、Hom 遺伝子はショウジョウバエの背中側の構造を、頭部と尾部とを区別しながら作りあげる。
驚くべきことだが、遺伝学者たちは、同じ遺伝子が蠕虫、環形動物、ナメクジウオ、ネズミ、それにヒトにもあることを見つけている。

さらに、突然変異したハエにネズミから取りだした遺伝子を挿入し、そのハエを完全に機能させることができるのである。

視覚を支配する遺伝子も、ショウジョウバエとネズミでは共通なのである。

当然のことだが、哺乳類のレンズをもった眼は、昆虫の複眼とは完全に違っているが、見るという機能の発達をスタートさせる遺伝子は、本質的に同じである。

◇温度を調節する遺伝子をつきとめることは、体の構造や視覚を決める遺伝子よりずっと難しい。しかしながら、温度調整の機能はすべての生物種に共通なのである。

この制御の根源は何で、どのようにセットされ、いかに変わるのだろうか。

この機能はすべての生物種で、どれほど共通なのだろうか。

これらの問題は、今やっとわかり始めた本当に基本的なものである。

そして、今後数十年にわたって研究されるべき大きな問題である。

◇これと並行して、脳、神経、皮膚、血液、私たちの身体全体に広がる発汗器官は、どのようにして体温を一定に維持しているのか、また、他の生物種はいかにして自分たちを制御しているのかを解き明かす研究は続く。

類似性や多様化についての研究も、ともに進められる必要があるだろう。

◇私たちは最もシンプルな生物と比べても似ている点が多いが、ヒトが他のすべての動物たちと決定的に異なるものがある。

ヒトは、読み、書き、火をおこす。

そして、その火がどれほど熱いかを測ることまでできるのである。

3. 尺には尺を

【12】熱が語る文明

◇1600年以前には人々は、温度を測ることについてあまり考えなかった。

これに対して、長さ、時間、重さについての一般的な測定法は非常に正確なものであった。

その理由は、これらが、政治、商業、日常生活を秩序よく機能させるのに必要だったからである。

◇古代ギリシャ人は、長さ（距離）の算出に大いに長けていて、地球の半径のような直接測れない場所の測定法さえ編み出していた。

時間は長さより測るのが難しいが、徐々に精確な日時計、水時計、そして、砂時計が用いられるようになった。日や年は天文学的な測定により決められる。

◇時間は、宇宙、地球、生命、人類、文明などの進化に用いられる便宜的な指標であるが、必ずしも最良の指標というわけではない。

例えば、初期宇宙論では事象の進展を記録するのに、時間よりもむしろ温度を用いるのである。

◇文明の説明に温度を用いると次のようになる。

人類は、狩猟・採集者の段階から定住者、そして道具製作者へ移るのに応じて、石器時代における最初の火から、石炭、そして青銅や鉄を作るためのふいごにいたるまで、徐々に高温の火を使うようになってきた。

そしてもっと先へ進めば、蒸気機関、鉄鋼を作る19世紀のベッセマー転炉、そして最後に原子力にまで行きつく。

即ち、歴史は、零度C、250度C、500度C、1000度C、1400度C、そして、ついには数

百万度 C にまで行きつくのだ。

過去 200 年については、既知の気体を一つずつすべて液化していくのに伴って、達成した低温の記録を目印に用いることもできよう。

20 世紀の終わりには、絶対零度からわずかに数十億分の一度上にまで達しているのである。

◇石器時代、青銅器時代の次は、鉄器時代へと移る。

鉄器は青銅器よりずっと硬いので、鉄の生産によってまったく新しい可能性が広がった。

文明は再び変わった。

鉄器時代には火の温度は、1000 度 C から 1400 度 C に達した。

肥沃な三日月地帯では、鉄の利用は青銅器時代が始まった約 2000 年のちに始まった。

◇鉄は二段階で精錬する必要があるため、単に火で灼(や)くだけではだめで、大変な改良を必要とした。

地中にある鉄は普通、酸化鉄の状態で見つかるので、鉄の精錬の第一歩は、酸素を追い出すことである。

還元として知られるこの過程は、実際には炉に酸素を送り込んで 820 度 C の温度で進められる。送り込まれた酸素は、燃える木炭の中の炭素と化合して一酸化炭素を生成する。

この一酸化炭素が酸化鉄から酸素を奪い、二酸化炭素を作る。

この二酸化炭素は注意深く排気され、あとに鉄が残る。

◇だが、この最初の鉄には、まだいろいろな不純物が含まれている。

第二段階でこれをさらに加熱すると、熔融した鉄から鉍滓(こうし)が浮かび上がり、それを流し出すと、あとに純鉄が残る。

この最終段階では温度は、これら不純物の融解温度以上で、かつ鉄の融解温度の 1500 度 C 以下にしなければならない。

文明のこの段階を、私は、1400 度 C 温度で表現することにする。

◇人類がおこした火は、多くの地域で今から 2000 年ほど前までには 1400 度 C に達した。

その後 1600 年間にわたって、あまり大きな進歩は、少なくとも西洋社会ではほとんどなかった。

だが以後、温度の測り方に著しい進歩があったおかげで、事態は急変したのであった。

【13】様々な測定器具の発明

◇17 世紀初めは、様々な測定器具が発明された時代であった。

この時代に、望遠鏡、顕微鏡、温度計、それからやや遅れて、振り子時計が発明された。

だが、測定に科学的意義があるのは、測定の結果が何らかの証明や反証に役立つ時だけである。

そのため、発明の名誉は測定を意義あるものとした人に与えられるべきであり、器具の発明者に対してではない。

しかしながら、こうした科学的な観察や発見は、測定器具なしには得られるものではない。

◇温度計の歴史は、その発明がすぐには人類の世界観を変えなかったという意味で、望遠鏡の歴史よりも、顕微鏡の歴史に似ている。

最初の望遠鏡は、1600 年頃に、オランダのメガネ製作者によって考案されたが、先ほどの定義にあてはめれば、望遠鏡は、ガリレオが 1610 年 1 月 7 日、それを空に向けた時に発明されたのだった。

彼は木星に焦点を合わせながら、この天体の近くに四つの小さな“星”(と彼が考えたもの)を見たのだった。

ガリレオはこれらが星ではなく、木星を周回する“月”であることに気づいた。

この現象について彼は、月といわずに星という単語を用いて、次のように記している。

「今までで最も不思議な現象、そして天文学者、哲学者すべての注目を集めた現象は、以前に誰にも観察できなかった四つの迷走する星の発見である。太陽の周囲を固有の周期でめぐる金星と水星のように、これらの星はある距離より遠くに離れることなく、ある時は先に、他の時はあとと、特定の星の周りを回っているのである。」

◇1600年には、人々はまだコペルニクスの発見を端(はな)から否定し、地球が宇宙の中心であり、太陽とすべての惑星が地球の周囲をめぐると信じていた。当時、これに対する明確な反証はなかった。しかしながら、ガリレオが見た四つの月は地球の周りではなく、木星の周囲を回っていた。木星の月は、地球以外の惑星の周囲を回る月なのであった。ガリレオの解釈が正しいとすれば、地球は宇宙の中心ではなかった。ガリレオによる木星の月の観測を、私は現代科学の始まりの一つだと考えている。

◇顕微鏡も、17世紀の初めにオランダのレンズ職人により発明されたが、単なる珍品以上のものとはならず、裸眼では見えない世界へのぞき窓にすぎなかった。ロバート・フックが、この新しい装置を初めて広く活用させた。

【14】温度計の四人の発明者

◇さて、温度計についてだが、熱は1600年以前から研究されていた。ビザンチンの科学者フィロンは紀元前2世紀に、気体の膨張と収縮について考察しているし、その200年後には、アレクサンドリアのヘロンが、『気学』と呼ばれる本を書いている。しかし、これらは必ずしも測定に結びつくものではなかった。

◇ガリレオは1594年に、ヘロンの『気学』を読んでいる。望遠鏡に関する功績によって名声を得たガリレオは、ほとんど使わず大きな貢献もしていない温度計の発明者としても名声を博している。しかし、他に少なくとも三人の人物が、ガリレオと同様の発明を行っている。一人は、オックスフォード大学で医学の学位を取ったロバート・フラッドというウェールズ人で、ヘロンのサーモスコープについて記された13世紀の写本を読んで温度計を作ったのだった。もう一人はコルネリウス・ドレベルという名前のオランダ人発明家で、温度計も含めいろいろな装置を作ったのであった。

◇他の一人はイタリア人で、サントリョと名のガリレオの友人であった。サントリョは体液医学を定量的に扱おうと試みた。彼は、1500年前のガレノスによる寒暖、乾湿、怒りと冷静といった概念を現代的なものにしようとした。サントリョは体液医学を科学へと発展させるために、新しい科学的な装置を用いようとした。サントリョは、食事をしたり、飲んだり、眠ったり、体操したりした前後に、注意深く体重を測ったのであった。彼は摂取量と排泄量とを記録して、両者の不一致を“無意識の発汗”に求めたのであった。体液医学を“科学的に証明しようとする”サントリョの試みは結局失敗に終わったが、その過程で彼は、代謝活動の研究の基礎を確立したのであった。アレクサンドリアのヘロンが1500年以上も昔に記述したのとそっくりなサーモスコープを用いて健康時の体温からのずれを測るために、サントリョはこの器具に目盛りをつけたのであった。この目盛りのついたサーモスコープは基本的には体温計であり、温度のずれを定量的に測るものであった。彼は体温を系統的に測った初めての人だったのである。

◇現在ではデジタル機器が優勢だが、今も使われている一般的な温度計にはガラス管に封入した液体が使われており、管の外側にはスケールが掘り込まれている。
1700年頃の昔にすでに使われていた水銀は、管内に封入する一般的な液体だが、温度計の中には、水銀の代わりにアルコール、種々の溶液、あるいは水さえも使っていたものもあった。
こうした温度計は、1640年頃、フィレンツェで最初に開発された。
発明の名誉は、トスカーナの大公爵、フェルディナンド二世に与えられている。

【15】華氏 (F) と摂氏 (C)

◇その後の温度計の歴史には興味深いものがあるが、その基礎となる科学につけ加えられたものはほとんどない。

フックは温度計をいくつか作ったし、ニュートンも同じように作った。

◇1701年に、ニュートンは温度計の液体に亜麻仁油を使用し、ゼロから12までのスケールを入れた。

このスケールの両端は、“圧縮された雪が融ける時の温度”と“人体に接触させた時の最高温度”を基準にしている。

◇数年後、デンマークのオーレ・レーマー（光速を初めて測定した人として有名）は、氷の融点と水の沸点とが、よりよい基準になるだろうと考えた。

彼は、両者を7.5と60に決めた。

のちに、ダニエル・ガブリエル・ファーレンハイトという名前の器具製作者が、レーマーを訪ねた。

この人はレーマーのアイデアを採用し、さらに基準を変えたのだった。

融点と沸点は、現在の32と212に決められたのである。

この見かけはいいかげんに思える数値とされた理由は、多分ファーレンハイトが水、氷、それに塩の混合物を零度Fに、彼の体温に近い温度を100度Fに決めたことにある。

◇このファーレンハイトのスケール（華氏）は、イギリスとオランダで採用されたが、他の大部分の国々は、水の氷点と沸点を基準として、これら両点を100分割したスケールを採用した。

セルシウス・スケール（摂氏）として知られるこのスケールの名は、この用法を開拓した主唱者、

セルシウス・スケール（摂氏）として知られるこのスケールの名は、この用法を開拓した主唱者、

アンダース・セルシウスに由来する。

この温度のスケールは、フランス革命後、メートル法の採用によってもたらされた十進法にしたがって目盛りを分割するという方法にうまく合っている。

【16】熱のよりよい理解へ

◇測定は、何を測っているのかを自覚している時、つまり目的をもって測定している時にのみ、興味深いものとなる。

私たちは長さがゼロとか、時間がゼロとかがどんなものか知っているが、温度ゼロは何を意味するのだろうか。

私たちの感覚では、二つの物体のうちどちらがより温かいかということは簡単にわかるが、長さや時間の場合には明確である絶対的なスケール（目盛り）が、温度には欠けているように見える。

“科学的”な方法で温度を測るようになって人々は、自分たちが測っているのは本当は何なのかという疑問を抱くようになった。

このことが、熱のよりよい理解に必要なのであった。

◇ロバート・ボイルは、熱、温度、エネルギーの三者を結びつけることになる実験を初めて行った。

1663年にボイルらは、“自然の知識を増進させるためのロンドン王立協会”（現在、王立協会として知られている）を結成し、27歳のロバート・フックを実験の助手として採用した。フックはいろいろな真空ポンプを作るにあたって、ボイルを手助けしたことがあった。

◇ボイルの実験によって、一定温度の下では、気体の圧力とその気体の体積は反比例するということが証明された。

片方が上がると、もう一方が下がるが、両者の積は同じである。

気体は温度が上がると膨張するので、気体の温度は、圧力と体積に関係しているのである。

ほぼ100年後に、ジャック・シャルルというフランス人が、一定の圧力の下では、風船の中の気体の体積が温度に直接比例することを示し、次の一步を踏み出した。

つまり、体積は、温度と正確に同じ仕方では上がったり、下がったりするのである。

◇1802年には、ジョン・ドルトンとジョセフ・ルイ・ゲイ＝リュサックが、非常に興味深い結論に到達した。

圧力を一定にした場合、零度C付近では、温度が1度C上昇するごとに、最初の体積の $1/273$ だけ増加し、1度C下がるごとに、体積が $1/273$ だけ減少するよう見えた。

10度C上がると、体積は最初の大さの $283/273$ となるし、10度C下がると、最初の体積の $263/273$ となることになる。

彼らが観察したのは、温度が1度C変わると、体積が $1/273$ だけ変化するということであつた。

◇ゲイ＝リュサックは、体積を固定すれば、温度が1度C変わると、気体の圧力が同じ $1/273$ だけ増減することを示したのだつた。

この結果は、さらに謎を生み出した。

気体の圧力、体積、温度の三つは、気体の種類を問わず、相互に関係しているものと思われたのである。

◇この関係はあらゆる気体がある種の共通点をもっていることを暗示する。

ゲイ＝リュサックは、この関係が実験に用いた気体の特性や、実験した場所にはよらないことを確かめた。

彼は自分の研究に対し、注意深く、かつ冒険的であつた。

1804年9月、彼は熱気球に乗って約7000メートル上空まで昇つた。

そして上がったり下がったりしながら空気のサンプルをとり、温度を記録したのである。

◇シャルル、ドルトン、ゲイ＝リュサックら三人の結果が正しければ、驚くべき結論が導かれる。

一定の圧力下の気体は、温度が1度C下がるごとに体積が $1/273$ だけ減るとしたら、体積はマイナス273度Cでゼロになってしまうはずなのであつた。

同じことが、体積を一定にした場合の圧力に対しても成立する。

圧力、体積ともに正の量であるから、ゼロは両者がとれる最小の値である。

したがって、体積と圧力の減少は、マイナス273度Cで終わらなければならない。

温度の目盛りはそこで終わりとなるはずで、これが到達する最低の温度である。

◇これが、絶対零度というアイデアが科学に導入された一件である。

そして驚くことに、この考えは完全に正しく、マイナス273度Cは正しい値である（正確にはマイナス273.16度C）。

◇だが、科学者は誰一人として、マイナス273という数に特別な意味があるとは考えなかつた。

その値までしか温度を定義できないという事実は、すべての気体が共通の性質をもつことを示唆しているが、実際には気体はすべて絶対零度になる遥か手前で液化してしまうと考えられた。

したがって、絶対零度は研究に値する特別なものではないと、科学者たちは考えたのであつた。

【17】 熱素理論の破綻

◇ここで、ある種の行きづまりに到達してしまったのであった。
温度の意味について、さらに進展がもたらされるのには、熱の本質をよりよく理解する必要があった。

熱は他のものと比べて何か異質なもののなのか否か、が問題なのであった。

◇19世紀にまで続いた論争では、多くの人が、熱は可燃物中にある何らかの物質であり、燃える時にそれが放出されるのだと考えていた。

この物質は、ギリシャ語の“可燃性”という意味にあたるフロギストンという名で知られた。

1800年には、ラヴォアジエの実験によって熱には重さがないことが証明されて、熱は熱素と呼ばれるようになった。

ニュートンにより支持され、また、現在の見解に近かった別の学派は、物質の構成要素の素性は謎のままだが、熱はその構成要素の運動によるのだと考えたのだった。

◇いくつかの結果は明らかに熱素理論と矛盾していた。

1807年の実験でゲイ=リュサックは、真ん中に仕切り板を備えた大きな容器を用い、半分を気体で一杯にし、他の半分を真空にした。

この仕切り板を急に外すと、気体は容器全体に急速に行きわたった。

熱素理論によれば、温度は熱素の濃度を測る尺度なのだから、仕切り板を取り外せば、温度は低下するはずであった。

熱素そのものは減少せずに、それが全体に行きわたるからである（同量の気体がより大きな容器にあれば、濃度はより低くなる）。

しかしながら、ゲイ=リュサックは、実際には気体の温度が変わらないことを見出した。

【18】 マサチューセッツからきた伯爵

◇熱を力学的なエネルギーに結びつける証拠が、蓄積されつつあった。

エネルギーを消費すると熱が増加するように見えた。

熱とエネルギーが等価関係にあることを確立した名誉は、ラムフォード伯爵という人に与えられている。

彼は「摩擦によって引き起こされる熱源に関する考察」という論文を書き、1798年の王立協会報に掲載された。

◇1753年にマサチューセッツに生まれ、渡英の後に、さらにヨーロッパ大陸へ渡ったラムフォードは、砲身を作る際に、中心部を削り広げるとともに熱が発生するという現象について考え始めた。

そして、金属の削り屑が、元々の金属と同じ熱的な性質をもつことに気がついた。

1グラムの削り屑も、金属の塊1グラムも、温度を1度C上げるのに同量の熱を要したのである。金属には違いがなかった。

では、どこから熱がくるのだろうか。

ラムフォードは、熱源は穴をあける際の仕事に由来しなければならないのだ、と考えた。

彼の見解では、熱は、ラヴォアジエが論じた不変の熱素ではなくて、生成したり、消えたりする何かなのであった。

力学的エネルギーが熱を生成し、また、熱が力学的エネルギーを生じるのであった。

ラムフォードはさらに、熱は運動や内的な振動に関連するものだと考えた。

【19】 蒸気力

◇熱の本質に関する論争が続いている間に、力学的エネルギーと熱エネルギーとの間の実用的なつながりが、蒸気機関の導入を通じて、産業革命の先導役を果たすこととなった。

最初、1712年にトマス・ニューコメンによって作り出され、後にイギリス人により完成された蒸気機関は、工業と流通の世界を一変させた。

◇蒸気機関の開発ではイギリスに主導権があったけれども、この蒸気機関の驚くほど簡単な原理を初めて公式化したのは、フランス人のサディ・カルノーだった。

この仕事で、彼は最終的に、熱力学の第二法則として知られるようになる原理にも到達した。

◇1824年に、28歳のカルノーは蒸気機関の勉強を始めた。

彼は、蒸気機関を循環的に作動する機関として模式的にとらえた。

水が沸騰し、蒸気になり、それがシリンダーへ入ってピストンを押す。

ピストンは一往復して、再び元の位置へ戻る。

蒸気は冷えて冷却器へ戻され、そこから水は再びボイラーへ戻って行き、そこでまた循環が始まるのである。

◇カルノーは、蒸気機関は、流れくだる水によってパドルを動かす水車と類似のものだと論じた。

水が落下する距離が長くなると、水車が速く回転して仕事の速度が上がる。

カルノーが結論したのは、蒸気機関がする仕事の速度が、熱源と熱の捨て場、つまりボイラーと冷却器との間の温度差だけに依存するということであった。

温度差は水が水車に落ち込むときの高低差に相当するのである。

◇カルノーは、蒸気機関がどのように働くのか、完全には見通していなかったし、彼の類推は完全でもなかった。

例えば、カルノーは熱は消滅しない、つまり、熱の正体は保存される熱素だと考えた。

彼は、取り込んだ熱と同じだけの量が解放されるとしたのである。

この考え方は当然、彼が描いた水車のイメージに合っていた。

◇35歳のカルノーのコレラによる悲劇的な死後、間もなく、熱素は存在しないことが徐々に明らかになった。

熱はたくさんあるエネルギーの一つにすぎず、いろいろな形のエネルギーの総和は保存されるのである。

このことは、熱力学の第一法則として知られるものとなっている。

蒸気機関の場合には、ボイラーで取り込まれた熱量は、冷却器により取り去られる熱量に等しくない。

理想的な機関（エンジン）がする仕事は、両者の差に等しいのである。

【20】 ジュールの実験

◇熱力学の第一法則を立証する最初の“現代的”な実験は、ジェームズ・ジュールというジョン・ドルトンの門下生によって実現された。

ジュールは、導線を通る電流が熱を発生することを示した。

この実験は、電気と熱が関係していることを示唆した。

ジュールは、電流が導線から熱素をしばり出したとは考えなかった。

◇次に、ジュールはラムフォードの実験を改良した。

彼は、容器に浸された水掻（か）きが中心の棒につながった、小さな攪拌器を作った。
そしてこの棒には、ゆっくりと落下する錘（おもり）が滑車を介して連結された。
簡単に言うと、錘が落下すると水掻きが回り、水が攪拌される。
ジュールは正確な温度計を用いて、落下していく錘の位置エネルギーの変化により、どれだけの熱が水中に生成されるかを示したのであった。
液体を変えて実験をくり返しても、発生する熱量は同じであった。
この実験はエネルギーが保存されることを実証するものだと、彼は考えた。
熱素は存在し得ないのであった。

◇1847年に、ウィリアム・トムソン（後のケルビン卿）が、この実験に関するジュール本人の講演を聴いた。

グラスゴー出身の23歳のトムソンは、ジュールの主張に当惑した。
それはカルノーのアイディアと矛盾するように思われたからである。
このアイディアは当時、イギリスではあまり知られていなかったが、パリで研究したことがあったトムソンは、その矛盾をジュールに告げたのであった。
彼ら二人は、熱機関について、何が正しく、何が謝りであるかを協力して考えるようになった。

【21】熱機関の効率

◇カルノーと同様にトムソンは、蒸気機関の一サイクルを通じて、流入する熱が流出していく熱に等しいと考えた。

◇二、三のやりとりを通してジュールはトムソンに、それが間違いであることを確信させた。
だが、彼らは、「一サイクルの仕事」割る「熱の供給量」が、熱源の温度と熱の捨て場の温度の二つだけによって決まるというカルノーの考えが正しかったことも悟った。

◇ジュールの実験結果とカルノーの考えを組み合わせることにより、蒸気機関の真の効率——「仕事の出力」割る「熱の入力」——は1（100%）ではないことが明らかとなった。
さらに、その効率の減少分は、「捨てられる熱」割る「熱源から流入する熱」、即ち「熱の捨て場の温度」割る「熱源の温度」によって表されることも明らかになった。
熱機関の効率が温度差によって決まるというカルノーの見解は正しかったのである。

◇当然のことだが、この場合温度は、正しい目盛りを用いて測られねばならない。
何を正しいとするかは、ドルトンとゲイ＝リュサックの実験にヒントがあった。
彼らの実験では、真のゼロは、マイナス273度Cであった。
そうすると、この絶対目盛りでは、ゼロ度Cは273度に、水の沸点は373度にとられるべきである。
熱源の温度が100度Cで熱の捨て場の温度が7度Cである完全に循環する熱機関は、 $1 - \frac{273}{373}$ の効率で働く。

◇効率を100%に等しくするやり方、つまり熱を力学的エネルギーに完全に変換する機械を作る方法はたった一つだけである。
それは、熱の取り去り口の温度を絶対零度にするというものである。
エネルギーはどんな形をしていても原理的には同じものである。
だが、力学的エネルギーは100%の効率で熱エネルギーに変換できるのに対して、熱エネルギーは熱の捨て場の温度が絶対零度の時にしか、100%力学的エネルギーに変換できないのである。
もちろん、温度は絶対零度以下になりえないのだから、効率が100%以上になることは絶対にならないのである。

◇実用的には、蒸気機関の効率は、熱源と熱の捨て場との間の温度差を大きくすることにより、改善が可能である。
熱源の温度は水が水蒸気になる点である 373 度で一定だと思われるかもしれないが、実際は水の沸点は圧力がかかることによって上昇する。
ジェームズ・ワットはすでにこのことに気づいていた。
彼の蒸気機関になされた改良の一つは、圧力をかけて蒸気を作り出すことであった。

◇エネルギーの単位は、ジュールと呼ばれており、導線内に生じる熱はジュール熱と呼ばれている。
ゼロ度 C を 273 度と定義した温度の目盛りは、ケルビンと呼ばれている。
ウィリアム・トムソンは、晩年、ケルビン卿という称号をもつようになったからである。

【22】熱力学の三つの法則

◇熱の性質、熱と他の形のエネルギーとの関係、熱の伝導手段、熱と温度との関係に関する研究は、19 世紀に熱心に進められた。
それは、熱に関わる問題を大まかに捉えた学問、今でも熱力学として知られている。
当時の科学者の多くが、熱力学を基礎づける原理を定義しようと試みた。
それは、より明確な定義があれば、熱の問題につきまってきたあいまいさを解決してくれると望んでのことであった。

◇熱力学の第一法則は、熱が単にエネルギーの一形態にすぎず、全体としてエネルギーは保存されることを表している。
第二法則は、熱エネルギーを力学的エネルギーに 100%の効率で変換する機械を作ることはできないのだ、と主張している。
第一法則が明らかになる以前に、第二法則の本質的な部分がカルノーにより見出されていた。
学校では論理的な順序から、このような順序で呼ばれている。

◇多くの科学者がエネルギーの保存について考えてきたが、明確に第一法則を実証した実験は、ジュールと、ドイツのヘルマン・フォン・ヘルムホルツとによって独立に行われた。
彼ら二人だけでなく、ユリウス・マイヤーという人も、発見の名譽を担っている。

◇熱力学の二つの法則を理解し定式化しようとする試みが、いくつかの興味深い概念をもたらした。
その中でもエントロピーの概念ほど影響を及ぼしたものはないだろう。
この概念は、19 世紀半ばのドイツの科学者、ルドルフ・クラウジウスにより導かれた。
クラウジウスは、力学的エネルギーが熱よりもある意味で“高次の”エネルギー形態である理由と、熱を力学的エネルギーに 100%の効率で変換することが不可能な理由とを理解しようと努めた。
この努力が実を結び、彼は系の秩序の程度と過程の可逆性とを結びつけることに成功した。

◇ここに、二つの容器があって、等量のエネルギーをもっているとする。
片方は秩序ある状態にあり、もう一方が無秩序の状態にあるとすると、起こる過程はただ一つ、秩序から無秩序へと移行するだけである。
つまり、過程は可逆的ではないのである。
クラウジウスは、力学的エネルギーの方がより秩序的だと考えた。
坂をころがり落ちる物体は、摩擦によって止まってしまうが、この摩擦から発生した熱は、この物体を坂の上まで戻すのに使うことはできないのである。

◇クラウジウスは、熱力学へのエントロピーの適用を、当時大きな衝撃を与えた二つの文に要約した。
(1) 第一法則——宇宙のエネルギー量は一定である

(2) 第二法則——宇宙のエントロピーは極大に向かう

この二つ目の言明は、「全体として、無秩序さは常に増大する」というふうに言いかえることもできる。

さらにヘルマン・ネルンストは、熱力学の第三法則としても知られる、ネルンストの定理を打ち立てた。

この定理は、ある系のエントロピーは、その系の温度が絶対零度に近づくにつれて、ゼロになっていくと述べている。

絶対零度は、即ち、完全な秩序をもつ状態なのである。

◇これら三つの法則の意味は、ゲイ＝リュサックの気体に関する考察に立ち返り、分子運動の研究を通じて 1850 年代後半に得られた考え方をい用いると明らかとなってくる。

1857 年に、クラウジウスは「我々が熱と呼ぶ運動の一形態」と題した影響力の大きな論文を著したが、これは平均の分子運動を熱の量と関係づけるものであった。

◇その二年後の 1859 年に、19 世紀を通じて最も優秀な理論物理学者だったジェームズ・クラーク・マクスウェルが、新たな統計的方法を使って、同じ問題を取り上げた。

ケンブリッジの学生であった 1855 年に、マクスウェルは、土星の輪が、液体でも固体でもあり得ないことを指摘した。

この輪の安定性は、輪が互いに作用し合う多数の小さな粒子からできていることを意味していた。1859 年にマクスウェルは、同様の統計的な方法を、気体中の分子の一般的な解析に適用したのだった。

◇分子が容器の中で、互いに衝突したり周囲の壁と衝突したりしながら運動している時に、これら分子はどのような運動をとるかを、彼は予想しようとした。

通常の圧力と温度の下にある適当な大きさの容器には、10 億のそのまた 10 億倍の数の分子が含まれている。

しょっちゅう他の分子と衝突しているので、任意の一個の分子の速さは常に変化している。

したがって、意味のあるのは、分子の平均速度と速度分布だけである。

◇何種類かの気体を入れた容器を考えた時、分子の速さを分子数に対してプロットすると、鋭いピークが現れることにマクスウェルは気づいた。

言いかえると、大部分の分子は、ある特定の狭い範囲の速度で運動するのである。

速さの平均値は分子の種類ごとに違っているが、運動エネルギー、つまり、分子の質量に速さの二乗を掛けた結果を 2 で割った物理量、の平均値は、すべての分子でほとんど同じなのである。

熱的な平衡状態にある容器内では、すべての気体の温度も同じである。

そこで考えを進め、温度が分子の平均の運動エネルギーの尺度であると仮定し、この仮定が、絶対零度の意味を説明するのに、いかに役立つかを見ることにしよう。

◇絶対零度は今や謎ではない。

運動エネルギーは常に正である。

正の量の平均値は常に正であるから、平均値のとれる最小値はゼロである。

したがって、このゼロは全運動エネルギーがゼロの時にのみ達せられる。

多数のゼロの平均はゼロなのである。

すべての分子がゼロの運動エネルギーをもっている状態、つまり、すべての分子が静止の状態にある点が、マイナス 273 度 C なのである。

◇絶対零度はすべての分子が完全に静止した状態である。

温度と分子の運動エネルギーとがうまく結びついたのである。

すべての分子を静止の状態に置こうという試みは、現代物理学の大きな挑戦の一つになっている。事はそれほど簡単ではない。

この挑戦は、量子力学のあいまいさに由来する、あらゆる概念的、現実的な問題を招く。

◇熱力学の第一法則の意味は単純である。

容器内の熱は単に、全分子の運動エネルギーの総和なのである。

熱エネルギーは運動のエネルギーを言いかえたものにすぎない。

つまり、非常に多くの分子のもつごく小さな力学的な運動エネルギーを加え合わせたものである。

熱力学の第一法則は、このエネルギーの保存則なのである。

エネルギーは生成も消滅もしないのである。

◇ボイル、シャルル、それにゲイ＝リュサックの諸法則によれば、分子が容器の壁に当たると圧力が生じる。

温度が高くなれば、分子はより速く運動するようになり、圧力も高くなる。

熱素理論を否定したゲイ＝リュサックの実験も、簡単に理解できる。

容器を二つに分けて、片方を真空にし、もう一方に気体を入れるとしよう。

仕切り板を取り除くと、片方にあった分子は容器全体に広がるが、分子の平均の速さは変化しない。

この時、気体温度も同じままである。

温度は分子の平均の運動エネルギーであって、熱素の密度ではないからである。

◇熱力学に精通した人なら、ジュール＝トムソン効果を思いおこし、戸惑うかもしれない。

高圧下の気体がノズルを通して低圧の場に出ていくと、周囲の温度は下がるのである。

この場合には、膨張する気体は仕事をし、エネルギーを失うため、温度は下がり、その近傍から熱を奪うことになる。

しかし、これと対照的に、真空中への膨張では、エネルギーは失われず、温度は変化しない。

【23】ボルツマンの公式

◇マックスウェルが分子運動の分析に成功して間もなく、ウィーンのルートヴィッヒ・ボルツマンは、その分析が無秩序と可逆性の理解にどのように役立つかについて考え始めた。

何年もかかって彼は、エントロピーに関するクラウジウスの考え方に対して統計的解釈を与え、熱力学の第二法則を原理的に説明することに成功した。

◇熱が高温側から低温側へと流れ、その逆には流れないことの説明は、分子運動の概念を用いて説明することができる。

容器内の分子が互いに衝突するとどうなるか。

速い分子は減速し、遅い分子は速くなるが、その逆は決して起こらない。

このことは、より熱い部分が冷たくなり、より冷たい部分が熱くなることを意味する。

その結果として、熱的な平衡状態が達せられるのである

◇ボルツマンのレリーフ像に刻まれているのは、エントロピーに関するボルツマンの公式

$S = k \log W$ である。

この式で、 S はエントロピー、 k は現在ボルツマン定数と呼ばれている数、 W はその系が取り得る状態の数である。

◇現在ではエントロピーの概念は、物理学実験以外でも、あらゆる形で私たちの生活に浸透している。

二個のサイコロを投げると、合計が3よりも7のほうが出やすい。

7は6と1、5と2、それに4と3の三つの場合があるのに対し、3には2と1の組み合わせしかないからである。

つまり、7のほうが大きな“エントロピー”をもつ。

取り得る状態の数が多ければ、それだけ出やすいということだ。

◇気体を充たしたゲイ＝リュサックの容器に立ち返って、仕切り板を外した時、どのように気体が広がるかを思い出してみよう。

分子の取り得る運動経路の数が多くなるため、エントロピーは増加する。

広がった後の気体が、容器の片方側にすべて戻るのを見る確率は、分子数が増すにつれて急激にゼロに近づくのである。

このような偏りの発生は、エントロピーを減少させ、分子の運動を厳しく限定することに相当する。

◇気体分子のすべてを、容器の片方側に戻すことができるだろうか。

このようにする、一番簡単な方法は、容器の右端に、例えばピストンを設置し、ゆっくりとこれに圧力を加え、気体が元の状態に戻るまで、分子を左側へと押し込むことである。

これはうまい方法である。

だが、この圧縮によって気体は熱せられるから、分子を元の状態に戻すには、この余分な熱を取り去らなければならない。

◇もし、この熱を 100%の効率で変換できて、それをピストンを動かすのに利用できたとしたら、容器内の気体の膨張と圧縮を繰り返しながら、永遠に運動する機械を作ることができよう。

しかしながら、これは不可能で、熱の仕事への変換は 100%の効率では絶対にできないのである。

気体のエントロピーは減少するが、ピストン、冷却装置、それに容器の全体としてのエントロピーは増加するのである。

【24】 エントロピーと生命

◇ボルツマンにより始められた確率と情報の関連性の追究は、今では、熱力学から遠く離れた情報や通信の理論の領域にまで広がっている。

さらに、この関連性はいくつかの興味ある課題も提起している。

無秩序が増大したり、宇宙のエントロピーが常に増大するというクラウジウスの考えにしたがうと、生命の秩序ある発展、遺伝情報の伝達や、そうした情報の複製はいかにして可能となるのだろうか。

これは厄介な問題である。

◇生命体は絶えず栄養分のエネルギーを力学的なエネルギーと熱に変えることによって、驚くほどの秩序を維持している。

死後、代謝的な変化は終息し、有機体の無秩序さとエントロピーはともに急激に増加する。

ところが、生命の誕生とその維持には、栄養分を無秩序な状態からエントロピーのより小さい秩序ある状態へと、絶え間なく変化させるという過程が含まれている。

◇このように、個々の生命体のエントロピーは減少するのに、他の個体、植物、動物、海洋、大地など生命体を取り巻くすべての環境を併せて考えると、エントロピーは全体として常に増加する。生命は確かに存在し得るが、それでも、クラウジウスは正しかった。

宇宙のエントロピーは確かに増加しているのだ。

◇正しく考えれば、生命は物理学と化学の基本原則とは矛盾しないのである。

それどころか、生命システムに対する 19 世紀末の新しい見方は、個々の要素ではなく集団としての性質もとらえるというエントロピーの考え方にうまく合致している。

◇フランスの分子生物学者、フランソワ・ジャコブは、熱の性質に関する新たな考え方、熱運動を統計的に理解するという方法、そして万物を支配するエネルギー保存則が、生命に対する科学者の考え方を変えたのだと語っている。

1900年には科学者たちは、もはや生命力や熱素などといった言葉を口にしなくなってしまった。エネルギーが基本的概念となったからである。

◇新しい考え方が出るたびに、科学は劇的な変化を繰り返してきた。その新しい考え方の一つとして、地球は昔から多くの温暖期や氷河期を経験してきたという考え方が生まれた。

科学はいかなる分野にあっても、新しい謎を次々と明らかにしてきた。

そして今や、科学者たちは将来に目を向け、近い未来や遠い未来の地球の寒暖がどうなるのかとか、それが生命にとってどんな意味をもつのかといったことを推測するようになってきたのである。

4. 地球を読み解く

【25】地球物語

◇2000年7月の終わりに、ロシアの砕氷船ヤマル号がノルウェー、スピッツベルゲンの母港を出航し、北極点へ向かった。

この船には数人の科学者と旅行者の一団とが乗っていた。

旅行者たちは北極圏を眺め、北極点に立つことを望んでの旅立ちだった。

ヤマル号は約3メートルの厚さの氷でも砕いてしまう装置を備えていた。

だが、北方には海面が広がっており、時折出会う薄い氷の層を砕いただけだった。

乗船者たちはあっけにとられてしまった。

GPS（全地球測位システム）が、船が北極点に到着したことを知らせた時、船は海水に取り巻かれていたのだった。

そこに氷の姿はなかった。

◇晴れた空の下、灰色のかもめが頭上を舞っていたが、かもめは以前はこんな北方で目撃されたことはなかった。

100人ほどの旅行客が船から降りて氷上に一步をしるすために、ヤマル号はさらに10キロメートルも固い氷を探しまわらなければならなかった。

今までに何度も北極点へ行った経験がある船長は、こんなところに海面が広がっているのを一度も見ることがないと語った。

ハーバード大学の海洋学者、ジェームズ・マッカーシーは、このヤマル号の旅行で講師を務めたのだが、彼は驚きと不安を表すのが精一杯だった。

◇北極地方の温暖化は著しい。

コロンビア氷河は、10年前には、60メートルもある高い氷壁を有していた。

その傍へと船を進めれば、すばらしい眺めに立ち会うことができた。

しかしそれ以後、25キロメートル以上も氷壁が後退してしまって、そこにはただ、むき出しの大地が広がっている。

◇かつてアラスカの広い領域を覆っていた永久凍土も融け始めている。

アラスカの都市、フェアバンクスでは、今では夏の気温が何週間にもわたって25度C以上に達する。

科学者たちは、平均気温が短期間に、アラスカ、カナダ北部、それにシベリアで少なくとも約3度C、北極地方のあちこちで約6度Cほど上がってしまったと言っている。

北アメリカ最大の陸棲肉食動物であるホッキョクグマは、20年前と比べて約10%も数が少なくなってしまった。

もともと短い彼らの狩りの季節はさらに3週間も少なくなってしまうのである。

◇北極が温暖化しつつあることに疑問の余地はほとんどない。

ヤマル号の講師だったマッカーシーは、次のように言っている。

「本当に異常だったのは、二週間の間、まともな氷に一回も出会わなかったことだ。

極点に到達し、海水が広がっているのを見た時、海の様子は私たちがどこでも見かける、ありきたりの海にすぎなかった。

これは一過性の現象とは思えない状況であった」。

◇極氷の融解は気がかりなことだが、では、実のところ、どれほど重大なことなのだろうか。

地球規模の温度の変動はどれほどなのだろうか。

この変動に人類はどれほど関与しているのだろうか。

あるいはまた、この変動は自然界のゆらぎの一部にすぎないのだろうか。

気候の変動のどれほどが可逆的なのだろうか。

資源の利用法をどのようにしたらよいだろうか。

その決定は誰がするのだろうか。

◇これらは皆、人間が直面する最も難しい問題の一つである。

これらの問題への答えは、はっきりとはわからない。

私たちにできることは、未来への選択肢を一つずつたどりながら、何が起るかを推測することだけだ。

◇はっきりと答えられるやさしいことから始めよう。

ヤマル号での観測結果はどの程度異常なのか、そして観測結果がどれほど北極点の実際の気候を反映しているのかを考えてみよう。

極域を航行する潜水艦により測定された北極海の氷の厚さは、数十年前と比べると60%しかない。私たちが現在経験している気候温暖化は、極領域にいちばん顕著に現れているものと思われる。

◇北極の温暖化は局地的なゆらぎなのだろうか。

それとも、地球全体にわたって起こっているのだろうか。

比較のため、南極における変化を見てみよう。

明確な温暖化の証拠は南極にはあまりないが、南極の温暖化の方が他の地域へ影響を及ぼす可能性が高いので、その代償はかなり大きくなる。

すでに浮かんでいる北極の氷の融解は、海水面の変動を引き起こしはしないが、南極の氷が融ければ、大陸から滑り落ち、海中に入るので、世界中で海水面が上昇することになる。

◇南極の大きな氷塊のうち、最も崩壊しやすいと考えられるのは、地球の最南端に位置する南極西側の氷床（WAIS）である。

この近くで大西洋と太平洋がつながっている。

この大きな氷床はすでに一部海上に浮かんでおり、ロス棚氷を形成している。

この氷床は大陸にある膨大な氷が海に落ちないように栓の役割を果たしている。

この氷塊の容積は約400万立方キロメートルと見積もられているが、これが融けたとなると、地球規模の洪水が起こり、世界中の大部分の港は消滅し、平均約5メートルもの海水面の上昇をもたらすことになろう。

バングラデシュは水面下になろうし、オランダは危険にさらされ、フロリダ州とルイジアナ州のかなりの部分はなくなっていよう。

◇南極西側の氷床は、たとえ融けなかったとしても同じような大災害を引き起こす可能性がある。

大陸から滑り落ちるだけで、海面下に沈んだ体積分の海水を押し上げる。

このような破滅を引き起こす連鎖がすでに始まっていると考えると、恐ろしくなる。

大きな氷床の完全な消失は最悪のシナリオだが、これは私たちが予測しなければならない多くの危険の一つにすぎない。

危険がいろいろと絡み合っているので、予測は難しい。

ある地点の気温の上昇は、どこかに環境の破壊を引き起こすような気候条件を誘発し得るのである。気温が上昇すると、海水面が上がり、大きな影響を及ぼす。

【26】地球表面温度に四つの主要な原因

◇地球温暖化や地球寒冷化は複雑な問題で、あらゆる原因を調べることが必要である。地球表面の温度には、四つの原因が絡んでいる。

◇第一は太陽で、これが主要な熱源である。

地球が太陽に向かって頭をもたげるのが夏で、逆を向くのが冬である。

だが、地球はふらつきながら太陽の周りを回っているので、事はずっと複雑になる。

◇二つ目は、地球内部で直接生成される熱である。

この熱は、火山噴火を見れば、目に見える形でよくわかるし、また、鉱坑を深く降りていくと温度が上がることからわかる。

それは主に、地球の表層部にある放射性元素の崩壊と、地球形成期に蓄積された中心核の熱から生成されるのである。

これらの熱の発現は火山のように見た目は凄まじいが、日光が地球にもたらす熱と比べれば、取るに足りないほどわずかである。

◇三つ目として、海洋が地球規模の温度変化に大きな影響を与えるのだが、それは主に、コンベアベルトのように世界中を膨大な水が循環することによる。

即ち、海流である。

海流は数百年にわたって研究されてきているが、海流というよりも上昇流とでも言ったほうがよいエルニーニョのような、私たちにあって新しい現象も含んでいる。

◇四つ目として、地球規模の温度に対する一番大きな影響は、大気による地球の被覆効果である。これは地球を有害な放射線から保護し、太陽が作り出した地球の暖かさを、宇宙空間に逃がさないようにする覆いなのである。

◇このほかにも、気候変動に影響を与えるものがある。

小惑星との衝突は特に劇的な影響を及ぼす。

この場合には、気候変動の主原因は、局地的な現象と考えられる衝突自体にあるのではなく、衝突後に大気中へ放出されるチリにある。

◇まとめると、太陽、地球、水、それに大気によって、地球の温度は説明できるのである。

しかし、これらの要因は同時に影響を及ぼすので、それにより生じる気候変動を理解し、予測することは難しいのである。

スーパー・コンピュータの利用によって、予測がかなり信頼できるようになってはいるが、長期にわたる正確な予報を得るには、今後の研究の成果を待たなければならない。

【27】温室効果、その科学

◇大気は、気候を左右する太陽、海、地球の複雑な相互作用にさらなる影響を及ぼす。

それをもたらすのは、広く知られているが、しばしば誤解されている温室効果である。

◇温室の熱源は、ガラスを通して差し込む日光である。

日光を含めて、あらゆる放射は、エネルギー密度、即ち、強度と、周波数によって特徴づけられる。周波数は光源が一秒間に送り出す波の数である。

植物はこのエネルギーを取り込み、より低い周波数で再放射する。

温室内の大気は、植物から生じた放射の一部を吸収し、熱を帯びる。

ガラスの主要な機能は、温室内の暖かい大気が冷たい外気と混ざらないようにすることである。

◇同様に、ずっと大きなスケールで、地球の大気も温室のような働きをしている。

日光は大気中へと入ってきて、一部は雲によって反射されることもなく、地上へと到達し、大地を暖めることになる。

大地は再放射するのだが、大気は熱の散逸を妨げる。

地球の大気はガラスそのものである。

しかし、なぜ大気はフィルターのように働き、太陽からの放射は通すが、地面からの放射は遮るのだろうか？

◇この答えは、物理学と化学の両者が入り交じったところにある。

これを理解するには、大気内の分子がもつ個々の性質とともに、放射、熱平衡、気温を決めるいくつかの法則を知らなければならない。

◇ヨーゼフ・シュテファンというウィーンの物理学者が、1879年に放射の法則を発見した。

彼は、すべての物体が放射する電磁波の単位面積当たりの強度は、その物体の温度だけに依存することを発見したのだ。

強度の温度依存性は極めて強く、温度の4乗に比例している。

温度が二倍になれば、放射のエネルギー密度（即ち、強度）は、 $2 \times 2 \times 2 \times 2$ 、つまり、16倍になる。

もちろん、このことは、温度が正しいスケールで測られた時にのみ正しい。

つまり、このスケールはケルビンで測った温度で、ゼロは摂氏でマイナス273度である。

すべての物体が電磁波を放射するのだが、シュテファンの法則によれば、温度が下がるにつれて、放射は急激に減少し、絶対零度でゼロになるのである。

◇シュテファンの学生には、ルートヴィッヒ・ボルツマンがいた。

ボルツマンは熱平衡にある分子の統計的な挙動に関するマクスウェルのアイディアを取り上げて、改めて検討し、分子運動を説明する上でエントロピーの概念を導入したのだった。

ボルツマンは、10年後に、マクスウェルのアイディアに基づいてシュテファンの法則を拡張した。

この法則は現在、シュテファン=ボルツマンの法則として知られている。

この法則は、ある温度の物体の表面、1平方フィートまたは1平方メートルから、どれほどの放射が出ていくかを予測してくれる。

例えば、太陽の表面温度と、太陽の表面積がわかると、太陽の総放射量がわかるのである。

◇だがしかし、シュテファン=ボルツマンの法則は、放射がどんな周波数分布をもっているかについては、何も語ってくれない。

これは、1894年にウィルヘルム・ウィーンが提唱した法則から導かれる。

この法則は、放射強度を周波数に対してプロットすると、放射体の温度（ケルビン単位）に比例する周波数のところに、非常に鋭いピークを示すというものである。

◇温度に応じてどの周波数で放射の強度が最大になるかを考えると、地球と太陽は興味深い対照をなす。

地球が放射する放射強度のピークがどこに位置するかは観測できないが、このピークが遠赤外のところにあることはわかっている。

それは、地球の温度が実際に測れるからである。
他方、太陽の温度は直接測れないが、太陽放射の強度のピークがどこかは観測できる。
このピークはちょうど、可視領域の真ん中にある。
人間の目は確かに、明るい日光で最もよく機能するように何百万年をかけて進化してきたのである。
目は太陽の表面温度に対応しながら形成されたといっただけであろう。
太陽の温度が今よりもごくわずかに低かったら、人間の目はそれに応じた適応をしていたであろうから、もう少し低い周波数のところに最も鋭敏であったろう。
太陽の表面温度は、太陽放射の強度対周波数の曲線に見られるピークからわかる。
この温度は 5800K である。
太陽表面の温度がわかると、シュテファン=ボルツマンの法則から、太陽の放射量を決定できる。
ちょっとした幾何学的な考察をすれば、どれほどの太陽放射が地球に届くかがわかる。

◇では、地球はどれほど再放射するのだろうか。
熱平衡は流入する熱と出ていく熱とが同量であることを意味している。
どれほどの再放射がなされるのかがわかると、次いで地球の温度が決まる。
熱の出入りが釣り合うとした簡単な計算では、地球の平均温度がマイナス 18 度 C、つまり 255K となる。
だが、実際の温度は、約 16 度 C である。
どうして、こんな差が出るのだろうか。

◇この差が温室効果によるものだというのは正しいが、事はそんなに単純ではない。
大気は、体積にしてほぼ 78% が窒素、21% が酸素、残り 1% がアルゴンである。
足すと 100% となる。
これら三種の気体はすべて、流入してくる太陽放射と出ていく地球放射をどちらも透過させるのである。
例のごとく、悪魔は細部に宿っている。
これら三種の気体は、大気のほぼ 100% を占めるが、これですべてというわけではない。

◇地球の温度の計算値と実際の値との間の約 34 度 C の差は、微量の水蒸気、二酸化炭素、メタンや他のガスが大気中にあることで起こる。
水蒸気は、赤道の最も多湿な大気中に体積にして 4%、南極では 1 ppm (part per million) 以下含まれている。
二酸化炭素は大気中、体積にしてわずかに 360 ppm を占めるにすぎないが、地球温暖化に関する国際的大論争の的となっている。
二酸化炭素と他の「温室効果ガス」は、それら特有の化学的性質のために重大な役割を果たしているのである。
それは、この気体が、太陽放射には透過性をもつが、赤外放射はよく吸収するという分子構造をもつからである。
これらの気体は、いわば一方進行のフィルターで、地球温度を 34 度 C も引き上げる原因となっているのである。
これらの気体の存在量が増え続ければ、将来、地球全体の気温を上昇させる原因となるであろう。

【28】温室効果、その歴史

◇大気については、1750 年以前にはあまりよくわかっていなかった。
二酸化炭素は 1750 年代にジョセフ・ブラックにより、窒素は 1772 年にダニエル・ラザフォードにより発見され、そして数年後に酸素がカール・シェーレとジョセフ・プリーストリーにより同定されたのであった。
1781 年には、ヘンリー・キャベンディッシュが、大気は 79% の窒素と、21% の酸素からなる

ということを導いたが、この値は今日の値と非常に近い。

◇温室効果は、フランスの数学者、ジャン＝バチスト・ジョセフ・フーリエの論文に初めて記述されている。

彼は長年にわたり熱伝導の問題について研究し、その研究成果を 1822 年に出版した『熱の解析的理論』にまとめ上げている。

この本は一世紀以上にわたって権威を保ち続けた。

この本の出版後、二、三年して、フーリエは自分の関心を、地球が放射する熱を捕まえるのに大気が果たす役割に向けたのであった。

彼は、ガラス容器内の空気に及ぼす影響と比較する上で、初めて温室という喩えを使った。

◇フーリエの喩えは有用であった。

だがしかし彼は、“通常の大気”の中のどの気体が熱を捕まえるのかについては研究しなかった。

ジョン・ティンダルにより、熱伝導と放射の物理学が大気化学と初めて結びつけられた。

1850 年代後半に、ティンダルは、大気の性質について系統的に調べ始めた。

窒素と酸素は入射してくる太陽放射と出ていく地球放射の両方を透過するが、水蒸気、二酸化炭素、メタンは地球から再放射された赤外線を吸収することを、彼は見出した。

過去の氷河時代に関するアガシーの見解に通じていたティンダルはさらに、何が氷河時代を引き起こしたのかを考えるようになった。

二酸化炭素、水蒸気、それにメタンの量の変化が、「地質学者たちの研究が明らかにした気候の突然変異すべて」の原因となっているのだと、彼は推察したのであった。

◇キャベンディッシュからフーリエへ、それからティンダルへと進んできたが、次の大きなステップは、1890 年代に、スウェーデンの物理化学者、スヴァンテ・アーレニウスによってもたらされた。

ティンダルは二酸化炭素、水蒸気、メタンが地球温暖化を導くのだと考えたのだが、アーレニウスは、これらの気体がどのくらい地球温暖化を生じさせるのか決定しようと考えた。

彼の動機はティンダルの場合と同じであった。

つまり、過去の氷河時代が温室効果ガスの減少によるのかどうかを知ろうとしたのである。

◇アーレニウスは、二酸化炭素の増加による地球温度の上昇の予想値を算出しようと試みた。

水蒸気によるフィードバック効果を考慮に入れて、アーレニウスは、大気中の二酸化炭素の量が二倍になると、地球の平均気温が約 5 度 C 上昇すると予測したのであった。

◇この結果は、今から 100 年ほど前に導かれたものだが、温室効果ガスによる地球温暖化を初めて見積もったものである。

当時、この結果は未来への警告とは考えられなかった。

◇1950 年代にいたるまでは、この問題は大きく扱われることはなかった。

またアーレニウスは、大気中の二酸化炭素が海水の表面層で吸収されて、海水に急速に溶け込んでいくことに気づいていなかった。

◇ところが、当時、カリフォルニアにあるスクリップス海洋研究所のロジェ・ルヴェルが研究を始めたところ、(1950 年代当時の研究が) この海水への吸収が大きく見積もられすぎていることがわかった。

ルヴェルの報告によれば、大気中に増加した二酸化炭素の 80% は、そのままとどまるようであった。

ルヴェルは、この二酸化炭素量の増加を、「人類による最初の大きな全世界規模の地球物理学的実験」と記述し、警告を発したのであった。

◇1950年代の後半に、地球温暖化に関心をもつ数少ない科学者の一人であったチャールズ・キーリングは、大気中の二酸化炭素の量を連続的に監視し始めた。
もう一人の科学者、ギルバート・プラスは、20世紀末までに世界の気温が約1.7度C上昇すると予測した論文を『サイエンティフィック・アメリカン』誌の1959年7月号に発表した。同誌はこの論文に次のような見出しをつけている。
「人類は毎年、大気中に何十億トンもの二酸化炭素を排出して、自然界の過程のバランスを壊している」。

◇今日では、地球温暖化は、国際的な危機的状況にまで立ちいたっている。
国連が創設した気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の任務の一つは、科学的証拠を検討して地球温暖化の危険性を見積もり、五年ごとにその結果を世界の人々に知らせることである。
1997年の委員会は、人口増加、経済的発展、それに技術の進展を見据えて、今後の100年にわたる大気中の二酸化炭素の上昇について、三つの推定値を示した。

◇まず現在の360ppmが、1750年当時のおおよその値277ppmと比較された。
1750年が基準に選ばれたのは、この年が産業革命と最初の大規模な森林伐採の始まった年にあっていたためだ。
両者はどちらも速い上昇率で二酸化炭素を増加させ始めたのである。
楽観的なシナリオでは、2100年には二酸化炭素の濃度が450ppm、中間的なシナリオでは700ppm、最悪のシナリオでは954ppmとなった。
この結果に基づいて、委員会は今後100年の間に、世界の平均気温が約1～3度も増加し、海水面は世界各地で約15センチメートルから約1メートルも上昇すると考えた。

◇2000年の終わりに発表された報告では、最悪の場合のシナリオが上方修正され、1990年の気温に比べて約3.5～6.1度Cの温度上昇があると予測された。

参 考 資 料

（全国地球温暖化防止活動推進センター・JCCCAのHPから抜粋・引用させていただきました）

■ IPCC 第5次評価報告書（2013・9・27）第1作業部会の概略

◇主な結論

■ 地球温暖化の原因

- ・人間活動が20世紀半ば以降に観測された温暖化の支配的な要因であった可能性が極めて高い（可能性95%以上）
- ・大気中の二酸化炭素、メタン、一酸化二窒素は、過去80万年間で前例のない水準まで増加している

■ 現状（観測事実）

- ・温暖化については「疑う余地がない」
- ・1880～2012年において、世界平均地上気温は0.85℃上昇
- ・最近30年の各10年間の世界平均地上気温は、1850年以降のどの10年間よりも高温
- ・海洋は人為起源の二酸化炭素の約30%を吸収して、海洋酸性化を引き起こしている

- 1992～2005 年において、3000m 以深の海洋深層においても水温が上昇している可能性が高い

■ 将来予測

- 今世紀末までの世界平均地上気温の変化予測は0.3～4.8℃である可能性が高い
- 今世紀末までの世界平均海面水位の上昇予測は0.26～0.82m である可能性が高い
- CO₂の総累積排出量と世界平均地上気温の変化は比例関係にある
最終的に気温が何度上昇するかは累積排出量の幅に関係する
これからの数十年でより多くの排出を行えば、その後はより多くの排出削減が必要となる

(2007 年に発表された第 4 次評価報告書では、今世紀末には1.1～6.4℃上昇すると予測されていましたが、前提となる基準年や排出シナリオ、予測不確実性の許容範囲の幅が異なるため、単純な比較は困難なものの、予測結果としては AR4 と整合しているとしています。)

■ 北極などにおける海水の変化

1979～2012 の期間中、北極圏の年平均海水面積の減少は 10 年あたり3.5～4.1%の割合であった可能性が非常に高い(90%)と発表されました。

また、南極やグリーンランドの氷床からの氷損失(氷床質量の減少)が増加している可能性が、南極については「高い」、グリーンランドについては「非常に高い」と発表しています。

■ 第 3 作業部会の「2℃シナリオ」について

• 「2℃シナリオ」

今回の IPCC 報告書では、国際交渉において気温上昇の抑制の目標として関心が高まっている「2℃シナリオ」(気温上昇を産業革命前に比べて2℃未満に抑制する可能性の高いシナリオ)について詳しく報告されています。この「2℃シナリオ」の目標を達成すると、影響がどの程度軽減され、適応が少なく済むか、また、そのためには、どの程度、温室効果ガスを減らし、どのような技術革新を進める必要があるかについて記述されています。

• 「2℃シナリオを実現するための緩和シナリオ」

「2℃シナリオ」を実現する、実現性が高い緩和シナリオは、2100 年に CO₂換算濃度を約 450ppm としている。このシナリオでは、2050 年には世界全体で 2010 年と比べて 40～70% 温室効果ガス排出量を減らし、2100 年にはゼロまたはマイナス(*)の排出量にする必要があると報告されています。

(*) 植物などによる CO₂固定や、発生した CO₂を地中に埋めることによってマイナスにする。

◇世界規模で二酸化炭素が増え続けていることについては、すべての人が同意している。

問題は将来、このレベルがどれほど上がるだろうかということである。

この増加は、世界の人口がどれほど速く増加するのか、そしてもっとも重要なことは、人々がどのように生活するのかにかかっている。

◇気温の上昇は、海洋からの蒸発を増やすが、それによって熱を吸収する水蒸気が大気中に増加し、日光を遮る雲が増える。

雲は日光を反射するので、地球を冷やすことになる。

二酸化炭素が引き起こす地球温暖化は両極地方の雪原を融かし、代わりに二酸化炭素を吸収する森が増えるであろう。

他方で、森は雪原よりも日光の反射率は低い。

◇問題をさらに複雑にするのだが、最新の予測によれば、地球温暖化によって植物が吸収する炭素量が減少するらしい。

大気中の炭素は二酸化炭素の形で存在する。

しかし、残念なことに、この炭素がどこに行くのかはわかっていない。

毎年（大気に）再吸収される炭素全体の 20%ほどにあたる、おおよそ 1 兆キログラムの炭素が、どこに行ってしまったのかわからないのだ。

これらの炭素は、大きなシベリアの森か、あるいは未解明の海中の働きによって消失しているのかもしれない。

これらは謎の一端にすぎず、その全体像はぼんやりとしか見えない。

どれくらいの量の二酸化炭素が、今から 10 年や 100 年のうちに生じるのか、よくわかっていない。

しかし、過去の経験を考えると、決して楽観的にはなれない。

◇この問題については、たくさんの重要な研究が行われている。

どの研究も全体像のどこかの一部を調べたものにすぎず、発表される結果はどれも不確定さを伴っている。

人類の未来に対して意味のある予測をするためには、これらの研究成果を互いに結びつけ、それを未来に外挿しなければならない。

未知のことがらが少なくないので、予測は困難だが、それでもなお、未来への解答が必要である。

4. 極限状況下の生命

【29】スノーボール・アース

◇生命には驚くべき回復力がある。

有史以来最大の火山噴火が、ジャワ島の西約 50 キロメートルのクラカタウと呼ばれる小島で、1883 年 8 月に起こった。

約 25 億立方メートルもの岩石が噴火口から噴出し、ジャワ島とスマトラ島の海岸に住む 3 万人以上の人々が津波により命を落とした。

大気中に漂ったチリは太陽光を遮断し、5 年間にわたって地球全体の気温を下げた。

火山爆発のあとクラカタウに残されたものは、小さな黒い溶岩の塊だけであった。

◇噴火後 9 カ月してからクラカタウへ赴いたフランス遠征隊は、生きていたクモを見つけた。

5 年後には、若木、草、蝶、それにトカゲすらも見つかった。

島は、再び生命に溢れていた。

だが、棲息する生物群は、噴火の前と同じではなかった。

◇このような大変動のあるなしによらず、生物種は、ダーウィンの偉大な発見である自然選択により進化していく。

だが、自然災害は、棲息する生命を入れ替えることにより、自然選択を早めるように作用する。

◇有孔虫は、海底によく見られる微生物の一群である。

この生き物は数億年にわたる岩石の中に化石として見つかる。

だが 5500 万年前、有孔虫目の半分以上の種が、一万年に満たない間に消滅してしまった。

上昇した海水温のために窒息してしまったのである。

◇これらの微生物が消滅した理由を探るための物語は、有孔虫が地上の出現するずっと以前に始まるが、そこにも思いがけない容疑者が登場する。

最も初期の生命であるメタン細菌は、水素と二酸化炭素を水とメタンに変換し、初期の地球の大気を、酸素なしの状態から酸素に富んだ状態に変える役割を果たした。

同じように、この細菌は、地球の初期の気候と、多様な生命の創造にも大きな役割を果たしたのだ。

◇何十億年にもわたって広く分布していたメタン細菌は、15兆トンのメタンを生成してきたが、それらは今、深い海底に埋もれている。

5500万年ほど前に、おそらく海流の変化によって深層水の温度が急激に上昇し、それによってメタンの一部が大気中へ放出された。

二酸化炭素の30倍もの温室効果をもつメタンは、一旦大気中へ放出されるとさらなる温暖化を引き起こした。

◇この温度の変化は、フィードバック機構によって調整できるようなものではなかった。

温度は上がり続けた。

このことは、さらなるメタンの排出を引き起こし、暴走的温室効果を引き起こした。

引き続く一万年の間に、海洋底にあるメタンの7%に当たる1兆トンが大気中へ出ていった。

そこでやっと地球は、再び平衡状態を取り戻した。

だが、その時までには、海洋の温度は約6度C上がってしまった。

◇有孔虫は数百万年にわたる気候変動を生き抜いてきたのに、その半分の種がこの高温に適応できずに滅んでしまった。

このように、急激な気候変動は、進化の過程に新しい道筋を作る。

新しい種は、より適したものなのである。

温度はあらゆる生命に影響する。

あるものは低温で繁栄し、あるものは高温で繁栄する。

あるものは気候変化があっても生きのびられるのに、あるものはそうではない。

齧歯(げっし)類から霊長類にわたる哺乳類の多くは5500万年前の化石に初めて登場する。

この時、蹄、爪、あるいは、キバをもつ動物たちが現れた。

歯は変化し、狩りの様式も変化した。

落ち着くまでに一万年もかかった暴走的温室効果と、海洋の6度Cもの温暖化は、それ自体劇的なものだった。

◇ところが、わずか一世紀の間に地球全体の温度が約100度Cも変化した可能性がある。

ポール・ホフマンとダニエル・シュラグが正しかったとしたら、このような事態が少なくとも一度、5億年以上前に起こった。

もしかしたら、数回も起こった可能性もある。

ホフマンとシュラグは、こうした温度の急激な(下降と上昇の)変化を「フリーズ・フライ」現象と呼んでいる。

この現象は、スノーボール・アースというシナリオのカギとなっている。

◇7億5000万年まえから5億5000万年前までの期間は、地質学的にも生物学的にも謎めいた時期である。

この期間の岩石には、氷河の岩屑に見られるような特徴的な筋が刻まれているのだが、それらが、赤道付近というところでもない場所に見つかっている。

これらの岩石は、地球全体が一旦氷に覆いつくされてしまったことを意味する。

他方で、二酸化炭素の溶け込んだ暖かい水から析出する炭酸塩鉱物の地層が、この氷河堆積物の上

に広がっている。

明らかにこれは、地球が非常な寒さから非常な暑さへと急激に移行したことを物語っている。

さらに、鉄分に富んだ岩石の層も存在し、それらは酸素の欠乏を示唆する。

だが、酸素はメタン細菌が多量に存在したおかげで、それ以前の10億年にわたって、地球上に豊富であったはずだ。

◇そこで、生命に関するある疑問が浮かび上がってくる。

地球上の生命は、簡単な単細胞生物として約38億年前に発生した。

化石から説明するのは難しいが、進化は疑いもなく、その後の30億年にわたり、ゆっくりと進んだ。

ところが、およそ5億6500万年前に、突然新しい生物が次々と現れた。

38億年という時間スケールから見たら一瞬にすぎない5000万年の間に、あらゆる型の動物たちが現れたのだった。

◇生物の大まかな区分である門とは、ギリシャ語で「部族」のことだ。

5億年前に、現在知られている11の動物門、例えば、蠕虫、ヒトデ、軟体動物、脊椎動物が繁栄した。

こうした突然の“爆発”は、珍しい出来事である。

種の大量絶滅と誕生はそれまでもあったが、この「カンブリア紀の大爆発」における生命の大発生に、規模において匹敵するものはない。

◇地球規模の急激な温度変化、二酸化炭素と酸素の急速な増減、多様な生命の爆発という三者には、何らかのつながりがあるのだろうか。

一つの答えが生まれつつある。

この答えはまだ広く受け入れられてはいないし、結論もあいまいだが、検証に十分耐えられるものだ。

◇まず、第一段階は、赤道地方の寒冷化である。

1960年代初期、大陸移動に関するウェゲナーの理論が再評価され、それによってW・ブライアン・ハーランドは大陸が7億年前に赤道近くに固まっていたことを確信した。

陸地は、雪や氷に比べて日光を弱く、だが海洋よりも強く反射するので、赤道地域は、現在よりも低温であった。

マイケル・ブドイコは初期の地球の気候モデルを用いて、赤道地方の気温が下がると、極地の氷河が南へ向けて広がり始め、それがさらに赤道の温度低下を増幅するというフィードバックを引き起こされることを示した。

第二段階は、この段階は、数キロメートル程度の厚さの氷の層で地球全体が覆われたところで終わる。

第三段階は示されなかった。

その理由は、どのようにして氷が融けるのかとか、どのようにして生命が大凍結期を通じて維持されたのか、明らかではなかったからである。

◇この問題は、1990年代初期まで未解決のままだった。

「スノーボール・アース」という言葉を使い始めたジョセフ・キルシュヴィンクは、火山噴火によって大量の二酸化炭素が大気中に放出されたのだろうと指摘した。

地表の様子には左右されない火山の噴火は、氷の層を突き抜けるほど強力だったはずだ。

二酸化炭素は普通、植物による吸収や、岩石が雨により浸食されて海に流されることによって、一定量に保たれる。

そして微妙なバランスが保たれている。

6億年前には、植物は凍りつき、岩石と海洋は氷に閉ざされていたので、二酸化炭素の増加を抑える手段がなかった。

これで、第三段階の舞台が整えられた。
温室効果ガスが引き起こす暴走的温暖化である。

◇二酸化炭素を吸収する機構がなかった頃の数百万年にわたる火山活動は、現在に比べて 300 倍以上に達する 12 万 ppm の二酸化炭素を大気中にもたらすことになった。

◇第三段階は突然始まった。

多分、100 年に満たない短い時間で、地球全体の平均気温は、マイナス 50 度 C から 50 度 C にまで上がった。

100 度 C もの変化である。

このようなことが起こると、氷は融け、地球は氷河の世界から熱帯の世界へと切り換わった。

酸素が消滅した理由は簡単である。

凍結により、酸素の生成源である植物が死滅していたからである。

このようにして、地質学的記録の説明が見ついた。

まず氷河が生成し、次いで酸素が欠乏し、その後二酸化炭素を多く含んだ暖かい雨が炭酸塩鉱物を生成したのである。

◇氷に覆われた地球上で、生命がいかにして生き残ったのかを知るには、好熱菌とその強靱な仲間たちがどこで耐え抜いたかを考えればいい。

熱い氷の下、生命は孤立した海中の熱水噴出口上で生き長らえてきた。

全部ではなかったとしても、かなり多くの原始的な地上の微生物は死に絶えたであろう。

氷が融けるにつれて、地上に生命が戻ってきて、新しい形の生命を作り出し、間もなく何倍にも増えた。

凍結は、多様な生命の大発生への引き金だったのである。

◇「スノーボール・アース説」が完全に正しいということはないかもしれない。

しかし、多くの科学者は、この説を受け入れる方向に向かっている。

◇（しかし、）ウィリアム・ハイドらは、赤道付近には氷のない海が広がり、二酸化炭素の量は現在の 4 倍だったという、部分的に凍結した地球のモデルを提案している。

彼らは、ホフマンとシュラグのように、厚い氷の下で生命が生き残れるとは考えていない。

◇「スノーボール・アース説」には、未知の科学は含まれていない。

過去に氷河時代があったという証拠はたくさんあり、スノーボール・アースはその中の極端な例にすぎない。

金星の温室効果ガスによる温暖化はずっと大きなもので、温度が約 400 度 C に達するまで、温暖化は止まらなかった。

これに比べたら、50 度 C とは穏やかなものである。

（間欠泉や深海で発見された）好熱菌は何回も私たちに驚かせたが、今後もさらに驚かせてくれるのだろう。

◇最大の驚きの一つは、（1977 年に深海潜水艇アルヴィン号が、ガラパゴス諸島近くのエクアドルの西、約 600 キロメートルの深海を探検し、「クラムベイク 1」と呼ばれる）地点にまで潜水した、その年に起こった。

1977 年に、イリノイ大学の微生物学者、カール・ウーズは、あらゆる人々の予想に反して、メタン細菌がバクテリアの一種ではないことを発見したのだった。

それらの多くは新種の好熱生物だった。

メタン細菌は、生命の起源と、最初の生物が出現した時の地球の温度についての考えを一変させた。

【30】生命の第三の分岐

◇1970年代後半までは、地表の水たまりの中で単純な有機分子が生成したことによって、生命が誕生したというのが、科学者の一般的な見解だった。

1953年の実験で、化学者のスタンレー・ミラーとハロルド・ユーリィは、すべて初期の地球上にあったと想定される、水、メタン、水素、アンモニアを、4リットルのフラスコに満たして密閉した。

そして放電と蒸発、凝縮の繰り返しによって、大昔の状況を再現した。

わずか数日後に、いくつもの有機分子がこの混合体中に見つかった。

これらの分子は生命の前駆体だとされたのであった。

◇このような生命の起源の考えは単純ではあるが、多くの疑問が残った。

有機分子の生成は注目すべきものだが、それが生命体の遺伝情報の担い手であるRNAやDNAに変化するしくみは知られていない。

ミラーとユーリィの実験に必要なメタン、水、それにアンモニアは、生命が誕生した時には多量には存在しなかったであろうし、初期の地球の表面は、温度の点でも他の点でも、多分生命の誕生にとってかなり悪い条件下にあったようである。

1970年代後半に起きたこの論争を経て、科学者たちは、熱水噴出口で生命が誕生したという可能性について考え始めたのだった。

◇この先陣となったのは、ジャック・コーリスであった。

彼は「クラムベイク1」地点への最初の潜水時に、アルヴィン号の船窓から外を眺めた科学者であった。

噴出口の周りに群がる豊富な生命を目のあたりにした彼は、ここが生命が始まった場所なのではないかと考えたのである。

海底が小惑星の衝突の影響を比較的受けないことに気づいた彼は、海底が地表に比べて日光や温度の急変に対し影響を受けにくいだろうと考えた。

1981年に、コーリスと二人の協力者は、「海中温泉と地球上の生命の起源との関係に関する仮説」と題した論文を発表したのだった。

◇ちょうどその頃、生物の分類法に大きな変化が起こった。

それは“海水温泉”で生命が誕生したという考え方を推進するものであった。

1970年代の終わりまでは、生物は、核を持たない単細胞生物である原核生物のバクテリアと、その他の生物の二つに分類されていた。

その他すべての生物は真核生物と呼ばれ、はっきりした核をもっている。

それに対して、バクテリアははっきりした核をもっていない。

おそらく遅れて進化した真核生物は、形態、機能、大きさによって四つの界に分けられる。

動物、植物、菌類、藻類である。

◇1960年代半ばに、微生物学者のカール・ウーズは、バクテリアの世界を分類する研究を始めた。

この研究は当時、かなり挑戦的なものであった。

その頃の細菌学の教科書には、「生物を分類するという究極の科学的目標は、バクテリアの場合には達成することができない」と書かれていたのである。

この見解を受け入れなかったウーズは、バクテリアを分類するためには、バクテリアの形や機能を顕微鏡で研究するだけでは不十分だと考えたのだった。

彼は、分子生物学がこの問題に対する新しい手段となると考えたのである。

◇新しい手法を用いるにあたって、ウーズは、細胞内でタンパク質が合成される場所にある特殊なRNAに注目した。

彼は、遺伝物質の一致の度合いを見ることによって、バクテリアの系統をたどり、二つの種がいつ

分岐したかを知ること成功した。
彼はバクテリアの年代記録を生み出しつつあった。

◇1976年に、ウーズは、有孔虫を間接的に死滅に導いたメタン細菌を調べてみた。
そして、ウーズはすぐに魅了された。
それは、メタン細菌が、球や、桿状や、螺旋形など、いろいろな形をしていたからである。
また、大きさもいろいろだった。
だが、見かけは違うものの、メタン細菌はどれも同じ化学反応を行っていた。
機能は同じなのに、形や大きさは違うのである。
もしこれらのRNAがウーズの思っていたものに近かったとしたら、それはバクテリアの分類のためのウーズの方法が正しいことの強力な証明になっていたであろう。

◇ところが、思いもよらぬ事態が生じた。
メタン細菌の遺伝子の配列は、バクテリアのものとは似ても似つかなかったのである。
ウーズは、それらを古細菌と命名した。
大部分の生物学者は、彼の研究を無視した。
しかし、ウーズや他の科学者たちがメタン細菌の分子学的詳細について研究するにつれて、彼の説を支持する証拠が集まり始めた。
そして、古細菌の英名、archaeobacteria から“bacteria”が省かれて、単に Archaea と呼ばれるようになった。
これは、真核生物とも原核生物とも異なる、第三種の生命である。

◇ウーズの考えの正しさは、現代の遺伝子技術により検証された。
メタン細菌、メタノコックス・ヤンナスキは、DNAの配列が完全に解読された最初の生物の一つである。
遺伝子の44%は、バクテリアか真核生物のものと似ているが、残りは完全に違っている。
明らかにこの生き物は、“どちらとも異なる存在”なのである。

◇メタノコックス・ヤンナスキには、他にも際立った特徴がある。
これは超好熱菌で、80度C近くでいちばんよく成長するのである。
最初の数年間に発見された古細菌のほとんどすべては、好熱菌か超好熱菌、あるいは何か極端な条件、例えば、圧力、塩、酸などを“好むもの”である。
これらの生物はまとめて好極限性微生物と呼ばれるようになったが、好熱菌はこの一部である。
最も高温に耐えられるピロロバス・フマリイは、「スモーカー」と呼ばれている熱水噴出口上で見つかるものだが、バクテリアではない。
これも古細菌に属する。

◇古細菌が生命の系統樹の根元近くに位置し、それらが極限環境を好むということは、これらの生き物が地球上で最初の微生物であることを示唆している。
残念ながら、進化生物学には常にあいまいさがつきまとう。
古細菌は当初私たちが考えていたよりも、遥かに豊富に存在する。
これらの生き物は、海水プランクトンの中や温水の中にもいるし、ある種のものには極域の水中でも生きている。
また、すべての超好熱菌が古細菌というわけでもない。
アクイフェクス・エオリクスは、90度Cで生存しているが、これはバクテリアである。
最初の微生物は好熱性だったが、おそらくそれは、古細菌でもバクテリアでもなかったのであろう。
カール・ウールは、次のように言っている。
「生命の祖先は、特定の生き物、つまり、唯一つの生命の系統なのではあり得ない。
生命の祖先は、多様な原始的細胞がゆるく手を取りあった集合体であり、それが一体となって進化し、最終的にいくつかの集団に分かれた。

これらの集団は、それぞれ、三つの主要な系列の子孫を生み出した。
バクテリア、古細菌、それに真核生物である。」

5. 太陽からのメッセージ

【31】ガモフの著書

◇私が13歳の時に初めて読んだ本格的な科学書は、ジョージ・ガモフの『太陽の誕生と死』であった。

この本には、紆余曲折や行き詰まり、そしてブレイクスルーに富んだ話が満載されている。両立し難いような考え方が突然ひとつにまとまったり、いろいろな分野のデータが、予想もできないような仕方で提示されたりしている。

【32】中心核では

◇太陽は私たちが感じるほとんどすべての熱の源である。
地球内部深くにあるエネルギーは、熱水の噴出口や火山活動を生み出しているが、地球が受ける太陽のエネルギーは、湧き出してくる全地熱エネルギーの一万倍にもなる。
このエネルギーの大部分は、太陽の中心核で作られるが、私たちが実際見られるのは温度 5800K の表面だけで、その内部については推測するしかない。

◇この表面温度は、一世紀以上前に確立したシュテファン=ボルツマンの法則から求められるのだが、実はこの温度には謎が潜んでいる。

その一つは、表面温度が一様でないことである。太陽には黒い“しみ”があるが、これは 5800K に対して約 4300K と、周囲より少し温度が低いために生じるのである。

この“しみ”は黒点と呼ばれる。

これが何を意味し、どんなふうに発生するのかがわかるずっと前から、その存在は知られていた。

◇黒点が何者なのかを明らかにするためにガリレオは、黒点の素性を探り、運動を追跡し、その成長、衰退、形の変化について観測した。

ガリレオは、黒点の移動はほぼ四週間で一周する太陽の自転によるものだということを見出した。

◇黒点は、ガリレオの将来を左右した。

彼が 1613 年に出版した『黒点に関する手紙』には、慣性原理に関する説明が初めて登場するが、政治的にもっと重要だったのは、この本の中で彼が、コペルニクスの太陽中心世界説を初めて支持したことである。

ガリレオにとっては不幸なことだったが、彼の主張は時に、保守的な人々を敵に回すこととなった。

◇私たちは今では、黒点は太陽の磁場に起因するということを理解しているが、これが明らかになるまでには 300 年を要したし、磁場のねじれや反転がどのようにして太陽面上の爆発と低温の黒点を 11 年周期で生じさせるのかを理解するには、さらに 50 年を要した。

太陽表面に関しては、今後に解明されるべき謎がまだ残っている。

太陽の中心核については、あらゆるモデルが間違っていた。

太陽が何を燃やしているのかという謎に対する解答は、誰にとっても驚きであった。

◇地球の地質学的特徴が形成され、地球上で生命が進化するためには、長い時間が必要であること

が、19世紀の後半を通じて明らかになっていった。
これらの変化に必要な期間は、最低でも数億年だと考えられた。
このことは、太陽が少なくともそれだけ年とていなければならぬことを意味する。
しかし、既知のエネルギー源だけを用いたのでは、これは不可能である。
つまり、例えば太陽サイズの石炭の球では、エネルギーの生成は数千年続くだけで、必要とされる数億年とは大きな隔りがある。

◇当時の偉大な物理学者たちは、太陽の年齢を天文学的に推定した値と、生物学の立場から推定した値との不一致について指摘している。
ケルビン卿とヘルマン・フォン・ヘルムホルツは、太陽の寿命の上限を導き出すための仮説を、それぞれ独立して打ち立てた。
彼らは蓄積されていた重力エネルギーが、太陽の収縮に応じて徐々に熱に変換されていくと考えた。太陽の一生が3000万年だという彼らの解答は、それまでの推定値に比べて長かったが、ダーウィンが考えた進化の現象を説明するには、尚も不十分であった。

◇解決への道は放射能の発見とともに始まった。
ピエールとマリーのキュリー夫妻は、ラジウムを単離し、放射能のもつ力を明らかにしたのであった。
ごく微量のこの物質は、自らの温度をほとんど下げることなしに大量のエネルギーを発生させたのであった。
ほどなくして核物理学の巨人となるアーネスト・ラザフォードは、1904年に、次のように宣言した。
《崩壊時に大量のエネルギーを解放する放射性元素の発見は、地球の生命存在期間の上限を引き上げ、進化の過程に対し、地質学者と生物学者が欲していた時間を与えたのである。》

◇太陽の真の熱源は、放射能ではなく、水素のヘリウムへの核融合なのである。
だが、この二つは互いに関連がある。
1904年のラザフォードの言明は、放射能が新しいエネルギー源であることを示した点では正しかったが、そのメカニズムについてはわからなかった。
そのメカニズムを知るには、その後さらに15年を必要とした。
この間、精密な測定により、ヘリウム核一個の質量と水素核四個の質量との間に違いがあることがわかった。
この違いは小さいが、エネルギーに変換されれば、無視できないほど大きくなる。
質量とエネルギーの関係に関するアインシュタインの洞察は、有名な式 $E=mc^2$ にまとめられているが、この式はこの点を強調している。

◇太陽の中心核は、毎秒数億トンの水素核をヘリウム核に変換する巨大な核反応炉である。
原子でなく核という言い方をするのは、温度が非常に高いために、原子から電子がはぎとられて、電子のガスの中を原子核が運動するという状態になっているからである。
20世紀になって私たちは、原子は原子核とその周りを回る軽い電子からなることを知った。
また原子核には、陽子に加えて中性子も含まれていること、そして、質量はあるが電荷をもたない中性子は陽子に強く結合し、核を安定させていることも知った。

◇500グラムの水素は、核融合する際に、約9000トンの石炭を燃やしたのと同じエネルギーを生成する。
水素からヘリウムへの変換が起きるには、中心核の温度が1500万K以上でなければならない。
この数値は、太陽の動的性質と核融合のメカニズムが明らかになったことにより求められたのである。
太陽は、数十億年にわたって燃え続けるのに十分な水素をもっている。
この時間は、単純な単細胞生物を霊長類にまで進化させ、複雑な文明を築くに十分な時間である。

◇1930年代の後半に、太陽の中心核がどのようにしてエネルギーを生成しているかを説明する基礎的な原理が見出された。

しかしまだ、温度と圧力をはじめ一連の核反応の詳細は不明のままであった。

ワシントンのジョージ・ガモフは、問題解決の機は熟したと考えた。

彼は、テラーやマール・テューブとともに、さまざまな物理学上の問題を議論するために毎年開かれる会議の運営に当たっていた。

1938年に選ばれたテーマは、宇宙物理学、特に、太陽中心核のしくみについてであった。

◇彼らは仲間のハンス・ベーテを招いた。

彼は核物理学の大家であり、後に「ベーテのバイブル」と呼ばれることとなる三つの論文を書いたばかりだった。

ベーテは次のように回想している。

「私は宇宙物理学には全然関心がなかったので、最初は出席しない返事したが、エドワード・テラーに説得されていくことになった。

そしてそれは、私にとって生涯で最も重要な会議となったのであった」。

◇会議ののちベーテは、六ヶ月以上の期間をかけて星を燃やす核反応の詳細を解き明かし、そのおまけとしてノーベル賞を得たのであった。

彼は水素からヘリウムへの核融合をどの核反応が引き起こすのか、そして、太陽中心核の温度に応じてどんな速度で核反応は進行するのかを解き明かした。

【33】宇宙の大胆者

◇太陽の性質に関して最も驚くべき成果は、ごく最近行われた太陽の中心温度の直接測定である。太陽エネルギーは、太陽の中心核で生成したのち、数百万年かけて外部へと拡散する。

中心核が太陽の働きのカギを握っていることは明らかである。

地球の中心核の温度はあまりよくはわかっていないが、5000K から 6000K の間だと予測されている。

しかし、その開きは20%もある。

驚いたことに、太陽の中心核の温度の方が、地球のものよりずっと正確にわかっている。

この予測を裏づけるしっかりとしたデータは、ある天体望遠鏡を使った観測によりもたらされた。

◇この望遠鏡は光学望遠鏡ではない。

これでは、太陽の中心部は見えないのである。

だが幸いなことに、太陽の中心核からの使者、つまり、中心部で作られる粒子が存在し、これが中心核の温度を教えてくれるのである。

この足早の使者は、生成してから二秒ちょっとで太陽面に達し、8.3分後には地球にまで到来する。この粒子はニュートリノと呼ばれている。

◇ニュートリノは決して、見たり、感じたり、嗅いだり、あるいは、さわったりできないものである。

太陽や遠くの星々で、あるいはまた、ビッグバン後の最初の数秒の間で作られたニュートリノが、毎秒毎秒何千個もあなたの手のひらをすり抜けていく。

もし、1930年代の核物理学実験が説明できない結果をもたらさなかったら、誰もニュートリノには思いいたらなかったであろう。

だが今では、ニュートリノが宇宙の進化において重要な役割を果たすことがわかっている。

科学には不思議なことがたくさんあるが、ニュートリノ以上に不思議なものはそう多くはない。

私を含め何千もの人たちが、ニュートリノの性質を理解しようと多くの時間を費やしてきた。

宇宙で最も奇異な存在について、その性質を考えたり、測定したりすることを許され、時には奨励されているというのは、本当に幸せなことである。

◇私が研究を始めた頃には、ニュートリノには質量がないとされていた。
今では、ごくわずかな質量があることがわかっているが、一体それがどの程度なのかはわかっていない。
その質量は極めて小さく、直接重さが測れる最も軽い粒子である電子の質量の、一万分の一よりも小さい。
また、ニュートリノには確かに電荷はないが、“まったく相互作用しない”というのは正しくないのである。
稀も稀、極めて稀なことだが、ニュートリノは中性子と出会うと、中性子を陽子に変換し、自らは電子に変わる。
たくさんの中性子を通りすぎるたくさんのニュートリノの中で、一つだけが変化を引き起こす。
この変化がどのように起こるのかは、1934年にエンリコ・フェルミにより示された。
彼は“中性子”と区別するために、小さな質量のこの粒子に「中性微子」、つまり、ニュートリノという名前をつけた。

◇この問題に関するフェルミの論文は、「読者の関心を引くには、あまりに現実離れしている推測を含んでいる」との理由で、『ネイチャー』誌から掲載を拒否されてしまったのである。
今ではニュートリノは、高エネルギー加速器実験によって日々観測されているし、原子炉からも生成されている。
最近では、ニュートリノが太陽の中心核から出ていくのさえ検出されているし、この中心核の温度を測るのにも利用されている。

◇40年前頃、二人の物理学者、ジョン・バコールとレイ・デーヴィスが、太陽の中心からやってくる高エネルギー、ニュートリノを検出する方法を書いた論文を、二つ列ねて発表した。
バコールとデーヴィスが探していた特別なニュートリノは、稀にしか起こらない高温核崩壊によって発生する。
太陽内部で、こうしたニュートリノの生成の必要条件が満たされるのは、太陽の中心核だけである。
こうしたニュートリノの生成は、温度が十分高い場合にのみ可能となる。
そしてこれらのニュートリノを観測すれば、太陽の中心核の温度を知ることができるのである。

◇驚くべきことに、地球上で太陽ニュートリノを検出する最適かつ唯一の場所は、深い地下である。
その理由は、何キロメートルもの岩石中をニュートリノは容易に通過するが、他の粒子はさえぎられてしまうからだ。
地表では、稀にしか発生しないニュートリノの信号が他のいろいろな信号と混ざってしまい、区別することが不可能なのである。

◇理論家のバコールは、核崩壊によって生成する太陽ニュートリノの密度を予測し、実験家のデーヴィスは、ニュートリノを見つけるための装置を考案した。
デーヴィスは、塩素に富んだ物質で一杯にしたオリンピック・サイズのプールを測定に選んだのだった。
太陽中心核からの高エネルギーのニュートリノは、非常に稀に塩素核をアルゴン核に変換するのである。
この過程では、塩素核内の中性子一個が、陽子に変わる。

◇実験を20年にわたって続けたデーヴィスは、アルゴン原子が一日に一個ではなく、三日に一個しか生成しないことを見出した。
ニュートリノの計数率は太陽中心核の温度の25乗に依存する。
太陽の中心の温度がバコールの予測よりほんの少し高ければ、アルゴン原子は一日に一個以上生成

する。

彼の予測より温度が 10% だけ低ければ、アルゴン原子は三日に一個生成するはずだ。私自身を含めて、大部分のニュートリノの専門家は、実験に誤りがあるか、太陽中心核の温度モデルの推論に小さな誤差があるかの、どちらかだろうと考えたのだった。だが、私たちが間違っていたのである。

◇太陽中心核から私たちのところまでやってくる間に、何か不思議なことがニュートリノに起こっている。

ごく最近の測定結果から確認された最も妥当な説明は、中心核で生成されたニュートリノの、おそらく三分の二が、太陽表面に到達するまでの二秒間に、その性質を変えてしまうというものである。ニュートリノは確かに予想通り生成されているのだが、デーヴィスの装置は、性質が変化しなかったニュートリノにのみ感度を有したということである。

◇ニュートリノの相互作用は極端に弱いので、ニュートリノは太陽中心核から何にも邪魔されずに飛び出してきて、地球を貫通してしまう。

中心核から飛び去るニュートリノのうち、三日間にたった一個だけしか、デーヴィスのタンク内ではとどまらない。

それでもこれらのニュートリノは、太陽中心核の温度が 1570 万 K であることを、私たちに教えてくれたのである。

しかもこの測定誤差は、何と 1% 以下なのである。

【34】熱をめぐる余談----ガモフ、ラザフォード、核の障壁

◇太陽中心核からのニュートリノ放射は、なぜ温度によってこんなに敏感に変わるのだろうか。

その答えは、量子力学と実験核物理学、そして私の好きな二人の物理学者に関係している。

アーネスト・ラザフォードは、太陽熱の源が放射能であると主張した。

1890 年代の後半にラザフォードは、当時アルファ線とかアルファ粒子と呼ばれていたヘリウム核が、放射線源から出てくることを発見した。

そしてラザフォードはその 15 年後に、原子の構造を研究する目的で、薄い金箔にアルファ線を衝突させる実験を始めた。

当時受け入れられていた J・J・トムソンの理論によれば、アルファ線はアルミ箔で曲げられることはなく、真っ直ぐ突き抜けていくはずであった。

ところが、ラザフォードは、アルファ線が時折大きな角度で散乱され、時にははね返ってくることもさえあることを見出したのである。

この現象を説明する方法が一つだけあった。

もし原子の正電荷が小さな核に凝集していれば、正電荷をもつアルファ線は、この核のすぐ側にいかない限り、ほとんど曲げられることがないだろう、とラザフォードは考えた。

そしてこの小さな核をラザフォードは、「原子核」と名づけたのであった。

もしこれが正しければ、正電荷をもつアルファ線が正電荷の凝集した核に近づけば、大きな電氣的反発が起こって大角度の散乱が観察されることになる。

この核の直径は、原子の大きさの数百分の一から数千分の一なのである。

◇1928 年、研究は活発にすすめていたものの、ラザフォードは核反応の詳細、特に太陽中心核を加熱する過程の謎に捉われていた。

放射能を研究する過程でラザフォードは、アルファ粒子、つまり、ヘリウム核が、大きな核の内部から漏れ出てくることのあるのに気がついた。

ラザフォードは考えた。

このアルファ粒子はもともと原子核内部にあったものなのか、それとも何か別の粒子と一緒に生成したものなのだろうか。

◇偉大な実験家だったラザフォードは、若い仲間たちが量子力学を駆使してひねり出す魔法のような数学的帰結に、しばしば疑念を抱いた。

そして彼らはラザフォードが抱く謎には答えてくれなかった。

ラザフォードは説明の仕方を探りながら、原子核崩壊の特徴を列挙した論文を書いた。

◇当時、コペンハーゲンにいたガモフは、この論文を読み、答えが見つかったと思った。

そして1929年初めのある日、ラザフォードは、英語の苦手な背の高い24歳のロシア人が部屋に入ってくるのを目にした。

すぐにガモフは、原子核崩壊の問題を量子力学の新しい規則にしたがってどうやって解けばいいのかを、ラザフォードに説明したのだった。

粒子が量子力学的に障壁を通り抜ける確率は、「ガモフ因子」という名で呼ばれている。

◇ヘリウム核は、核力によって大きく重い原子核の内部に閉じ込められている。

だが、ガモフが言うように、「量子力学によれば、通り抜けられない障壁はない」のである。

さらにヘリウム核が障壁を通り抜けて外に出てくるのに要する時間は、量子力学を利用して計算すれば正しく求められるのである。

実際には障壁は二つあり、その違いは重要である。

核力は電気力に比べて遥かに強いが、ごく近い距離でしか作用しない。

この力が陽子やヘリウム核を、大きな核の内部に閉じ込めているのである。

核力が存在しなかったら、これらの粒子は散り散りになってしまうであろう。

なぜなら、これらの粒子は正に荷電しているので、互いに電氣的に斥け合うからである。

この反発力よりも核力の方が強いために、核から出ていくのを抑える障壁ができるのである。

だが、ガモフが言ったように、絶対に越えられない障壁など存在しない。

つまり、核は崩壊することになるのである。

◇二つ目の障壁である電気力は、陽子やヘリウム核が外から核に入ってくるのを防いでいる。

外部から大きな核に近づいてくる陽子やヘリウム核は、短距離で働く核力による引力を受ける前に、遠距離でも働く電氣的な斥力を感じ、通常は曲げられ離れていってしまうのである。

外部の温度が上がるにつれて、外部から衝突してくる粒子のエネルギーは高くなり、より核に近づきやすくなる。

しかし最初のうちは、大きな電氣的な障壁を越えるのは不可能なように思える。

◇ところがガモフは、この障壁を通り抜けるのは実際可能だということをラザフォードに訴えた。

そして外部から粒子が入ると、核は不安定になり、崩壊する。

結局、障壁を通過する確率が温度に強く依存することこそが、太陽中心核からのニュートリノ放射が温度に強く依存する原因なのである。

障壁の通り抜けを実験で確かめたラザフォードは、核をこわすための加速器の建設を始めた。

◇核が二つに分かれることは「核分裂」といい、二つの核が一つになることは「核融合」という。

どちらも実際に起こるし、そこでは温度が重要な役割を演じる。

特に核融合では、温度が重要である。

太陽の中心核における高温と高圧の条件下では、互いに電氣的に斥け合う陽子同士と一緒に押し込められて、核融合を起こし、ヘリウム核が生成する。

その過程で、太陽の原動力となる大量のエネルギーが解放されるのである。

【35】星の誕生

◇地球の中心温度は数千Kである。

太陽のような中規模以下の星の中心核は、数百万 K ほどの温度である。
例えば、質量が太陽の 25 倍もある大きな星では、中心温度が数十億 K にも達する。
そこでは、どんなことが起こるのだろうか。
この大きな星は、いったいどんな種類のニュートリノを放射するのだろうか。
どうすれば、そうした星の中心核の温度を測れるだろうか。
ここで、星の誕生と死を示すいくつかの歴史的記録を見てみよう。

◇アリストテレスの教義にしたがえば、星は死にも生まれもしない。
こうした見方は、16 世紀のヨーロッパでもまだ通用していた。
望遠鏡発明以前の最後の大天文学者であるティコ・ブラーエは、1572 年 11 月 11 日の夕方、アリストテレスの言明に反して、新しい星が出現しているのに気がついた。
後に彼は次のように語っている。
《びっくりし我を忘れて、この星を一心に長い時間見つめていた。
その星は、古代人がカシオペアになぞらえた星々の近くにあったが、こんな星は以前にはそこには輝いてはいなかったのだ。
私は、信じられないことで心乱され、自分の目を疑い始めた。》

◇ティコは、現在私たちが「超新星」と呼ぶ、天空に新しく出現する存在を見たのである。
ティコは知らなかったのだが、こうした現象を見たのは彼が初めてではなかった。
中国と日本の天文学者たちは、1054 年 7 月 4 日、かに星雲中に新しく明るい星が出現したのを記録している。
ティコの観測以後に初めて観測された超新星爆発は、わずか 32 年後に起こった。
ケプラーはこの星を見ただけでなく、この星が暗くなり始めるまで 1 年にわたって追跡した。
またガリレオは、この星について、パドヴァの大学で講義している。

◇星の一生は極めて単純で、間違いなくその死よりも単純である。
重力が星を中心に向着けて引っ張り、大きな圧力を作り出す。
この中心の圧力は表面の数十億倍にも達する。
中心核で生成された熱がこの内向きの圧力を押し戻すことで、釣り合いが保たれている。
星が大きくなると、崩壊を抑えるには中心核がより高温でなければならない。
内向きの重力と外向きの熱とのこの釣り合いが、星の一生の終わりまで保たれるのである。

◇太陽と同程度か、それより数倍重い星は、水素の核融合により輝き続ける。
晩年には、圧力と温度が十分に高ければ、ヘリウム核が炭素核や酸素核へと融合する。
四個の水素核は一個のヘリウム核よりも容積が大きいので、水素の核融合によって星の中心核は圧縮されて加熱する。
これにより、温度が上がり、燃焼の速度と明るさが増加する。
科学者たちは、太陽が 45 億年にわたって明るさを増し続けており、その間エネルギーの出力はほぼ 30% も増加したと信じている。

◇太陽エネルギーの出力の増加は、地球の過去に対する私たちの見方に疑問を投げかけている。
過去に太陽の温度が低かったとしたら、地球は今より冷たかったはずだ。
他の要因が介在しなかったとしたら、地球の海洋は 15 億年前頃まで氷に閉ざされていたことであろう。
だが、これは真実ではあり得ない。
液体の水は、少なくとも 20 億年も前にはすでに存在していたことがわかっている。
この矛盾に対する一番もっともな答えは、当時は現在に比べて、二酸化炭素の存在量が 1000 倍も大きかったというものである。
地球の温度が一旦上がったことにより、フィードバック機構が二酸化炭素の量をここまで上げてしまったのである。

この機構こそが、太陽が暗かった時に海洋を氷結から守り、後に二酸化炭素の量を現在の水準にまで戻したのであった。

◇太陽の明るさが増加しているという事実はまた、地球が将来どうなるかを予測してくれる。それはよい未来像ではない。

今から約 10 億年経った頃には、地表の温度は水の沸点にまで上がるであろうから、地球で唯一つ生存可能な生命は、超好熱性のバクテリアとなる。

その後間もなく地球は、高温と有毒な大気からなる金星と同じ道をたどるのであろう。

この時点で、地球上の全生命は絶えるであろう。

生命の 50 億年にわたる記録はここで途絶える。

だが、地球そのものは終わらず、その後、数十億年にわたって、生命をもたずに存続するであろう。

◇カリフォルニア大学サンタクルズ校のドナルド・コリカンスキーは、最近別の可能性を説いた。直径 80 キロメートル、重さ 1000 兆トンの小惑星を操作し、6000 年ごとに地球のそばをかすめるようにすることで、地球を外側に押しやっければ、太陽の明るさの増加を相殺できるはずだ。

この小惑星は地球にエネルギーを与え、その後、木星のそばを通ることで再びエネルギーを得る。小惑星はロケットによって軌道を変えて地球の近くまで戻ってきて、再び地球を動かし、これをくり返す。

数十億年の間に、地球は現在の火星の軌道近くにまで移動しているであろう。

非現実的な話だが、検討には値する。

◇未来の太陽の終局段階では、中心核にある水素が消費されてしまい、最高温度に達すると、外層部にある水素が燃焼するようになる。

太陽はふくらみ、雲状になって温度を下げ、色が黄色から赤へと変わっていく。

また表面温度は、5800K から 3500K へと下がる。

太陽は赤色巨星となり、熱くて広がったガス雲は、現在の火星軌道にまで広がっていく。

すべての熱源が消費され尽くすと、太陽は冷えながら収縮し始める。

その時までには地球は消え、この熱い雲に飲み込まれて蒸発してしまっている。

もしかしたら、ほぼ 100 億年前に地球にまで成長することになった岩石塊の痕跡を、あとに残しているかもしれない。

普通の星であった太陽は、後に赤色巨星を経過したあと、収縮していく。

ついには潰れた白色矮星となって、忘却の彼方に消えていくことになる。

◇ずっと高い中心核温度と圧力をもつさらに大きな星は、太陽よりずっと込み入った核反応を行い、異なる死を迎える。

太陽の 10 倍から 40 倍の質量をもつ星の死は、銀河系内ですでに何億回も起こっている。

中心核が圧縮されることで熱が発生するというシナリオに従えば、中心核の温度が高くなるほど、それだけ死にいたる時間が短くなる。

段階ごとに、より重い核が中心核を形成するようになる。

中心核を形成する元素は、4000 万 K ではヘリウム、次いで炭素、ネオン、酸素、それから、シリコンと変わっていく。

この時にはすでに、中心温度は 10 億 K に達している。

最終段階では、シリコンが鉄に変換されるが、この段階はわずか一日で終わる。

◇各段階でエネルギーが解放され、しばらくの間、このエネルギーが星を輝かせ続ける。

だが、このプロセスには終わりがある。鉄核同士の融合にはエネルギーが必要だが、そのためのエネルギー源はない。

核反応の連鎖にはその先の段階がないので、重力による収縮作用に対抗する外向きの圧力が生じず、星は急激な崩壊を始める。

元々地球より大きかった中心核は、数秒の間に、中程度の都市と変わらない大きさへと急激に収縮していく。

◇一方、それまでに生成された核は、中心核の周囲に玉ネギのような重層を形成しており、これらも崩壊の影響を受ける。

支えを失ったこれらの核は、新たに形成された中心核の壁に激しく衝突して、はね返る。

そして、これらの核は外部空間へとまき散らされ、あとには残骸だけが残される。

水素とヘリウム、それに微量のリチウムとベリリウムとを除き、宇宙にある鉄、マグネシウム、硫黄、炭素、酸素、ネオンなどの全元素は、こうした爆発によって放出されたのである。

これらの元素は、巨大な星の炉で形成され、星の突然の死によって、周囲にばらまかれたのである。

私たちの地球は、このような大きな星々が死を迎えた時に外部へと散乱された物質からでき上がっている。

◇これらの星の死に伴う爆発は、この宇宙で最大の現象である。

爆発による輝きは、数カ月をわたって銀河系の数十億の星々を合わせた輝きよりも明るくなる。

それほど明るさにもかかわらず、実は、爆発で解放されるエネルギーのやっとなんか1%が“見えている”だけである。

中心核の崩壊によって、電子と陽子が合体し、中性子とニュートリノが作り出される。

そして、中性子同士は互いに寄り集まって、高密度の流体を形成する。

その重さはティースプーン一杯で100万トンにも達するのである。

◇ニュートリノは中心核から出ていくが、すぐに出ていくわけではない。

超高密度な周囲の圧力の影響を受けるので、ちょっとの間 捕まえられるってしまうのである。

その後、ニュートリノは外部へと出て行き、爆発で解放されたエネルギーの99%を持ち去ってしまう。

ニュートリノが中心核を出ていくのに10秒を要するが、この距離は本来ならば、1マイクロ秒で通過できる距離なのである。

そしてこの間に、ニュートリノは周囲の物質と熱的平衡状態に達する。

1940年に、ジョージ・ガモフとブラジルの物理学者、マリオ・シェーンベルクが、収縮していく星の中心核の冷却メカニズムとして、ニュートリノのバーストを考慮した最初の論文を書いた。

期待に違わぬユーモアをこめて、ガモフはこの過程を、リオ・デ・ジャネイロにあるウルカというカジノに因んで、ウルカ過程と呼んだ。

ここでは、賭けをする人たちのポケットから、お金がどんどん流れ出ていくからであった。

◇この種の星の爆発は、50億年の間に1億回以上は起こるので、中国の天文学者、ティコ・ブラーエ、ケプラー、ガリレオが見たように、数百年に一回は、肉眼でこのような星が見えると予想される。

しかし、爆発する星の中心核からのニュートリノを観測し、星の中心核温度を決定することは、極めて難しいのである。

【36】ブラックホールと緑の小人たち

◇カナダのシェルトンとニュージーランドのジョーンズの二人が大マゼラン雲中の青色超巨星サンドリーク 69202 があった場所に、超新星の爆発を見たのは、1987年2月23日だったが、この爆発は実際には、ずっと以前に起こっていた。

この星は大変遠くにあったので、星からの光が地球に届くのに、17万年もかかった。

この時の明るさが、爆発がどれほど強力なものであったかを想像させてくれる。

しかし、爆発で解放されたエネルギーの99%が、星の外層部を突き抜けていくニュートリノによりもち去られた。

ニュートリノはほとんど光速で運動すると考えられているので（多分、光速よりほんの少しだけ遅い）、ニュートリノも、この星から私たちの所に届くのに 17 万年かかったのである。

◇光の信号とニュートリノの信号には、重要な相違が一つある。
光は爆発を取り囲んでいる雲から、何カ月や何年もかかって洩れ出てくる。
また最初の光は、何時間かかってやっと出てくる。
ところがニュートリノは、わずか 10 秒ほどの間に一気に外部に出てくる。
遠くの天体からやってくるわずか 10 秒間のニュートリノのバーストを検出するのに必要な装置の建設と維持は、容易なことではない。
もしそれだけが目的だったら、このような装置が建設されることは、まずなかったことであろう。
このような超新星現象は、数百年に一回しか起こらないと予測されているからだ。
幸運にも、レイ・デーヴィスのものと似た検出器が、1980 年初めに、オハイオ州のモートン岩塩鉱山、日本の神岡鉱山の地下、ロシアのウラル山脈中のバクサンの三カ所に建設された。
これらの主な目的は、非常に稀だと推測されている陽子崩壊を探すことにあった。
神岡の装置は、比較的近くで起こる超新星爆発からのニュートリノのバーストを検出し、これらのニュートリノの到着時間を決めることもできるもので、無人で電子式に現象を記録するよう設計されている。
予想では、各々の検出器に数個のニュートリノは届くと考えられた。
果たして、ニュートリノは予想どおりやってきていた。
実際に、10 秒にわたるニュートリノのバーストが、世界時で 1987 年 2 月 23 日の 7 時 35 分 40 秒に捕まえられていた。
この樹間は、最初の光が写真乾板に写るよりも、3 時間ちょっと早かった。
神岡は 11 個、モートンは 8 個、バクサンは 5 個のニュートリノを記録した。

◇予測に合致したのは、ニュートリノ数とこれらの到来時間だけではなかった。
ニュートリノは中心核からとび出した時、熱的平衡状態にあった。
バクサン、神岡、モートンの三グループは自分たちのデータを調べて、ニュートリノのエネルギーを推定した。
このエネルギーは 17 万年の旅路の中で一定に保たれていると考えられる。
これらの解析結果は、ニュートリノがとびだした時の中心核の温度、つまり 1000 億 K における温度分布が、これらニュートリノに反映されていることを示した。
理論と実証的証拠はあまりによく一致した。

◇ここにはまだ、いくつかの謎が残されている。
超新星爆発は、大量のエネルギーを解放するが、その時星の中の核燃料はすでに消費し尽くされてしまっている。
では、何が爆発を引き起こすのだろうか。
皮肉なことだが、急速に崩壊していく星について考察され始める 100 年も前に、ケルビン卿とヘルマン・フォン・ヘルムホルツは、太陽の一生を説明しようとした際に、すでにこの問題に対する解答を見つけていたのであった。
ケルビン＝ヘルムホルツ機構と呼ばれる重力収縮過程は、太陽エネルギーの創出についてはさして大きな寄与をしていない。
しかし、大きな星の中心核が半径数キロメートルにまで収縮する際の重力エネルギーの変化は、本当に莫大である。
エネルギーの保存則により、減っていく重力エネルギーは、違った形のエネルギーに生まれ変わる。
このエネルギーの一部は輻射に変換されるが、大部分はニュートリノの運動エネルギーに姿を変える。
わずか 10 秒の間にニュートリノは、太陽が 100 億年かかって解放するエネルギーと同じほどのエネルギーをもち去るのである。

◇（太陽の）崩壊時における中心核の温度は 1000 億 K ほどだが、これが（星の）上限だという理由はない。

1 兆 K、100 兆 K でいけない理由があるだろうか。

温度上昇をもたらすケルビン=ヘルムホルツ機構とは、つまるところエネルギーの保存則のことである。

丘をころがり落ちるボールが位置エネルギーを運動エネルギーに変換するのと同様に、星の外殻の中性子は、中心に向かって落ちていくにつれてエネルギーを獲得する。

◇太陽の 50 倍もの星は、爆発する際にずっと高い温度の中心核を作り出すと考えることもできる。だが実は、そうではないのだ。

太陽の 50 倍の質量をもつ星の一生の終わりは、何も外部へ放射しない完全な吸収体、ブラックホールである。

あらゆるものが内部に入っていくが、外部へは何も出ていかないのである。

十分に大きな質量が十分に小さい体積に収縮すると、表面上の物は何もかも、大きくなっていく重力場から逃げ出せなくなる。

十分に小さいというのは具体的には、太陽が直接数キロメートルの球に、または、地球が直径数センチメートルの球になるということである。

これは想像を絶するような高密度だが、このような可能性を打ち消すような物理法則は存在しない。

◇十分な速度をもつ物体や、あるいは質量のない光なら逃げ出せると、考えられるかもしれない。だが、こうした逃げ道は、物質と光の振る舞いに対するアインシュタインの理論により閉ざされてしまっている。

特殊相対論を作り上げるに当たって、アインシュタインは、どのような信号も光の速さより速くは伝わらないことを明らかにしている。

質量をもつ物体が脱出するには、光より速く運動せねばならないが、そんなことはあり得ない。

◇アインシュタインは、質量とエネルギーを結びつけ、重力は基本的にエネルギーに作用するのであって、質量だけに対してではないことを示したのであった。

光はエネルギーをもっているので、光も脱出できないのである。

ブラックホールは文字通り、黒い穴である。

何物も抜け出せないのである。

ブラックホールに関する議論は 1930 年代に巻き起こったが、この証拠が見つかるのは遙か先のことと当時は思われていた。

ブラックホールが形成される以前の段階、つまり大質量星の中心核で中性子の球が生成するのは、非常に稀だと思われていた。

直径が数キロメートル程度の星からの放射などという言葉は、1960 年代にいたるまで天文学の用語にはなかった。

◇1967 年の終り頃、ケンブリッジ大学の大学院生ジョセリン・ベルが、広大なイギリスの片田舎に並ぶ電波望遠鏡に到来する放射を研究していた。

彼女は、天空の一点が異常に規則正しい信号を放射しており、その信号の間隔が 1.3373001 秒だということに気がついた。

当初彼らは、この天体に LGM（緑の小人たち）という暗号名をつけた。

二つ目、三つ目と緑の小人たちを見つけた彼らは、このメッセージが星からのものであり、交信を試みているエイリアンからのものではないと信じるようになった。

◇この星がどのようなものであったとしても、直径が数百キロメートルより大きいはずはない。

発信元は一秒ちょっとで一回転していたので、大きい星ならば表面は急激な回転によってばらばらになってしまうはずだ。

直径が 8000 キロメートルもある白色矮星は、すぐに候補から外れた。

このような巨大な天体が一秒間に 360 度回転するには、表面がほぼ光の速さで運動しなければならない。

この発見は天文学者を大いに悩ませた。

それは当時の天文学者の大部分が、死が間近の星は、白色矮星として生まれ変われるだけの量の物質を放出すると考えていたからである。

◇選択肢は中性子星かブラックホールに絞られたが、どちらも大量のエネルギーを定期的に放射するなどとは、誰も考えなかった。

超新星爆発後に残された中心核は、小さくて冷たく、非常に速く回転する。

フィギュアスケート選手が腕を胴体の方へ引き寄せると回転が加速するのとちょうど同じように、星が収縮するにつれて、星の自転する速さは大きくなっていく。

星が直径数キロメートルになれば、一秒に一回転するようになってしまう。

では、中性子星はいかにして放射するのだろうか。

ここにもう一つの驚きが潜んでいたが、その詳細は中性子星に関する初期の研究で解決されたのであった。

◇地球に磁気がある。

また、太陽にはもっと強い磁気がある。

大きな星から中性子星へと圧縮されると、磁場も圧縮され、増幅される。

地球の北極と磁極が一致していないのとちょうど同じように、急速に回転する中性子星の磁場も、回転軸に対しある角度を指している。

中性子星の磁場が一秒ごとに私たちの方へ向くと、それが灯台の明かりのように作用し、私たちを周期的に照らすことになる。

このような不思議な特性がパルスを連想させるので、急速に回転する中性子星は、しばしばパルサーと呼ばれている。

◇パルサーの発見によって、ブラックホールの研究がますます進められた。

この天体の温度について論ずるのは、意味のあることだろうか。

とりあえず、その答えは“否”である。星の表面温度は、星の表面から到来する放射を測定することにより決定されるが、ブラックホールは放射をしない。

この天体の重力場は非常に強いので、何も外部に逃げられないのである。

1975 年まではこのように考えられていたが、この年にスティーブン・ホーキングが、この議論に大きな欠点のあることを見つけたのだった。

量子力学の作用によってブラックホールは放射し、温度すらもち得るのだ。いわゆるホーキング温度である。

◇ホーキングはさらに一歩先まで進み、ブラックホールのエントロピー（内部の情報量の目安）を、彼自身の温度の概念に結びつけたのであった。

通常のブラックホールでは、ホーキングが論じる種類の放射は測定し得ないほどわずかなのだが、ブラックホールと情報との関係は、量子力学と一般相対論を融合させようとする超ひも（弦）理論を検証する上で重要な役割を果たすことが、明らかとなったのである。

一見測定不能なブラックホールの温度は、すでに新たな謎をもたらしている。

超ひも理論は、これらの謎を解く手掛かりも与えてくれるかもしれないのである。

◇星の内部、星の崩壊、そしてブラックホールの温度に対する理解が、星の形成される前の時代を振り返り、宇宙初期の温度を研究し、万物創生の歴史を明らかにする上で大いに役に立っているのだ。

【37】 基本の元素：水素とヘリウム

◇宇宙初期の物語は、空間の拡大、時間の経過、または、温度の低下を用いて語っていくことができる。

即ち、定規、時計、そして温度計である。

私たちの宇宙では、これら三つの量は同じ物語を語ってくれる。

空間は時間の経過に応じて広がっていくし、それにつれて温度も下がっていく。

これら三つのうちどれか一つだけ用いればよいのだが、宇宙論学者はよく温度を好んで使う。

◇理論物理学者、スティーヴン・ワインバーグが、1976年の著作、『宇宙創生はじめの三分間』の中で記した温度の年代記は、1000億Kから始まっている。

「この時の宇宙は、それ以降二度とないほど単純かつ記述の容易なものだった。

宇宙は分化していない物質と放射の混合物で満たされており、粒子同士は互いに非常に激しく衝突し合っていた。

このようにして、急速に膨張していたにもかかわらず、宇宙はほぼ完全な熱平衡の状態にあった。」

◇ビッグバンから1/100秒後には、宇宙の中性子と陽子の数は同じであった。

もし中性子と陽子との間に約1/2000という小さな質量の差がなく、自由中性子が崩壊することもしなかったとしたら、中性子の数と陽子の数とは、今でも同じだったであろう。

私たちの知る限り陽子は永久に存在するが、中性子は永久には存在しない。

1934年のフェルミのニュートリノ理論によれば、中性子は核内にしっかりと閉じ込められていなければ、陽子、電子、それにニュートリノに崩壊してしまう。

中性子は、一度核内に入ってしまうと、放射性核という稀な場合を除けば永久に存続する性質をもつようになる。

◇初期の中性子は、ほとんどすべて陽子と二対二で結合し、非常に安定したヘリウム核を形成する。だが、宇宙が十分に冷えていなかったため、ヘリウム核は生成したそばから放射によってばらばらにされ、中性子と陽子は結合できなかった。

ヘリウム核が生成し始めたのは、宇宙誕生後およそ4分ほどであった。

この時、温度は10億Kにまで下がっていた。

この時、水素核とヘリウム核の存在比が、おおよそ10対1に決まった。

◇水素原子とヘリウム原子はそれから数十万年後に形成されたが、この時、宇宙の温度は3000Kにまで下がっていた。

原子核が数十億Kで形成され、原子が数千Kで形成された理由は、極めて簡単である。

それは、熱平衡状態における放射のもつエネルギーと密度は、温度によって決まるからである。

初期の物質と放射の混合体が熱すぎれば、生成してくるすべての構造物を放射がぶち壊してしまうのである。

より強い力で結びついてできた核は、10億Kの破壊力にも抵抗したのである。

ずっと弱い、電子と核の間の電気的な引力によって形を保つ原子は、ずっと後になって現れた。

ビッグバンから約30万年後に原子が形成された時点が、宇宙で目に見える物質が熱平衡にあった最後の時である。

即ち、宇宙が一つの温度で完全に記述できた最後の時である。

◇10億年後には、物質密度の小さなゆらぎが大きな物質集団へと成長し始めた。

水素とヘリウムの雲が形成され、同じく水素とヘリウムからなる星々が、これらの雲の中心に出現した。

大きな星々はその中心核で重い原子核を創成し、その後爆発し、新しい星へと生まれ変わる物質を星間空間へばらまいた。

◇それでも、宇宙は主として水素とヘリウムで構成されている。

太陽の化学組成を見てみよう。

150 億年の宇宙の歴史の中で、太陽は 50 億歳と比較的若いにもかかわらず、その化学組成は 91%が水素、9%がヘリウムで、その比はやはり 10 対 1 なのである。

ほかの元素は全部合わせても 1%にも満たない。

◇これが、1000 億 K から数千 K にまでわたるおおよその宇宙の温度の年代記である。

だが、これを証明するものが何かあるだろうか。

証拠は二つある。

一つは宇宙の水素とヘリウムの存在比が、宇宙はかつては熱かったという理論から予測される値と一致するということである。

もう一つより直接的な証拠が、1964 年に発見された。

これは宇宙論を永久に変えてしまった。

【38】三Kの光子

◇初期宇宙の生き残りの放射、もっと正確には、原子が生成した時に置き去りにされた放射が、1964 年に偶然発見されたのだった。

ベル研究所のアルノー・ペンジースとロバート・ウィルソンは、銀河系の中心方向から到来する電波ノイズの原因を突き止めようとしていた。

彼らは、銀河の中心方向から 90 度離れた静かな宇宙空間にアンテナを向け、ノイズのない状態で装置を調整しようとした。

ところが、弱いレベルの信号が現れ、どこへアンテナを向けてもそれは消えなかった。

この放射は、地球、太陽、また遠くの星々から到来するものではなかった。

時間とともに変わることもなかったし、方向を変えても変わらなかった。

放射がどんなものであったとしても、その起源は空自体にあるように思われた。

この信号は電波雑音で、校正により生じるのかもしれないと考えて、あらゆることを調べてみたが、この雑音に変化はなかった。

◇電波技術者は、アンテナを決まった周波数に同調させる。

アンテナを天空上の目標に向けて、放射の強度を測定する。

決まった周波数におけるある放射体からの信号強度は、「等価温度」という形で記録される

この用語の意味は、記述のウィーンの法則からわかるように、熱平衡にある系は、放射強度対周波数の関係を示す曲線における最大値（これは温度で決まる）で代表される放射を放つ。

放射強度対周波数の関係を示す曲線には無限の種類があり、それぞれの曲線は、異なる周波数で最大値をとる。

非常に重要なのは、これらの曲線がどれも互いに絶対に交叉しないことである。

いいかえれば、任意の周波数で測った強度は、たった一つの曲線上にしかのらないのである。

◇ここからは少し複雑だ。

周波数を変化させながら、おのこの周波数での強度を測定したとしよう。

得られる結果は、周波数と強度の関係である。

放射源が熱平衡状態にあれば、測定結果は放射源の温度を教えてくれる。

しかし、もし放射源が熱平衡になっていなくても、測定結果はやはりただ一つの曲線にのる。

最初の場合には、曲線は放射源の温度を示してくれるが、第二の場合には、そうならない。

こちらは「等価温度」という数値を与えてくれる。

これは単に、測定結果がどのような曲線にのるかということを表示しているにすぎないのである。

ペンジースとウィルソンの場合、等価温度は三 K であった。

◇この信号の均一性と特定の放射源が見つからないという事実は、これが宇宙起源であることを強

く示唆していた。

天空が一様に三 K の等価温度をもっているように見えた。

だが、空虚な天空が熱平衡にあると考えても、何の意味もなかった。

◇プリンストン大学の理論宇宙物理学者、ジェームズ・ピーブルスは、宇宙の初期に存在した熱平衡の生き残りとして、どんな種類の均一な放射が夜空に見えるだろうかを考え続けていた。

◇放射強度対周波数のプロットに見られる最も面白い特徴の一つは、マクスウェルが提案した熱平衡にある分子における数密度対エネルギーのプロットと、驚くほどよく似ていることである。

これは偶然ではない。

アインシュタインが最初に示したのだが、放射は光子という「量子」、つまりエネルギーの小塊からなるものと考えられるのである。

光子のエネルギーは放射の周波数に比例し、放射の強度は光子の数に依存する。

◇このように見ると、強度対周波数の関係は、光子数対光子エネルギーの関係に大変よく似ていることになる。

そして当然、熱平衡にある放射は、温度で決まるある値のところに最大値をもつことになるのである。

◇放射が熱平衡状態にあるためには、光子は周囲と相互作用する必要がある。

光子は電荷に影響を受けやすく、負電荷の電子や正電荷の陽子によりたやすく散乱されるが、これらの粒子はともに、初期宇宙の濃密な 3000K の環境にも存在していた。

電気的に中性な光子はお互いに直接散乱し合いはしないのだが、初期の光子は、電子や陽子による散乱によって絶えず運動を変えながら熱平衡を保ち、電子や陽子と共通の温度を維持した。

しかし、一旦水素原子が形成されると、事情が変わった。

つまり、電子と陽子が結合すると電気的に中性になるので、光子からはまったく見えなくなる。

原子が形成されると、光子は周囲と相互作用をしなくなるのだ。

◇ペンジーアスとウィルソンが検出した光子や、今日私たちが見ている光子は、過去 150 億年にわたってまったく邪魔されずに運動してきた。

しかし光子は、宇宙の膨張によって大きく変化した。

宇宙空間が広がるということは、任意の二点間の距離が大きくなることを意味する。

波長の拡大率は、大雑把に言って 1000 倍である。

つまり、原子が形成された時に熱平衡にあった光子の波長が、150 億年の間に 1000 倍になったということだ。

重要なのは、光子すべてが同じように変わっていくので、分布上の互いの関係は不変だということである。

ウィーンの法則には、もう一つ面白い特徴がある。

それは、波長が 1000 倍に増加して周波数が $1/1000$ に小さくなくても、温度を $1/1000$ にするだけで同じ曲線が得られるという特徴である。

強度が最大となる周波数は温度に比例することからピーブルスは、最大値を 1000 倍だけ動かせば、温度を 1000 倍した時の曲線が得られるということを示した。

ペンジーアスとウィルソンが観測した光子を専門的に正しく表現すると、「3000K の熱分布由来の光子の波長が 1000 倍に引き伸ばされたもの」ということになる。

これを簡単に表現する言葉が「三 K 光子」である。

◇ペンジーアスとウィルソンの測定は、強度対周波数の曲線上の一点についてだけのもので、直感に基づく理論の正しさを示唆したにすぎなかった。

この論争に終止符が打たれるのには、その後 25 年かかった。

25 年後、全周波数での測定によって完全な熱平衡曲線——1000 倍に引き伸ばされたもの——が

得られた。

◇すなわち、1990年に、COBE（宇宙背景放射観測衛星）は、宇宙のある一方向に検出器を固定して、2.735Kの放射曲線を描き出した。

COBE搭載のもう一つの検出器は、天空上のさまざまな方向に向けられるように設計されており、いろいろな方向からの放射についてデータを取った。

二つ目の検出器は、放射温度における小さいが統計的に有意な差を探した。

例えば、ある方向では2.735K、また別のある方向では2.736Kというふうなのである。

◇つまり宇宙は、原子が形成された時、完全に均一ではあり得なかったのである。

何か小さな種がすでにそこにあり、この種が銀河群を作り出すことになる「ゆらぎ」に成長していったのである。

アメリカ物理学会の1992年4月の会合に提出されたグラフは、温度の差の二乗を(1/100万)Kの単位で測定し、それを観測方向の角度分解能に対してプロットしたものであった。

予想された小さな差が、そこにはあったのである。

今ではすべての宇宙論入門の授業で、この宇宙の温度図が用いられている。

6. 量子飛躍

【39】量子世界と絶対零度

◇温度という視点で量子力学を眺めてみる。

量子力学は私たちの日々の生活にも関係しており、コンピュータのチップが働く理由や、水素が酸素と結合して水を作り出す理由を明らかにしてくれる。

また別の分野では、なぜ太陽の中心核が私たちを温めてくれるのかとか、太陽が白色矮星となってもなぜ中心核はつぶれないのかといった疑問に、量子力学は答えてくれる。

温度は、これらすべての過程に深い役割を果たしているのである。

◇絶対零度に近づこうとする試みは、低温の世界が量子の世界と密接につながっていることがわかったことで、ますます重要性を増してきたのである。

超電導、超流動、ボーズ=アインシュタイン凝縮など、絶対零度付近における謎めいた物質の振る舞いは、量子力学の法則の下でのみ理解できる。

そしてこれら低温の世界が、量子的な世界を明らかにしてくれるのである。

◇さらなる低温を得ようとする科学的な努力は、絶対零度の概念が定式化されるより随分、以前に始まった。

1800年には、既知の気体すべてを液化することが目標とされた。

19世紀の中頃には、マイナス273度Cが可能な最低温度で、これ以下はないということが明らかになり、低温実現の試みには、ずっと深い意味がこめられるようになった。

20世紀には、量子世界の新現象の多くは、絶対零度近くでしか現れないことが明らかになった。

【40】ファラデーの永久気体

◇18世紀の終わりまでには、化学的な分離法を使って、大気中にあるいろいろな成分の単離に成功していた。

次に生じた問題は、これらの気体を液体に変えるのには、どんな手段を使ったらいいかというもの

であった。

フランスのアントワーヌ・ローラン・ラヴォアジエは、水素と酸素から水が生成するような反応の本質を、現代的な方法で眺めた最初の人であった。

彼は元素の個性を理解し、温度を下げれば大気中の気体成分を液化できるだろうと推測した。

この考え方は、ジョン・ドルトンにより継承された。

1801年に、ドルトンは、

「圧縮可能なすべての気体を液化できるという考え方に、疑問はほとんどない。

それを行うのに低温と高圧が必要だからといって、私たちはひるんではならない。」

と語った。

◇ドルトンのこの言明こそが、既知のすべての気体を液化しようとする競争の口火を切ったと、私は考えている。

そしてこの競争は、実際には100年ちょっと後に、カマーリング・オンネスによる1908年のヘリウムの液化によって終わった。

気体を液化した偉大な実験家のうち、最初の人と最後の人の業績だけを、ここでは語ることにしたい。

◇マイケル・ファラデーは、19世紀における第一級の実験科学者であった。

ファラデーの実験は簡潔かつ見事なもので、実験記録はノートに注意深く書きとめられた。

実験でどこが重要な点なのかを見分ける抜群の才能をもっていたファラデーは、正規の教育を受けてはいなかったが、大きな枠組みで物事をとらえる感覚に長けていた。

彼は、電流と磁場との結びつきを解明する上で先導的な役割を果たし、現代の電力産業への基礎を築いた。

力の統一理論を求めて、ファラデーは電気と磁気とのつながりを明らかにし、その後、電磁気と光の間のつながりも確立した。

多くの面で彼は、マクスウェルの電磁気理論とその後の波動理論を予見していたのである。

◇化学に関しても、ファラデーの研究成果は豊富である。

彼はベンゼンとイソブタンを発見し、ナフタリンの化学式を導き、炭化水素族という一連の化合物の存在を確立し、電気分解、合金、それに粘土についても先駆的な研究をした。

ファラデーはまた、気体を液化させる達人でもあった。

彼が液化に成功したのは、塩素、アンモニア、二酸化炭素、二酸化硫黄、一酸化窒素、硫化水素、シアン化水素、エチレンで、これらはすべて彼の実験ノートに記録されている。

1845年に彼は、酸素、窒素、水素を液化するには、当時の実験装置では温度と圧力が不足していることに気づいた。

こうした気体を「永久気体」と呼んだファラデーは、これらの元素の液化を未来の科学者へ託したのであった。

◇1898年までには、ファラデーが書き記した気体はすべて液化された。

たった一つの気体だけが液化されていなかったが、それは1868年まで発見されず、当時、太陽にのみ検出されたもので、彼のリストには元々なかった気体である。

この気体は、当時まだ目新しかった分光技術を用いて発見されたものだった。

その名前はヘリウムで、ギリシャ語で太陽を意味するヘリオスから由来した名前である。

【41】最後の液体

◇1895年にウィリアム・ラムゼイは、ウラン鉱石から放出される気体を加熱していた時、その気体からの放射がヘリウムと同じスペクトル線を示すことに気づいた。

これにより、この元素が地球上に存在するのか否かという論争が決着した。

さらに、ヘリウムは不活性な気体で、他のどの元素とも化学的に結合しない元素であるということ
を、彼は見出した。

ヘリウムが単離されると、それを液化することが新たな目標となった。

◇カリウム 40、トリウム 232、ウラン 235、それに、ウラン 238 は、地球の加熱に大きく寄
与する四つの放射性同位体である。

最初のカリウム 40 はカルシウムに崩壊し、他の三つは鉛の同位体に崩壊する。

トリウム 232、ウラン 235、そして、ウラン 238 はどれも、アルファ粒子の放出により崩壊す
る。

ラザフォードはいつもの直観力で、アルファ粒子の正体はヘリウム核ではないかと疑い始めた。

1904 年に彼はこのことをほぼ確信し、1908 年にこれを証明した。

ヘリウム核は、重い原子核から出ていく時に他の原子や分子と衝突して電子を捕まえ、ヘリウム原
子になる。

このヘリウムは軽くて不活性なので、宇宙空間に簡単に漂い出してしまう。

これが大気中にヘリウムが比較的少ない理由である。

だがヘリウムは、新しい放射性崩壊により常に補給されている。

金鉱山内の熱と、科学者たちが液化しようと試みていたヘリウムとともに、同じ源、つまり放射能
からきていたのである。

◇あらゆる気体を液化しようという競争において、ヘリウムは最終目標となった。

それは、水素を含めほかのすべての気体が液化する温度以下でも、ヘリウムは気体にとどまってい
たからである。

温度が 10K に達しても何の成果も得られなかったので、競争者たちは、この液化がいかに大変か
に気づいたのだった。

王立研究所でファラデーの後継者だったジェームズ・デュワーは、水素を液化した人物であり、彼
が一番先に達成するのではないかと思われた。

しかし結局のところ勝者は、オランダの新参者、ヘイケ・カマーリング・オンネスとなった。

◇オンネスとラザフォードの二人は、20 世紀の実験物理学における偉人となった。

それぞれ、低温物理学と核物理学の現代学派の建設者であった。

二人はともに変革期の人であった。

どちらも、自ら装置を作り、自分で測定をし、自分で実験ノートを作った孤独な研究者の時代から、
チームを組んで特製の装置を組み立て、研究結果は専門誌に発表するという現代のスタイルへの移
行を体現した。

オンネスとラザフォードは、ともにノーベル賞を受賞している。

オンネスはヘリウムの液化に対して、ラザフォードは放射性崩壊の連鎖を解明したことに対しての
受賞だった。

その研究成果はどちらも、ずっと後の大発見につながっていった。

オンネスの場合は超電導であり、ラザフォードの場合は原子核であった。

ラザフォードは、マンチェスター、およびケンブリッジでキャベンディッシュ研究所長として、学
生や研究助手をたくさん集めた。

オンネスはグループを組み、ライデン大学に研究大国を築き上げた。

◇1906 年にオンネスの実験施設で水素が液化された時には、デュワーが初めて水素を液化してか
ら 8 年が経っていた。

しかし、彼のグループが成功した時には、一日に約 1 リットルの液体水素を生産できるようになっ
ていた。

この量は、デュワーが数滴だったのと比べれば膨大な量だった。

液体空気と液化水素が大量に供給できたことを受け、ヘリウム液化の最終計画が 1908 年の 6 月
に実施された。

この実験は7月10日の午前5時45分に始まった。

午後になり約20リットルの液体水素が得られたところで、ヘリウム気体が液化装置に注入された。気体の温度は下がり始めた。

冷却はその後数時間にわたって続いたあと止まったが、ガラスのビーカーの内壁に液体ヘリウムはまったくついていなかった。

とうとう午後7時となり、冷却液の液体水素がほとんど底をついた時、フラスコの底の下に置いた灯りが、底にたまった液体を照らし出した。

ついに、ヘリウムが液化されたのだった。

◇これで、すべての気体が液化された。

そして、当時はまだ明らかではなかったが、より大きい重要性がこの低温にあったのである。

ところで、若者対老人という対立軸については、理論物理学と実験物理学では事情が違っている。

25歳のニュートンやマクスウェルのような天才は、優れたアイデアを抱き、すぐに大仕事をやってのけたのだが、一方、実験物理学は、一瞬にして成果を上げるというわけにはいかない。

ラザフォードは原子核を発見した時、43歳であったし、オンネスがヘリウムを液化した時は、55歳であった。

【42】超電導

◇ライデンのグループは、物質を絶対零度から数度上にまで冷却するに足る液体ヘリウムを得ると、物質が極低温でどのように振る舞うのかを研究し始めた。

電流に対する抵抗、つまり伝導度の研究である。

温度が下がるにつれて、抵抗は減少し、伝導度は増加する。

しかし誰も、液体ヘリウムの温度で、これらの性質を研究したことはなかった。

オンネスの実験施設で得られた最初の測定結果は、予想どおり抵抗の減少を示した。

オンネスは、この傾向が絶対零度に達するまで続くであろうと信じた。

これは勝手な思い込みではなかった。

というのは、ケルビン卿が、電流の運び手である電子は、温度が絶対零度に近づくにつれて遅くなり、ついには止まってしまおうと論じていたからである。

つまり当時は、温度がゼロになるにつれて電流が流れを止め、抵抗が無限大に近づくと考えられていた。

◇オンネスたちは、良導体として知られている白金と金の抵抗を調べ始めた。

しかし、金属中の不純物が電流の流れを止めるのではないかと考えて、彼らは次に水銀へと対象を移した。

室温で液体である水銀は、くり返し蒸留することにより容易に精製できたのである。

1911年の秋、オンネスたちは極めて純粋な水銀を用い、絶対零度から4度上での電気伝導度の測定を行う準備を整えた。

電流の変化、即ち、抵抗の変化を示す針には、小さな動きも見逃さぬよう、発光器が取り付けられていた。

純粋な水銀が細いU字形のガラス毛細管に入れてあり、その両端につけた白金の電極を通して、電流が流れるようになっていた。

すべての設定が済み、オンネスとジュリ・フリムは、水銀の温度を下げ始めた。予想どおり抵抗は、毛細管内で凍り固体状態となった水銀の中でも減少していった。

ところが、予想だにしないことが起こった。4.19Kで、ワイヤの抵抗が突然ゼロに落ちたのである。

実験装置を分解して、組み直し、再び実験してみたが、結果は同じだった。

そのあと何週間にわたって、実験が繰り返された。

しかし、結果は変わらなかった。

オネスは、細い W の形をした管の中に水銀を入れることにした。
そして、管の両端の他に、W 字形の尖った部分にも電極を取りつけた。
こうすることにより、水銀の導線の中の四つの部分を同時に調べることができるようにしたのである。
どこかに短絡したところがあったとしても、導線の四つの部分すべての抵抗が同時にゼロになるはずはなかった。
だが実際は、すべてゼロになったのである。

◇実験は繰り返され、水銀の導線の抵抗は、4.19K で急にゼロに落ち、温度が4.19K より上がると再び急に生じることが明らかとなった。
他の金属も試された。
錫と鉛の導線も、液体水素の温度では抵抗が相当大きかったが、極低温では抵抗が消えてしまった。
このように抵抗が消滅する現象を、超電導と呼ぶ。
この新発見が重要な実用的応用をもたらすだろうとオネスは期待したのだが、その実現までは生き長らえなかった。
送電に超電導の導線を利用する利点は魅力的だった。
既述の、ジェームズ・ジュールが、エネルギーがいろいろな形へ変換されることを証明した話の中で私は、導線中を電流が流れると熱が生成されると述べた。
今では、ジュール熱として知られる現象は、抵抗と導線中の電流強度の二乗に比例することがわかっている。

◇半導体は 20 世紀の後半に技術を一変させ、トランジスター、集積回路、それにコンピュータを実現可能とした。
一方、超伝導体は、電力のコストを変え、電力配送の仕方を変える可能性をもっている。
磁気共鳴画像 (MRI) 装置にはすでに超電導磁石が使われているが、この磁石は芯の周りに超電導電気コイルを巻いて作られている。
このようなコイルを使わないと、強力な MRI 磁場を作り出すのに必要な大電流は、あまりに多くのジュール熱を発生してしまう。
超電導磁気浮揚により動く列車が試験段階にある。
だが、こうした前途洋々の技術革新にも落とし穴がある。
それは温度である。
超電導に必要な極低温に到達するには、難しいしコストもかかる。
100 キロメートルの長さの超電導の錫のケーブルは、導線に比べてエネルギーを少ししか失わないが、作るのが難しく、維持も難しい。
超電導に関する 20 世紀の研究は、物理学、化学、そして新たな分野である物質科学の重要な推進力であった。
こうした研究の二つの目的とは、超電導を引き起こす機構を理解することと、新しいよりよい材料、つまり、より高温で超電導を示す材料を見つけることなのである。

◇1980 年代半ばまでは、30K 以上で超電導を示す材料は見つかっていなかった。
この温度はまだ液体窒素の液化温度の 77K からずっと遠かった。
1986 年、衝撃的な出来事が二度立て続けに起こった。
チューリッヒの IBM 研究所にいた二人の科学者、ゲオルグ・ベドノルツとアレクサンダー・ミュラーが、セラミック様の物質、LBCO (ランタン・バリウム・銅の酸化物) が 35K で超電導を示すことを見出した。
この新材料は通常の金属とは非常に違うものであり、まったく新種の超伝導体の存在を示唆していた。
興奮は一年後には狂騒となった。
ポール・チュウとモー・クエン・ウーが、77K という液体窒素の壁を遥かに超える 93K で YBCO (イットリウム・バリウム・銅の酸化物) が超電導を示したと発表した。

1993年には、MBCCO（水銀・バリウム・カルシウム・銅系酸化物）が、常圧で134K、高圧にしたらもっとずっと高い温度で超電導になることが発見された。

◇10年以上経ち、事はそれほど容易ではないことがわかった。
これらの新しい材料は銅の酸化物であり、金属とは全く違う。
これらの多くは、特異な化学的構造をもった時しか電気を伝えない。
しかもその構造は、洩れ出た磁場や不純物ですぐに壊れてしまうのである。
本来、セラミックはもろく、成形が難しく、導線にまるめることも非常に難しい。
実現が不可能だと言っているのではない。
しかし、この種の超電導は、金属の超伝導体とは異なるものである。
超電導の印である抵抗の急激なゼロへの低下は同じように起こるのだが、この遷移に関する他の特性は違っている。
室温超電導は可能なのだろうか。
まだ発見されていない別の機構があるのだろうか。
もっと進歩することはあり得るのだろうか。
多分、答えはイエスだ。
安くて作りやすい二硼化マグネシウムが、これまでの限界より約10Kも高い39Kで金属的な超電導を示すことが、発見された。

◇オンスはこうした新しい発展をすべて自らの目で見てみたかったであろう。
彼は、自分の実験施設がヘリウムの固化に成功するちょうど三週間前に亡くなった。
低温物理学の領域は駆け足で進んでいる。
オンスは液体ヘリウムを固化しようとした。
しかし、いかに温度を下げようと、圧力を上げない限り、ヘリウムは決して固化しないことがわかった。
オンスの実験施設では、圧力が25気圧に達した時、2.5Kで液体ヘリウムが新しい別の形になることが見出された。
その後、新しい展開があり、固体ヘリウムは30気圧、1.8Kで結晶構造を変えることが示された。
低温の限界もさらに先へと進んでいる。
ディヴィッド・リー、ダグラス・オシェロフ、ロバート・リチャードソンの三人は、ヘリウム4のごくありふれた同位体であるヘリウム3のいくつかの異なる相の研究で、1996年度のノーベル賞を受賞した。
A相は、絶対温度1000分の2.7K以下で現れ、1000分の1.8K以下でさらにB相に変わるのである。
将来の発見と応用がどんなものになるかは、いろいろな要素に依存してる。

【43】二重性、排他律、不確定性

◇超電導について理解したり、電気伝導体と絶縁体との違いについて知るには、少しばかり量子力学の知識を必要とする。
ここでは三つの重要な原理を語るだけにしよう。
二重性、排他律、不確定性の性質は、不思議で、直観性に反し、一見逆説的である。
だが量子力学は、私たちによく知られた概念を単に違った見方で見ようとするものではなく、現実をより深いレベルから新たな形で捉えるものなのだ。

◇ある意味では、この学問は1900年に、温度の問題として始まった。
どうしても解決できない大問題が熱力学に現れた。
ウィーンの法則は、放射強度対周波数の曲線における極大値を予測するものだ。

この極大は、温度に応じて決まった数値をとるが、問題は、この曲線の形を導こうとする試みがすべて失敗したことである。

それどころか、これらの試みはすべて極大をもたない曲線という意味不明の結果をもたらした。理論によれば、周波数が大きくなるにつれて、強度が増加し続けると予測された。理論と実験結果がまるで合わなかったのであった。

◇放射と吸収を同時に考えることが何か問題を引き起こしているのではないかと考えられた。

そこで物理学者たちは、完全な放射体や完全な吸収体について考え始めた。

本来ウィーンの法則は、放射を完全に吸収する内壁をもった断熱性の炉に対してあてはまるものだった。

この炉は完全に一様な温度に加熱され、内壁はどこも一様でなければならない。

放射が外部に出られる唯一の出口として炉の片側に小さな窓をつけて、理想的な条件の下で強度対周波数の曲線を調べる必要があった。

◇このような放射は黒体放射と呼ばれた。

しかし、厳密に制御された状態でも、実験は理論と合わずじまっていた。

理論は、周波数とともに強度がどんどん増加することを予測していた。

実験結果のように、増加したあと減少するような曲線は出てこなかった。

終わることのない破滅的な増加は「紫外発散」と呼ばれるようになった。

可視光の紫の領域の周波数を超えても強度の増加が続くからである。

◇何人かの科学者が、実験結果に合った理論を組み上げようと挑戦していたが、中でもプランクは最も精力的に挑んでいた。

炉を加熱したときに実際に放射を発生するのは、原子である。

放射を起こす過程の詳細は問題ではなかった。

問題だったのは、発生源のエネルギーが温度で決まる平均値を中心に滑らかに分布しているという考え方であった。

どんな理論からも正しい答えを導けなかったし、極大値をとるような曲線も得られなかった。

◇1900年に、プランクは今まで一般的に受け入れられている考え方を捨て、データに合う公式を得るのに、大胆な手法を取ったのであった。

プランクは後に、次のように回送している。

「こうなったのは、落胆のなせる業であった。

私は六年間にわたって、黒体理論に取り組んできた。

この問題の重要性も、その問題の答えもわかっていた。

だから、熱力学の第一、第二法則を破らない限り、どんなことをしてでも理論的な説明を見つけねばならなかった。」

◇発生源の平均エネルギーは、温度によって決まっていた。

プランクは、なかなかこの仮定を捨てることができなかった。

捨ててしまえば、熱力学の法則を破ることになるからだ。

だが、彼は最後にはこの仮定を捨て、エネルギーが平均の周りに滑らかに分布するという前提を捨て去った。

彼が提案したシナリオは、エネルギーは連続的に変化するのではなく、段階的に増えたり減ったりすることができるというものであった。

この各段階を、彼は量子と呼んだ。

各段階におけるエネルギー量は、放射の周波数に比例していた。

その比例定数は、プランク定数と呼ばれる数である。

◇プランクは、自分から望んで革命を引き起こしたのではなかった。

一方、アルバート・アインシュタインは、進んで革命を起こそうとした。
奇蹟の年、1905年に、アインシュタインは空間、時間、それに同時性に関する従来の概念をひっくり返したが、同時に、量子に関わる問題にも特有の大胆さをもって挑んだ。
プランクは、空洞の壁に含まれる放射の発生源が、量子化されたエネルギーをもつと主張した。
アインシュタインは、もしそうだとしたら、放射自体が量子化されるはずだと主張した。
放射のエネルギーは、常にひとかたまりの量子として放射したり吸収したり移動したりするのだ。

◇アインシュタインは、光に対する科学的な認識を、二つの方法で変えてしまった。
自分が定式化した特殊相対性理論を用いて、彼は、光の速さを宇宙で最も速いということを示した。
彼は自らの量子論により、光の本質的な概念を一変させた。

◇1670年にニュートンは、光は粒子性のものだと述べた。
その130年後に、トマス・ヤングは光が波動であることを証明したのだった。

◇1905年にアインシュタインは、光が両方の性質をもつのだと主張した。
光は、粒子として見れば粒子のように振る舞うし、波動として見れば波動のように振る舞うのである。
光は、粒子として波動の周波数に比例したエネルギーを運ぶ。
そして、波動として粒子のもつエネルギーに比例した周波数をもつ。

◇後に光子として知られるようになったこの粒子は、実はかなり不思議な種類の粒子である。
これは質量をもたず、光の速度でのみ移動する。
光子は波動のふりをした粒子ではないし、粒子のふりをした波動でもない。
同時にどちらでもあるのだ。

◇アインシュタインはこの二重性によって物理学者たちを困らせた。
この1905年の考察が、量子論の出発点となった。
アインシュタインは、この光量子の理論により、1921年ノーベル物理学賞を受賞したのだった。

◇量子の実在を確信したアインシュタインは、他の科学者たちにこの実在を信じさせるために急いで先へと進んだ。
1907年、アインシュタインは、固体内の原子の振動について研究した。
室温では、ダイヤモンドは加熱しても、当時予想された値の20%以下しか温度が上がらない。
アインシュタインは、内部の原子振動が滑らかに分布しているのではなく、それが量子化されていると仮定すれば、正しい結果が得られることを示したのである。

◇ダイヤモンドの加熱の問題に続いて、光のスペクトル線の周波数を理解するという問題もすぐに解決された。
1913年、ニールス・ボーアは、新しいモデルを作り出した。
それによると原子は、量子規制によって決まるエネルギーをもった軌道電子が中心核の周りを取り囲んでいるものとされた。
ボーアのモデルと量子化に対するアインシュタインの方法とを組み合わせることによって、スペクトル線の放射の周波数に見られる規則性が説明されたのである。
物質を高温に加熱すると、電子は高いエネルギーの軌道に飛び移る。
これらの電子はまた元に戻り、光子を放射する。
この時電子は、高いエネルギーの軌道に移った時に得たエネルギーを、この光子に与える。
エネルギーの保存則により、光子のエネルギーは、二つの軌道間における電子のエネルギーの変化に等しくなければならない。
アインシュタインの規則を用いると、光子のエネルギーは放射の周波数を決定する。
スペクトル線はもはや謎ではなくなった。

◇このような進展にもかかわらず、いくつかの重要な概念上の問題が残されていた。
物理学の法則によれば、軌道上の電子は速やかに光子を放射し、エネルギーを失いながら核の中へ螺旋状に飛び込んでいかなければならない。
電子がとびとびの軌道上を回るといふ量子規制を当てはめれば、この問題の一部は解決する。
だがこれは、すべての電子が最低のエネルギー軌道に落ち込むことはない理由を説明してはくれないのである。

◇この問題は 1925 年に、ヴォルフガング・パウリが確立した排他原理により、解決された。
パウリの排他原理によれば、各原子軌道に入れる電子数は決まっており、一旦その数になると、新たな電子は次の高いエネルギーの軌道に入らねばならない。
例えば、原子中の最低のエネルギーの軌道には、二個の電子しか入れない。
水素のように、その中の一つだけが埋められている場合には、もう一個電子が入る余裕がある。
逆に、この一個の電子は取り去ることもできる。
水素は容易に電子を付加したり取り去ったりできる。
このことが、水素原子のもつ化学的な活性を説明している。

◇これに対しヘリウムは、最低のエネルギーの軌道に二個の電子が入り、すでに一杯になっているので、新たに電子を加えることも、外部に放出することもしない。
したがって、ヘリウムは化学的に不活性なのである。
三個の電子からなるリチウム原子は、最低のエネルギーの軌道に二個の電子、次の軌道に一個の電子をもつ。
この外側の電子は簡単に動けるので、リチウムは化学的に反応しやすい。
次々と元素を見ていくと、排他原理のよって各原子の化学的活性の程度がわかり、どのような種類の分子結合ができるのかを予測することができる。

◇この原理はさらに、高いエネルギーの軌道にある電子が最低の軌道に落ちてこない理由、つまり、原子の安定性をも説明する。
古典物理学によれば電子は最低の軌道に落ちるはずだが、排他原理によれば、下の軌道が空いている時しか電子は落ちてこない。
この原理を言葉で表すと、同時に二個の電子が同じ量子的な配置——「状態」——をとることはできない、となる。

◇最低の軌道にも二つの状態があるのは、電子がスピンをもっているからである。
このスピンとは、電子が固有にもつ性質で、上向きと下向きの二つの状態をとる。
ヘリウムの最低軌道にある二つの電子のうち片方のスピンの上向きなら、もう一方は下向きである。
同じ軌道でスピンの異なれば、それらは異なった状態にあることになる。

◇しかしながら、排他原理からは、軌道上の電子のエネルギーは決定できない。
また、電子が軌道上を運動するとはどういう意味なのかも説明できない。
こうした問題は、1926 年にヴェルナー・ハイゼンベルクとエルヴィン・シュレーディンガーによって解決されたのであった。
その理論は一言で量子力学と呼ばれているが、これは、量子、波動、粒子の三つをめぐる 25 年間の思考の集大成である。

◇アインシュタインは、光の波動には二重性があり、それは光子という粒子としても扱えるということを示した。
フランス人のルイ・ド・ブロイは、1920 年代初めにこの考えを素直に拡張し、電子を波動として扱うこと 1 を提案した。
弦をはじいた時に出る音の波長が弦の長さで決まると同様に、ある波長をもった電子の波動だけ

が、原子軌道に合致するのである。
波長が決まると周波数が決まり、その結果、二重性から電子のエネルギーも決まる。
この新しい量子力学は、こうした考え方を含め、さまざまな現象に対する数学的な枠組みを与えてくれた。

【44】低温世界

◇極低温は、量子力学がその本質をあらわにする領域であり、今でも研究の最前線になっている。実用的な応用はまだそれほど多くないが、1996年、1997年、2001年の三つのノーベル物理学賞は、絶対零度から数千分の一度以内での物質の振る舞いの研究に対して与えられた。新しく見出された現象は、古典物理学と量子物理学の食い違いに関係している。古典物理学によれば、絶対零度に近づくにつれて運動は滑らかに停止する。しかし量子力学では、運動を滑らかに停止させるのは不可能なのである。一つの量子状態から別の状態へのジャンプは、温度が下がるにつれて顕著になる。つまり、不連続性がどんどん重要になってくるのだ。

◇低温の量子世界の理解には、さらに複雑な問題が絡んでいる。それは、不確定性原理に基づく問題である。この原理は、1927年にヴェルナー・ハイゼンベルグによって初めて定式化されたのであった。この原理は、粒子の速さと位置を同時に決定することはできないというものである。原子の運動の速さを確定すれば原子の位置は不確定になり、原子の位置を確定すれば原子の運動の速さは不確定になるのである。この原理は、極低温を理解する上で興味深い困難をもたらす。もし古典物理学に従って、絶対零度では原子の速さがゼロになると考えると、すぐに難問に直面することになる。不確定性原理によると、原子の運動速度は小さくなる、つまり温度がゼロに近づくにつれて、その原子の位置を決めるのがますます難しくなる。そして予想もしなかった新しい現象が、さらに低い温度でなされた実験で現れてきたのである。

◇面白い例は、液体ヘリウムの場合である。1910年、オンネスは液体ヘリウムの密度が2.2Kで最大となることを見出した。彼はまた、この温度で液体は沸騰をやめ静かになることにも気づいた。1920年代にはオンネスとレオ・ダーナは、「わずかな温度変化が不連続な変化をもたらすようななんらかの現象が、最大密度のあたりでヘリウムに起きている」ことを発見した。沸騰が突然止まったように見え、液体ヘリウムの表面が滑らかになったのである。彼らには、これが何を意味するのか、また、どんなことが起こっているのかわからなかった。

◇彼らの研究は、ロシア人のピョートル・カピッツアに引き継がれた。ラザフォードの弟子だったカピッツアは、ケンブリッジに世界的に有名な低温実験室を作り上げたのだが、イギリスでの彼の研究は、1935年で途切れてしまった。この年に帰国した彼は、ソ連に拘束されてしまったのである。カピッツアがロシアを離れられなくなったことを知ったラザフォードは、ケンブリッジの実験装置を彼に送ったため、カピッツアは自分の研究を続けることができるようになった。一方、トロント大学で液体ヘリウムの問題について研究していたカナダの若い物理学者、ジャック・アレンが、カピッツアとの共同研究を望んでケンブリッジにやってきた。カピッツアが西欧に戻らなかったため、アレンは、別の若いカナダ人のドナルド・マイスナーと自分の研究を始めたのだ。

◇1938年の初め、ケンブリッジにいた彼ら二人とモスクワのカピッツアは同時に、超電導に匹敵

する驚異的な発見をしたのだった。

彼らは、オンネスとダーナが捉えた 2.2K 以下での液体ヘリウム 4 の異常な振る舞いを、観察し研究していた。

低温のヘリウムは、温度が上がらない限り、容器の回転に伴って減速することなく回転運動を続けたのである。

一旦運動が始まると、その運動はまったく変化しない。

液体ヘリウムは実質上、粘性のない超流動体となったのである。

一個一個の原子の位置は、その意味を失ってしまい、すべての原子が単一の“超原子”となったのである。

◇超流動体ヘリウムが示すこうした奇妙な振る舞いは、アレン、マイスナー、カピッツアの実験より10年以上も前に、すでに予見されていた。

ベンガル出身の物理学者、サチエンドラ・ボーズが送ってきた1924年の論文に触発されてアインシュタインは、特に低温では粒子が互いを区別できなくなり、興味深い新たな振る舞いを示すことが、量子論から導かれることを悟った。

アインシュタインは、液体ヘリウムではなく、低圧で低温の状態にある気体の原子集団について考察を加えたのだった。

この方が概念的にはより簡単であった。

理由は、密度が低ければ、原子間の相互作用が弱いからである。

実験は原理的には簡単だったが、越えがたい技術上の問題があって、アインシュタインの議論から70年経った1995年まで実際に行くことはできなかった。

この年に、コロラド州ボルダーの研究グループがついに、2000個のルビジウム原子を10秒間にわたって一個の「超原子」に変えることに成功したのだった。

この実験は、ボーズ=アインシュタイン凝縮体として知られる物質を作り出したのであった。

ほとんど同時に同様の凝縮体が、テキサス州のライス大学でリチウム気体を用いて、MITでナトリウム気体を用いて作られたのであった。

だが、ここまでの行程は長く険しく、予期せざる困難に彩られていた。

1895年にヘリウムが地上で初めて発見されたときには、実験室で達成された低温は絶対零度より10度も高かった。

それからちょうど100年経った1995年、ついにボーズ=アインシュタイン凝縮体が観察された。

実験における温度は、絶対零度から1000億分の2度以下にまでなっていた。

◇さらに、ボーズとアインシュタインが予見していなかった別の問題があった。

彼らの論文が出てから一年もしないうちに、パウリが“排他原理”を提唱した。

この原理は、二つの電子が同じ量子状態をとり得ないと断定するものだった。

これは、低温によって複数のヘリウム原子が一つの超原子にまとまるということと、ほとんど逆のことを意味していた。

量子力学によれば、互いに区別できない粒子には二種類の大きく異なる振る舞い方があり、それが絶対零度付近での振る舞い方を大きく左右する。

ヘリウム原子は一方の振る舞い方をとり、電子はもう一方の振る舞い方をとるのだ。

◇量子力学には、微妙な点が限りなくある。

ヘリウム原子は絶対零度から 2.2K 上で超流動体となるが、このことは、核内に二個の中性子を持つ通常のヘリウム 4 でしか実現しないことがわかっている。

同位体のヘリウム 3 は、化学的にはヘリウム 4 と区別できないのだが、こちらは排他原理にしたがうのだ。

【45】 チャンドラの旅

◇1920年代後半、年若いアインシュタインが新しい量子力学を批判していた時、10代のインドの若者が一人、量子力学と相対性理論を必死で学んでいた。
1930年7月31日の午後、19歳のスブラマニアン・チャンドラセカールは、ボンベイからイタリア行きの船に乗った。
イタリアは、ケンブリッジまでの旅で最初のヨーロッパの経由地であった。
後に、チャンドラという名で知られるようになる彼は、船がヴェニスに到着した時には、太陽などの星の死についてある驚くべきことに気づいていたのだった。

◇1930年以前までは、すべての星が白色矮星として一生を終えるものと信じられていた。
アーサー・エディントン卿はこの説を強く推していた。
彼はイギリスの宇宙物理学の指導者であり、『星の内部構造』という本を書いていた。
この本をチャンドラは故郷のマドラスで勉強したのだった。
航海中チャンドラは、相対論的效果を考慮すると、白色矮星に対する量子力学的な取り扱いに何らかの違いが生じるのかどうかを考えていた。
彼は、パウリの排他原理によって外向きの圧力が生じ、電子が白色矮星の収縮を防ぐということを知っていたが、そこに相対性理論が影響するのではないかと疑っていた。
チャンドラが相対性理論を考慮して計算したところ、驚いたことに、星が太陽に比べてかなり大きければ、電子圧は崩壊を抑えられないことが分かった。
十分に大きな星は、冷たい白色矮星として静かに死ぬのではなく、異なった死に方をしなければならないのである。

◇チャンドラは、その後もこの問題を研究した。
博士号を取得し、ケンブリッジのトリニティ・カレッジの研究员になった彼は、1934年に、太陽質量の1.4倍以下——チャンドラセカールの限界——の小さな星だけが白色矮星となって一生を終えるのだと、自信を持って発表した。
これより大きな星は、さらに崩壊を続けるのである。
彼は、アインシュタインの一般相対性理論の擁護者であるエディントンが、自分の解釈を評価してくれるだろうと思っていた。
しかし悲しいことに、自分の指導者だと思っていたエディントンは、チャンドラの議論を信じるのを単に拒絶しただけだった。
彼は、星はすべて白色矮星となって一生を終えるという考えに固執したのである。
彼ら二人は友人だったが、星の崩壊についてのチャンドラの見解に対するエディントンの反論は、1944年にエディントンが死ぬまで続いた。
こうした困難にもめげず、チャンドラは、星の構造や星の崩壊に関する何冊かの本を書き、すばらしい経歴を積んでいった。
彼の仕事は最後まで、後進の者に深い影響を及ぼし続けたのだった。
ノーベル賞を含むあらゆる名誉を授けられたにもかかわらず、今もって彼は「チャンドラセカールの限界」で最も有名である。

◇チャンドラの説は、なぜもっと早く認められなかったのだろうか。
それには多くの理由がある。大部分の物理学者にとって崩壊する星は、あまりにもかけ離れた研究対象だった。
彼らは、新しい量子力学の意味と原子核の詳細を理解するので精一杯だったのだ。
さらに天文学者たちは、量子力学と相対性理論がもたらした物質の構造に対する新しい見方に懐疑的であった。
これら二つの学問が組み合わさって白色矮星の大きさを制限するという考え方は、あまりに遠いところの出来事だと考えられた。
「科学に対するある種の謙虚さ」は、多くの場合身につけるのが難しい。
科学研究が加速度的に進んでも、こうしたことは一向に容易にならない。

* * * * *