

# 我々は宇宙塵から生まれ宇宙塵に還る

天竺 堯義\*

はるにれ会 \*tamano@384.jp

2025 年 9 月 28 日

2026 年 2 月 15 日

## 1 はじめに

我々人類は、数千年にわたる絶え間なき探求の結果、広大な宇宙から極微な原子核、素粒子の世界までを（完全では無いにしろ）理解するに至りました。ここに至る道筋は、予め予測されていたわけではありません。超とつくほどの大天才が科学を一挙に進歩させました。しかし、それらの天才の前には数多のごく普通の研究者の一見して小さな業績の積み重ねがありました。膨大な宇宙と極微の分子・原子・素粒子とは切っても切れない深遠な関係があることが明らかになりました。

今日は、その膨大な知見とそれに至った歴史的背景についてそのごく一端を紹介したいと思います。

## 2 ニュートンにいたる道

自然科学は、観測と実験結果に基づいて理論が作られ、理論に基づいて、さらに新しい実験、観測を促し、全体の体系が作られていきます。ニュートンの万有引力の法則については、程度の差はあれ、どこかで聞かれたことがあると思います。ニュートン（1642-1727）は庭のリンゴの木からリンゴが落ちるのを見て万有引力の法則を発見したと言われることがあります、本当ではありません。しかも、ニュートンは独力で理論を作り上げたわけではありません。その前に、ガリレオ・ガリレイ（1564-1642）の実験があり、ケプラー（1571-1630）の惑星の運動にかんする法則があって、その上に立って、ニュートンは彼の運動法則に到達しました。ケプラーにしても、独力で法則を見つけたわけではあ

りません。ティコ・ブラーエ (1546-1601) の、星、特に火星の運動の 16 年以上にわたる精密な観測結果があって初めて可能になりました。ティコ・ブラーエが生きていたのは、1546-1601 年です。織田信長、豊臣秀吉、徳川家康の時代です。ティコ・ブラーエは、占星術を生業にしていました。スポンサーはデンマーク国王でした。彼は当時の占星術師が、いい加減なデータに基づいて、星占いするのが（星占いなど精度も何も必要としないいかさまですが）我慢ならなかったのも、精密な星の運行のデータをとりたかったのです。彼の時代はまだ望遠鏡は発明されていなかったのも、肉眼での観測でした。彼は、余り数学が得意でなかったのも、観測データの解析はされないでいわば宝の持ち腐れであったわけです。

そこに現れたのが、ケプラー (1571-1630) です。ティコ・ブラーエはデンマーク国王と仲違いし、その当時の神聖ローマ帝国の首都プラハのルドルフ 2 世のもとに雇われていました。ケプラーはドイツ人ですが、プラハを訪れティコ・ブラーエの膨大な観測データの解析を任されたのです。その当時、すでに地動説は確立していましたが（コペルニクス (1473-1543)）、惑星は太陽の周りを円軌道を描いて周回しているという範囲を出ていませんでした。ケプラーがティコ・ブラーエの観測データを解析した結果、地球も火星も円軌道ではなく楕円軌道を描いて太陽の周りを回っていることが分かったのです。楕円と言っても目に見えてひしゃげているというわけではありません。1 m の円を地面に書いたとして、ちょっと押して短軸が、0.03mm ほど（火星の場合は 8.8 mm）短くなる程度なのです。見た目にとっても楕円だとは見えない程度なのです。その程度の離心率が分かるほどにティコ・ブラーエの測定精度が高かったのです。観測精度が高かったため全く新しい局面が展開した一例です。（自然科学では、測定精度を高めるということは極めて重要な意味を持っています。）コペルニクスの太陽系では惑星軌道は真円とされていました。神様のお造りになった宇宙は完璧であり従って軌道は真円であると思われていた節があります。しかし、楕円であることが分かると何故という疑問が生じます。ケプラーは惑星の運動に関する、今、ケプラーの三法則として知られている法則を見出しました。ニュートンの運動法則の一手手前まで来ていました。

一方、ガリレオ・ガリレイ (1564-1642) は地上での落体の実験で大きな成果を上げました。ピサの斜塔での落体の実験の話は知っているでしょう。重いものも軽いものも同時に地上に落ちるということを示したと言われている実験です。そのための実験であったかどうか真偽のほどはわかりませんが、彼は斜面を転がる球の実験をしています。よくみがいた斜面をパチンコ玉のような玉を転がすとしみましょう。1 秒で 1 m 転がったとすると 2 秒では 4 m、3 秒では 9 m 転がります。距離は所要時間の 2 乗に比例します。彼の精密な考察は、ニュートンの運動法則の一手手前まで来ていました。

ニュートン (1642-1727) はガリレオ・ガリレイと入れ替わるようにして生まれてきました。ガリレオ・ガリレイの実験結果を解析し一つの規則を見つけ出すためには微分積分が大いに役に立ちます。ガリレオ・ガリレイの時代には、微分積分はまだ知られていませんでした。ニュートンは微分積分を考え出し、ついに、今我々の知っているニュートンの運動法則 (万有引力の法則) を作り上げました。ニュートンの運動法則は三つにまとめられますが、そのうちの一つ、ニュートンの運動方程式は極めて簡単な形をしています。

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a} \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{F}$ : 力、 $m$ : 質量、 $\mathbf{a}$ : 加速度です。

この法則は、地上の物体の運動を記述するだけでなく、ケプラーの三法則も導き出すことができます。要するに地上のみならず天体の運動をも記述できるのです。宇宙全体の運動をも知ることができます。宇宙のどこに行っても、ガリレオ・ガリレイの実験をすれば同じ結果が得られます。自然科学の法則は極めて普遍的なものです。

### 3 原子分子の世界—量子力学の確立

科学がさらに発展するとニュートンの運動法則では説明できない現象に気づきます。原子・分子などの極微小な世界と光速に近い速度で運動している物体の運動です。極微な世界の法則は量子力学です。光速に近い物体の法則は相対論です。原子・分子の法則の始まりは、フラウンホーファー (1787-1826) でしょう。もちろん、フラウンホーファーは百年後に量子力学によって、自分の観測結果が理解されることになるとは思ってもよらなかったことでしょう。フラウンホーファーは元々は科学者ではありませんでした。ガラス職人の子供として生まれました。太陽光をプリズムで分けると、いわゆる虹のように光が分かります。彼は自分の作ったガラスの品質を調べるためにプリズムを使って太陽光のスペクトルを調べていました。拡大してよく調べると、虹の中に欠けている成分があることがわかりました。要するに、ある特定の波長の光が地球に届いていないのです。この抜けている光の成分は何か、ヒントは実験室の実験から得られました。キルヒホッフ (1824-1887) とブンゼン (1811-1899) はバーナー (ブンゼンバーナー) でいろんな金属 (ナトリウム、カルシウム、マグネシウムなど) を燃やすとその金属特有の光が出ることを示しました。その結果大変なことがわかりました。実験室で観たいろいろの金属からでた光と太陽光の欠けている光が一致したのです。これが何を意味するかは明らかです。太陽大気中に金属が含まれていて、その金属が太陽から出た光を吸収するからです。さらに、後になって太陽大気の主成分は水素原子とヘリウムであることがわかりました。(ヘリウムという名

称はギリシャ語の太陽を意味するヘリオスから来ています。)しかし、大きな謎が残りました。特定の原子が、特定の波長の光を放出したり吸収したりするのは何故か、しかも19世紀後半、まだ原子の構造もわかっていませんでした。その当時(19世紀後半)電気と磁気に関する法則はマックスウェルによって確立していました。いわゆる電磁気学です。しかし、マックスウェル(1831-1879)の電磁気学では原子の安定性を説明できませんでした。原子がその原子特有の飛び飛びのエネルギーを持っていることが最大の謎でした。要するにエネルギーが不連続なのです。古典的な巨視的な物体のエネルギーは連続です。例えば、ピッチャーの投げたボールの運動エネルギーはどんな値も取り得ます。時速150km/sでも151km/sでも130km/sでも良いわけです。原子などの極微の世界では、例えば、100km/sの次は150km/sに飛んでその間の値は許されないのです。

実験的に原子のエネルギー状態を調べた結果不連続であることは疑いのない事実であることがわかりました。これはニュートン力学では説明できません。これは20世紀初頭の物理の大問題でした。ラザフォード(1871-1937)やボーア(1885-1962)など錚々たる実験物理・理論物理の面々が原子模型を提唱しましたが、どれも決定的ではありませんでした。1925年になってハイゼンベルク(1901-1976)が当時行列力学と呼ばれた理論を出し(ハイゼンベルク二十五歳)、翌年シュレーディンガー(1887-1961)が波動力学と呼ばれた理論を出しました。この二つは同じ物理理論の違った表現であることをシュレーディンガー自身が証明し、現在の量子力学の基礎となりました。今年(2025年)は量子力学誕生100年です。

現在、身の回りにあるいわゆるハイテク技術のほとんど全てが量子力学に基づいています。化学は分子の変化を調べる領域です。化学の多くの現象が、量子力学で説明されます。また、生命体も蛋白等の巨大分子でできていますから、究極的には物理的に説明されます。物質の温度依存性はまさに構成している分子の性質に依存しています。タンパク質の機能はその空間的な構造によって変わります。空間的な3次元構造は温度によって微妙に変化します。我々の体を構成しているタンパク質が生命体として機能する温度範囲は極めて狭く、容易に熱中症になったり、凍死したりします。

太陽は大部分水素とヘリウムでできています。前に、太陽大気中に種々の金属が含まれていることを述べました。そのようなことは地球上での実験結果に基づいて結論されます。あたり前と思われませんが、重要なことなので、指摘しておきますが、例えば、地球上で実験的に知られた水素の物理的・化学的性質はその水素が宇宙のどこにあらうとも同じです。ニュートンの運動方程式は宇宙のどこでも成立します。自然科学の法則は普遍的なもので、地球上だけで成り立つものではありません。人類の、自然科学以外の知的成果が極めてローカルなもので、地球上或はより狭い領域だけにしか適用できないのに比べれば、

自然科学の普遍性は特筆すべきものです。もし地球外生物に遭遇したとすると、最初のコミュニケーションは自然科学の法則から始まると思われます。地球外生物もニュートンの法則は知っているはずです。デカルトやゲーテを持ち出しても議論にはならないでしょう。

## 4 光学望遠鏡から赤外線・電波望遠鏡へ

人類の宇宙観測は、つい最近まで、目で見える天体の観測に限られていました。星とか光っている星雲などです。人類は、星は“初めから”ずっとそこにあって未来永劫に存在すると思っていました。いわゆる定常宇宙論です。ウクライナ（当時ソ連）の物理学者ガモフ（1904-1968）が“火の玉宇宙論”を提唱しました。1948年のことです。今広く知られている“ビッグバン宇宙”の原型になる理論です。大爆発で宇宙が生まれたというもので、ずっと膨張し続けていて、最初は超高温の宇宙でしたが、今は宇宙全体の温度は5 K(-268 °C) でそれに対応する電磁波で満ち満ちていると预言しました。[ここはちょっと難しい話です] しかし当時は測定技術がなく確かめようがありませんでした。1965年に、アメリカのベル（BELL）電話会社の研究者二人、ペンティアス（Penzias）とウィルソン（Wilson）が当時始まったばかりの衛星通信のため空から降ってくる雑音の測定をしていて、偶然、空全体が温度 3K(-270°C) に対応する放射で満たされていることを発見しました。天文学者、物理学者は、これがガモフの预言した宇宙創生の大爆発の名残の放射であることに気がつきました。彼らにはノーベル物理学賞が授与されました。この放射はマイクロ波なので、マイクロ波背景放射、或は宇宙背景放射と呼ばれています。この発見は宇宙論に大変革をもたらしました。定常宇宙論の破棄です。

宇宙からは、様々な波長（周波数）の電磁波が地球に降り注いでいます。我々の目に見える電磁波は可視光線です。可視光線よりも波長の短い電磁波は、紫外線、X 線、 $\gamma$  線です。可視光線よりも波長の長い電磁波は、赤外線、遠赤外線、マイクロ波、ラジオ波です。宇宙からのマイクロ波（電波）を観測する望遠鏡は電波望遠鏡です。それぞれの波長領域に適した観測装置が必要です。X 線望遠鏡とか、赤外線望遠鏡などがあります。異なった波長領域で宇宙を観測するとそれぞれ全く異なった姿が現れます。電波望遠鏡を使って光っていない真っ暗な宇宙を観測すると、光の観測とは全然違った宇宙の姿が見えてきます。

光の波長分布とその強度の関係はスペクトルと呼ばれます。色々な巨視的な物体はそれぞれ特有の放射を出しています。その放射強度の波長分布（スペクトル）はその物体の温度で決まります。ここで、巨視的な物体の温度と、その物体が出している放射（可視光、赤外

線、電波など)の関係についてちょっと述べておきましょう。太陽の表面温度は約 5600K (絶対温度)です。太陽光の光はいろんな波長の光を含んでいます。一番強度が強いのは可視光領域です。人間の目の感度が一番高いところです。多分太陽光のもとで進化してきた生き物の持つ必然的な帰結であるように思われます。もう一つ、焚き火のスペクトルの話をしましょう。焚き火の色と温度には密接な関係があります。よく燃えているときは黄色っぽい光を出しています。燃えつきてくるとだんだんと赤っぽい色になってきます。火が消えた後も手をかざせば、あったかいのがわかります。赤外線がでているからです。このことは、人間大抵の人は経験的に直感的に認識しています。温度と光の関係はすでに産業革命の初期に知られていて溶鉱炉の温度を知るために使われていました。日本の刀鍛冶も吹子の色から最適温度を知っていたと思われます。我々も表面体温 (約 306K、約 33 °C) に対応した放射を出していてその強度が最大になる領域は赤外線領域です。夜間、暗闇でも赤外線カメラで写真を撮れば写ります。それと同じで、赤外線望遠鏡で空を観測すれば、光はだしてはいないけれども我々の体温と同じくらいのあったかい宇宙を観測することができます。それよりももっと冷えてしまった天体は可視光も赤外線も出していませんが、電波はでています。電波望遠鏡で見ることができます。先ほど、宇宙背景放射の話をしました。ビッグバン直後の宇宙は超高温でしたが、今ではすっかり冷え切ってしまって、宇宙空間の温度は 3 K (-270°C) です。その冷え切った宇宙が出している放射 (マイクロ波) が宇宙背景放射です。

## 5 星間分子の発見

電波望遠鏡による宇宙の観測が大発展をし、それまで何も無いと思われていた星と星との間の真っ暗な領域は全くの真空ではなく、そこにも物質がある事が解ってきました。電波で宇宙を観測する研究領域を電波天文学と言います。電波で見る宇宙は光で (目で) 見る宇宙とは違います。地球上の空気やいわゆる雲と比べると、ものすごく希薄でスカスカなのですが (粒子密度が 1 cm<sup>3</sup> あたり 1000 個 ~ 10000 個くらいしか無い、それに比べて、我々が今呼吸している空気は 1 cm<sup>3</sup> あたり約 10,000,000,000,000,000 個の窒素と酸素を含んでいます)、いわゆる雲があってそこにはかなり複雑な分子があることもわかって来ました。そのよう な雲は星間分子雲とよばれます。しかも分子雲は特殊な存在形態ではなく、より普遍的な宇宙物質の存在形態であると思われています。星間分子雲の温度はものすごく低くて 10-100 K (-263 ~ -173°C) 程度の低温なのでふつうは電波領域でしか見えません。遥か彼方にある分子雲の中にどんな分子がどれくらいあるかなどという事がどうして解るのでしょうか。

分子はその内部エネルギー状態（振動とか回転運動状態）が変わる時にそれぞれの分子特有の波長（振動数）の電波を放出したり吸収したりします。前に、原子や分子のエネルギーは連続的ではなく飛び飛びだと言いました。分子は空間で自由に回転しています。コマのようなものです。コマならば、回し方によって、回る速さは連続的に変わります。しかし、分子の回転は、ある回転状態から別の回転状態に変化するときにはエネルギー（回転速度）が不連続にジャンプします。その途中の回転状態は存在し得ないのです。低い回転状態から高い回転状態にはそのエネルギー差に対応したエネルギーの電磁波を吸収してジャンプします。その逆に高い状態から低い状態に移るときはエネルギーを放出します。分子の回転運動の変化に伴うエネルギーはマイクロ波から遠赤外線（電磁波）のエネルギーに対応します。空から降って来るマイクロ波を受信すれば宇宙空間に漂っている分子を検出することができます。受信する装置が電波望遠鏡です。電波望遠鏡でそれらの電波の振動数を測定してどの分子からの電波かを調べればよいのです。地上で分子と電波（マイクロ波）との相互作用を研究する分野はマイクロ波分光学と呼ばれる研究分野です。第二次世界大戦後、レーダーの研究のために開発されたマイクロ波実験装置がアメリカで大量に大学に放出され、一気に研究が開花しました。電波天文観測が盛んに行われようになったのは、1960年代になってからです。電波天文観測によって分子スペクトルが観測され始めた時には既に膨大なマイクロ波分光の実験室データの蓄積があり、星間分子天文観測は急速に進展しました。

電波望遠鏡が盛んに作られ電波天文学が発展していったのはようやく1960年代になってからですが、急速に進展しました。特定の周波数のマイクロ波が宇宙から飛んでくることが観測され、それらの多くは地球上にごく当たり前に存在している分子、例えば、一酸化炭素 (CO)、アンモニア (NH<sub>3</sub>)、水 (H<sub>2</sub>O)、ホルムアルデヒド (H<sub>2</sub>CO)、シアン化水素 (HCN)、メチルアルコール (CH<sub>3</sub>OH) などであることがわかりました。地球上にある分子、例えば水の分子も宇宙のどこかにある水も同じ物理化学的性質を持ちますから地球上の実験で得られた知見がそのまま役に立つのです。このような電波観測によって、宇宙の、星も何もない真っ暗な空間にも我々の周りにあるような分子がただよっていることがわかってきました。そういうのを分子雲或は暗黒星雲などと呼びます。こういった雲は非常に低温で希薄ですが、化学反応がゆっくりではあるが、進行していて、より複雑な分子ができてきています。今では、200種類くらいの星間分子が発見されています。地球生命（我々）の起源に関連して、星間空間に生命誕生の起源になるような分子、例えば、アミノ酸があるかどうか懸命に調べています。

星のエネルギー源は水素 (H) です。水素の核融合反応でヘリウム (He) ができます。水素を使い切るとヘリウムの核融合反応に点火しますが、この段階はすでに星の寿命が尽き

た段階で大爆発をするか、ゆっくりと膨張して構成物質を外に撒き散らして星は死にます。大きな星ほど寿命が短く数千万年程度です。太陽は中くらいのごく当たり前の星で、寿命は 100 億年程度で今ちょうど中間点くらいです。後 45 億年くらい経つと燃料の水素を使い果たして、ヘリウムの星になります。ヘリウムが重力で収縮し始めて中心部でヘリウムの核融合反応が起こって、炭素 (C)、酸素 (O)、ネオン (Ne)、マグネシウム (Mg)、珪素 (Si)、硫黄 (S) などの元素が生成します。この核融合反応の連鎖は鉄 (Fe) の合成される段階まで進みそこで核融合反応は停止します。その段階で、太陽は元の形を維持できず巨大に膨張して今の我々の地球を飲み込むくらいまで大きくなります。太陽の最後の姿です。このようになった星を赤色巨星と言います。膨張して温度が低くなるので赤い星になります。膨張の過程で太陽の周りの物質を宇宙空間に撒き散らします。最後に芯だけが残ります。残った芯は白色矮星と呼ばれます。太陽よりもずっと大きな星は赤色巨星にはならず大爆発を起こして、所謂、超新星になります。超新星爆発の過程で、鉄よりも重い元素（多くは放射性元素）が生成されます。金 (Au)、銀 (Ag)、銅 (Cu) といった貴金属やウラン (U)、ラジウム (Ra) などは超新星爆発の産物です。

今、この世界にある水素 (H)、酸素 (O)、炭素 (C)、鉄 (Fe) 等の元素はほとんど全て宇宙起源です。いわゆるビッグバン後の灼熱の全宇宙が核融合炉みたいな状態で水素、ヘリウム (He)、わずかばかりの重水素 (D) とリチウム (Li) が合成され、それよりも大きい元素は宇宙の温度が急速に冷えたため作られませんでした。今、リチウムイオン電池として利用されているリチウムはビッグバン後数分の間にできたもので、それ以後、作られていません。我々も含めて、世界を構成しているいわゆる炭素 (C)、酸素 (O)、窒素 (N)、硫黄 (S)、マグネシウム (Mg)、カルシウム (Ca)、りん (P)、その他の金属元素などは星の中で合成されました。第一世代の星は、水素とヘリウムだけでできていましたが、その星の芯の中で核融合反応によって重元素が合成され、その星が死んだ後で、次の世代の星に取り込まれました。したがって、太陽は少なくとも第二世代の星（多分第三世代）です。我々は文字通り星屑からできています。宇宙の塵が集まって星になり、星が寿命をまっとうしてまた塵（宇宙塵）になるという大循環を繰り返します。そういった意味で、我々は宇宙塵から生まれ宇宙塵に帰るのです。

## 6 終わりに

以上、ちょっと長々と、自然科学というのは、観測と実験と理論に基づいて、始まりをエジプトに置くかギリシャに置くかによりますが、数千年に渉って論理的に作り上げてきたものであることを記しました。科学の進歩発展は予測し難いものです。重要なことは、



自由に研究できる環境を整えておくことです。科学に国境はありません。コペルニクスはポーランド人、ティコ・ブラーエはデンマーク人、ケプラーはドイツ人、ガリレオ・ガリレイはイタリア人、ニュートンはイギリス人でした。20世紀になってからのアメリカの科学の進展は大部分がいわゆる移民およびその2世によってもたらされました。異質な要素が混ざることが文明の進展に大いに寄与します。日本は閉鎖的でしたが、最近ようやく門戸が解放され始めてきました。異文化で育ってきた研究者との共同研究は、日本文化、社会習慣の中で育ってきた日本の研究者がそのくびきから解放されるチャンスです。

最近の地球規模での極端気象は紛れもなく、所謂「地球温暖化」の結果です。すでに、六十年以上前に気象学者のみならず、分子物理、物理化学の研究者が、地球温暖化の危険性を指摘していました。しかし、為政者は目先の利益を優先し効果的な対策をとってきませんでした。自然現象には、定常的に変化していたものが、徐々に遅くなって定常状態に達する変化の仕方と、変化分が徐々に大きくなって、ついには爆発的に変化する、所謂、指数関数的変化があります。ここ数年の気象変化は、後者のように思われます。余程思い切った方策を直ちに講じないと、文明の衰退どころか、人類の滅亡に繋がりがかねない事態です。

原子力発電（原発）について一言触れておきたいと思います。原発は核爆弾（原子爆弾および水素爆弾）とは違います。原発は爆発することはありませんが、何か事故があれば、多量の放射性物質を大気中、更には、土壤に撒き散らします。福島第一原発の事故処理はほとんど進展していません。溶け落ちた放射性物質をいつ回収できるかは全然目処がついていません。百年以上かかるでしょう。ここで強調したいことは、福島で溶け落ちた燃料はもとよりのこと、通常運転の原子炉からの燃え滓の処理はほとんど不可能です。燃え滓は高放射性物質を高濃度で含んでいます。高放射性残渣の放射能が無害になるレベルまで到達するには6万年かかります。燃え滓には半減期の非常に長い放射性核種が含まれているからです。原子核の半減期を変えることはできません。物理法則です。約6万年前この地球はどうなっていたでしょうか。北海道は当時大陸と陸続きだったと考えられています。我々の祖先（現人類）がようやくこの地球上に現れてきた頃で、まだネアンデルタール人と共存していました。6万年後には人類は絶滅している可能性もあります。それまでどうやって核の塵を安全に保管できるでしょうか。小泉純一郎元総理は核のゴミをこれ以上出してはいけないことを明確に認識した数少ない政治家です。原発は直ちに全廃しなければなりません。これは科学的な根拠のある結論で政治的経済的考慮の入る余地はありません。これくらいのことは、国の政策決定に関与している政治家や官僚に知っておいて欲しいことです。

## Constant Acceleration Motion

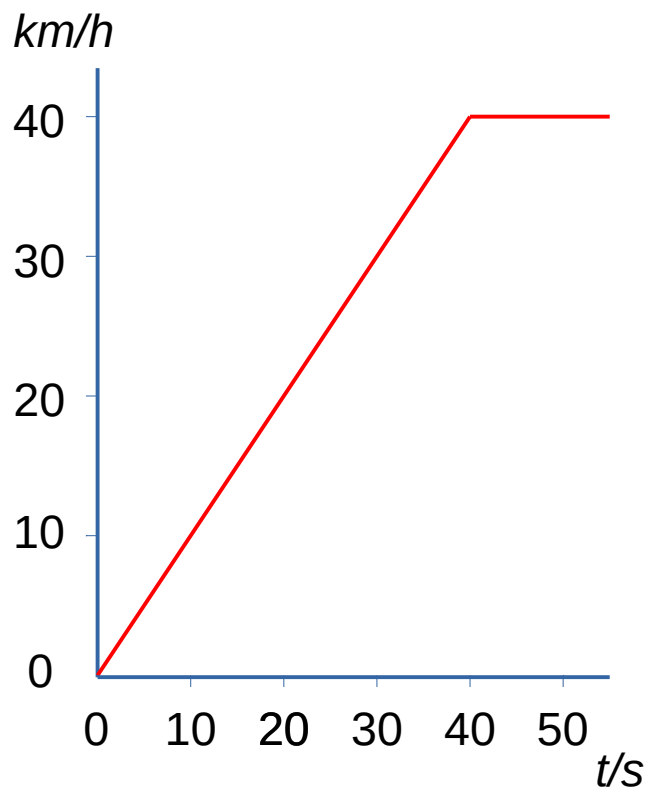


図 1 自動車の加速。速度の時間変化。

## 付録 A ニュートンの運動方程式：ちょっとばかりの物理と数学

### A.1 等加速度運動

式 (1)、 $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$ 、が何を意味するか、簡単に見てみましょう。質量というのは、大雑把に言って物の重さのことです。(昔は、商品の重さを表すのに“重量”を用いていました

が、重量は地球上の場所によって違うので今では“質量”を用います。) 上の式は、ある物体 ( $m$ ) に力 ( $\mathbf{F}$ ) をかけるとその物体は動き出す ( $\mathbf{a}$ ) ということを意味しています。例えば、自動車のアクセルを踏み込むと車は動き出します。車が動き始めたということは、加速度 ( $\mathbf{a}$ ) が生じたということです。力を掛けなければ加速度はゼロです。力を掛けなければ、速度は変わらないということです。

アクセルを一定量踏み込んで、静止状態から 10 秒後に速度が時速 10 km/h に到達したとすると、20 秒後には速度は 20 km/h になるでしょう。かかっている力は一定ですから、加速度も一定で、10 秒間に 10 km/h ずつ速度が増えます。同じことですが、1 秒毎に 1km/h ずつ速度が増していきます。40 秒後には速度は 40 km/h となり、そこでアクセルから足を離すと、加速は止まり、車はその速度 (40 km/h) で定速走行します (摩擦が無ければ)。速度の時間変化は図 1 のようになります。力が働かなければ、物体は静止し続けるか一定速度で動き続けます。一定速度で動いている車は静止しているのと物理的には同じです。加速度は速度の時間変化です。数学の言葉を使うと、加速度は速度の時間微分です。逆に、速度は加速度を時間毎に足したものです。数学的には、速度は加速度の積分です。移動距離は速度に時間をかけたものです。数学的には、移動距離は速度の時間積分です。静止状態から加速し始め、速度が 40 km/h に達した時までには走行した距離は、三角形  $\triangle OAB$  の面積になります。40 km/h は約 11.11 m/s ですから、三角形の面積は  $11.11 \times 40/2 = 222.2\text{m}$  となります。これが時速 40 km に到達した時の走行距離です。40km/h の定速に達した後 55 秒までの間に走行した距離は図 1 の長方形  $ABDC$  の面積になります。計算すると  $11.11 \times 15 = 166.7\text{m}$  です。

## A.2 落下運動

もう一つ別の問題を考えてみましょう。物体の落下運動です。地球上で、物体をある高さから落とすと垂直に下に落ちます。最初静止していた物体が速度を増して落ちますから、下向きに力が働いていることになります。その力は地球の引力です。落下運動の加速度を  $\mathbf{g}$  とすると、下向きの力は

$$\mathbf{F} = m\mathbf{g} \quad (2)$$

となります。この式で、 $m$  は質量で、 $\mathbf{g}$  は加速度です。この場合特に重力加速度と呼ばれます。重力加速度は地球上場所によって僅かですが異なります。札幌では  $\mathbf{g} = 9.805\text{m/s}^2$ 、東京では  $\mathbf{g} = 9.798\text{m/s}^2$  です。天秤ばかりで重さを測ると、もとまる値は質量に対応します。バネばかりで測ると得られる値は重量です。地球の重力を測っていることになり

ます。

高いところから物体を落とすと、1 秒後には落下速度が  $g \cdot 1s \sim 10 \text{ m/s}$  になることを意味しています。落下速度は時間に比例して増えていきます。自由落下も等加速度運動です。

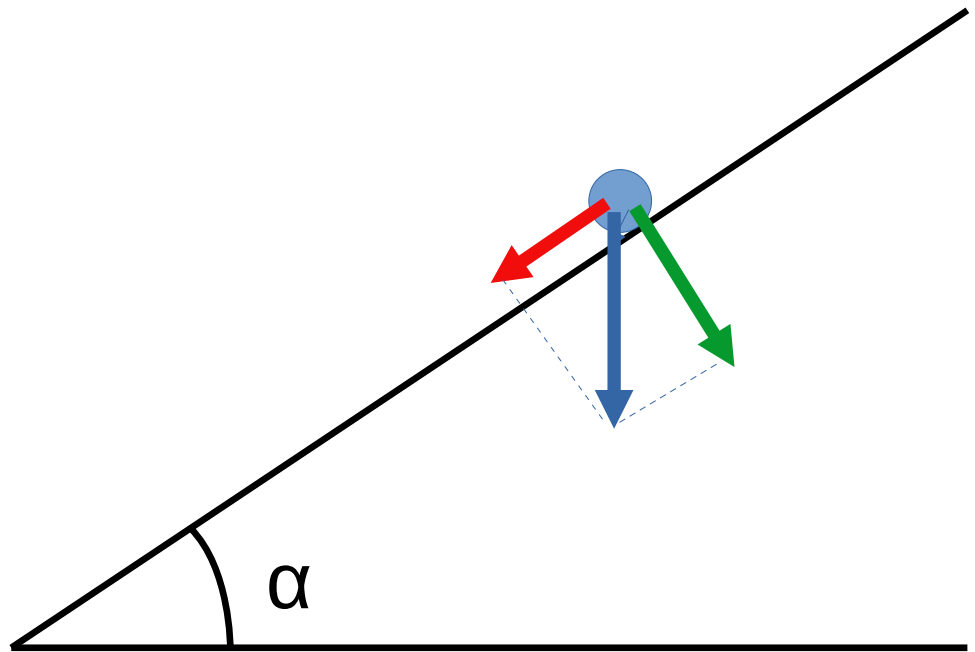


図 2 斜面を転がる球

## A.3 斜面を転がる球

滑らかな斜面上をパチンコ玉のような摩擦が無視できる球を転がす実験を考えてみましょう。球は斜面を転がり落ちるでしょう。何か力が働いているから下向きに転がっていきます。その力とは地球の重力です。地球の重力は下向き（地球の中心に向かっている）ですが、斜面に並行な成分と斜面に素直な成分に分けて考えることができます。図 2 に示してあります。図 2 の青色の下向きの矢印が重力です。斜面に並行な成分は赤色で、垂直な成分は緑色で示してあります。力、速度、加速度などの物理変数は大きさだけでなく方向も示さなければ記述が不完全です。このような物理変数はベクトル (vector) と呼ばれます。何か物を動かすときには動かしたい方向に力をかけます。我々は経験的に（あるいは本能的に？）力がベクトル量であることを知っているわけです。さて、赤で示した斜面に沿った力が球を転がす力であることは理解できますが、緑の力は何なのでしょう。これは床を押さえつける力ですが、床が布団のように柔らかかったら球は沈んでしまいます。今は十分硬い材質の床で全然沈まないと仮定しています。その場合、床は球に対して“抗力”が働いて、緑の力を打ち消します。結局、球に働く力は赤で示した力だけです。傾斜の角度を  $\alpha$  とすると赤の力の大きさは  $mg \cdot \sin \alpha$  となります。ここで、 $\sin \alpha$  は三角関数です。もし、 $\alpha$  が  $30^\circ$  ならば、 $\sin 30^\circ$  は  $1/2$  です。したがって、傾斜  $30^\circ$  の斜面上で球が受ける力は重力の半分です。傾斜がゼロ ( $\alpha = 0$ ) ならば、 $\sin 0^\circ = 0$  で横方向の力はありません。先ほども述べたように、縦方向の重力は床からの抗力によって打ち消されゼロです。結局、この球には全然力がかかっておらず、球は静止し続けます。もし誰かが、弾いて動き出したとすると、球はいつまでもその速度で動き続けます（摩擦がなければ）。一方、垂直の壁の場合 ( $\alpha = 90^\circ$ ) は、 $\sin 90^\circ = 1$  なので球にかかる力は、当然のことですが、重力そのものになります。ガリレオ・ガリレイはこのような斜面を使った実験から、自由落下運動の法則に到達しました。驚くべき洞察力です。

## 付録 B 量子現象を利用した身近な装置

### B.1 MRI

かなりの方が、MRI による検査を受けたことがあるのではないのでしょうか。MRI というのは Magnetic Resonance Imaging（磁気共鳴イメージング）の頭文字をとって作られた造語です。磁気共鳴という現象を利用した人体臓器の画像による診断技術です。磁気共鳴、もっと正確にいうと核磁気共鳴です。水素の原子核の持っている磁気モーメントの

ゼーマン (Zeeman) 効果を利用して脳などの臓器の画像を見る装置です。

原子の中心には原子核があり、その周りに電子が分布しています。水素原子は一番簡単な（一番軽い）原子です。中心にある原子核は陽子という粒子です。陽子は正の電荷と磁気モーメントを持っています。磁気モーメントがあるということは陽子は小さな磁石のような性質を持っているということです。人間の体には数えきれないほどの水素原子が入っています。大部分は水の形で入っています。円筒状の洞窟みたいなところに入って、検査を受けるわけですが、あの円筒形の洞窟は強力な磁石です。その磁石の中に入ると我々の体の中の水素原子核（磁石）の方向が揃います。そこに時間間隔を調整した短い電磁パルスをかけて水素原子核磁石の向きを  $90^\circ$  倒すことができます。電磁パルスを切ると  $90^\circ$  倒れた磁石の向きは元の位置に戻っていきませんが、その戻る速さが、水素が人体のどこにあるかで少しずつ違います。その違いを検出して画像にします。

今度 MRI の検査を受ける時は、体の（脳の検査なら脳の）水素原子核の磁石の向きがみんな一斉に一方向に揃っているのだな、などと思いながら受けるとちょっと面白いかもしれません。

## B.2 GPS—位置情報、カーナビ

車を運転していて、カーナビで正確な位置情報を得ることができます。所謂 GPS(位置情報) 衛星はアメリカ軍の管轄下にある 32 基が稼働中ですが、アメリカ軍に依存しているのは好ましくないということで、各国（ロシア、中国、インド、EU）が独自に衛星を打ち上げています。日本も「みちびき」という名の位置情報衛星を何基か打ち上げています。正確な位置決めのためには、地上受信機（カーナビの車載受信機もその一つ）は少なくとも 4 つの衛星からの信号を同時に受信する必要があります。GPS 衛星は正確な原子時計を搭載しています。大半がセシウム (Cs) 原子時計ですが、ルビジウム (Rb) 原子時計、あるいは水素メーザー原子時計の場合もあります。正確な原子時計のタイミングからそれぞれの衛星の位置を決め、所謂、3 角測量の手法で地上の観測点の緯度、経度、高度、時間を求めます。

セシウム原子時計について、ちょっと難しいかもしれませんが、説明します。セシウムはアルカリ元素の一つで、原子番号は 55 です。原子の中心に原子核があり、その周りを 55 個の電子が回っています。その電子のうち 54 個の電子は 2 つずつペアになって落ち着いているのですが、1 個だけフラフラしている電子があります。このセシウム原子の一番安定な状態のエネルギー状態は一つのはずですが、よく調べると少しエネルギーの違う状態が二つあることが分かります。原因は原子核の磁石と 1 個フラフラしている電子の磁石

が相互作用することにあります。二つの磁石を机の上に置いたとすると、逆平行にくっ付きます。並行に置いておくためには押さえつける力が必要です。同じようなことがセシウム原子でも起こっていて、原子核の磁石と電子の磁石が平行になっている状態が逆平行になっている状態よりもエネルギーが大きいのです。この二つの状態のエネルギー差に対応する電磁波の周波数が正確に測られていて、9,192,631,770 Hz（これはマイクロ波）です。これは周波数標準であり同時に時間標準でもあります。セシウム原子の磁石の相互作用が、9,192,631,770 回振動する時間が 1 秒と決められています。これが、セシウム原子時計と呼ばれる理由です。この原子時計の誤差は 300 万年に 1 秒以下です。GPS 衛星の高度は 20200 km で周期は 11 時間 58 分です。地上の受信機は衛星からの時間信号を受けて衛星までの距離を正確に算出します。最低限 4 つの衛星の位置を求めて地上の観測点の位置を決めます。

日常的に何気なく使っている装置（道具）の裏には、量子力学とその実用化を可能にした技術があることを覚えておきましょう。

## 付録 C クイズ

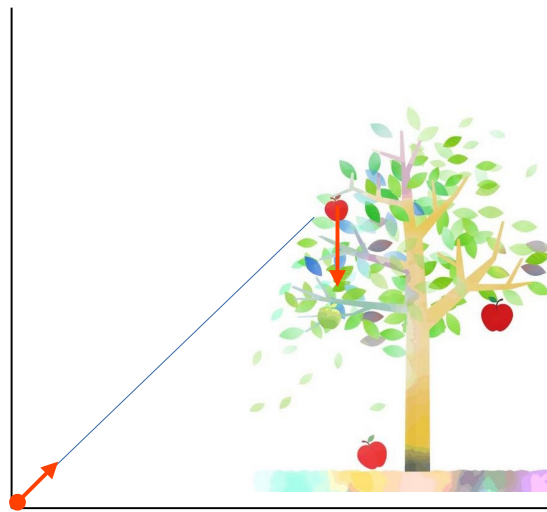


図3 リンゴを銃で撃ち落とす。銃を発射したと同時にリンゴは木から落ちてしまった。

図??に示したように、樹になっているリンゴを銃で撃ち落とそうとしている輩がいる。銃の引き金を引いたと同時にリンゴがポトリと落ちてしまった。弾はリンゴに当たったでしょうか。解答は別の機会に。