

現代の物質観その 2

Modern view on the constituents of matter II.

Fujiwara Yoshikazu

2020 年 3 月 14 日

1 物の大きさ (size of things)

物理学は自然の成り立ちを実験的検証によって解明していく学問である。その点で、論理だけによって構成されている数学とは大きく異なる。いかに優れた理論であっても、もしそれが実験的事実によって正しいと検証されなければ、そのような理論は捨て去らなければならない。

自然認識の中で最も重要なものは空間と時間に関する概念である。特にものの大きさを測定するためには、一定の単位の長さを持った物差しが必要であり、それにより刻まれた数直線で、あるところに原点を持つものをわれわれは座標と呼んでいる。我々の住む空間は、少なくとも局所的には縦、横、高さを持つ 3 次元の空間であって、それを表すには少なくとも 3 つの数字 (x, y, z) が必要である。これを、3 次元ベクトル $\mathbf{r} = (x, y, z)$ と書いて、これらのなす線型空間をユークリッド (Euclides) 空間という。3 次元ユークリッド空間には右手系と左手系が存在する。 x を $-x$ に変えると、二つは相互に変換する。 x, y, z のどの一つを変えても同様である。ただし、2 つを同時に変えると元へ戻る。3 つを同時に変えると、1 つを変えた時と同様に右手系と左手系が変換する。これをパリティ変換と言う。平行移動と回転とともに、重要な 3 次元ユークリッド空間の変換の一つである。我々の現実の世界が右手系であるとする、左手系は鏡の中の世界である。これは、前と後がひっくり返ることによって、右と左がひっくり返る事に対応する。

紀元前 200 年頃、エジプトのアレクサンドリアに住んでいた哲学者エラトステネスは簡単な幾何学によって地球の大きさを測定した。当時、エジプトでは既に地球が丸い事は分かっていた。大海原で遠くの船がマストから順に下の方が見えていくことによって、当時

の人は地球が丸いことを知っていた。このことはまた、地球の影に月が隠れる月蝕からも予想できた。エラトステネスはアレクサンドリアの南 800 km あるシエネの街で、夏至の時太陽が真上に来ることを知った。それは地上にまっすぐに掘った井戸の底にこの時にだけ太陽の光が届くことによって確かめられた。(シエネの緯度は 23.4 度であり、この事は地軸が 23.4 度傾いていることと関係している。) この時、北のアレクサンドリアでは垂直に立てた棒の影がちょうど天頂から 7.2 度の傾いたところになった。このことから、エラトステネスは地球の中心角 7.2 度が地表での 800 km に対応すると推論した。7.2 度の約 50 倍が 360 度であることから、彼は $800 \text{ km} \times 50 = 4 \text{ 万 km}$ が地球 1 周の距離であることを知った。したがって、地球の赤道から北極までの距離はほぼ 1 万 km である。これが、 $\pi/2 \times r$ であることから、地球の半径 R はほぼ 6,400 km であることがわかる。

月の大体の大きさは、地球の影に月が隠れる皆既月食を詳細に観測することによって知ることができる。太陽は大きさを持った光源であるので、地球の影を明確に定義することは難しいが、およその話としてその影には月が四つ入ることがわかる。太陽までの距離は遠いので、地球の影の大きさは地球の大きさとはほぼ同じと考えてよい。そこで、月のおよその大きさはその半径が $6,400 \text{ km} \div 4 = 1,600 \text{ km}$ であると考えられる。月までの距離は、人差し指を月にかざして月の大きさがほぼ人差し指の爪の長さであることから見積もることができる。爪の長さを 1 cm、目から爪までの長さを 100 cm と仮定すると、この三角形を月にまで伸ばした時にできる相似三角形を考えることによって、月までの距離は地球を $100/4 = 25$ 個並べた程度の距離であることがわかる。より正確には 30 個程度であり、したがって月までの距離は $6,400 \text{ km} \times 2 \times 30 \sim 40 \text{ 万 km}$ 程度であることがわかる。

太陽までの距離を初めて見積もったのは、エラトステネスと同じ頃に生きたサモス島のアリスタルコスであると考えられている。彼は天頂に半月が見える時の、太陽と月と地球の作る直角三角形を考えることにより、地球から月までの距離に基づいて地球から太陽までの距離を導き出した。そのためには、秋分、春分の時に地平線上にわずかに見える太陽の高度を正確に測定することが必要であった。彼の測定は不正確であったため、今から見れば正しい結果を得ることができなかつたが、考え方としては正しいものであった。正しくはこの直角三角形は、短辺を 1 とすると長辺は 400 程度の大きさであることがわかっている。そこで太陽までの距離は、 $40 \text{ 万 km} \times 400 = 1 \text{ 億 } 6 \text{ 千万 km}$ 程度であると考えられる。太陽の大きさを知るには、日食が地球と月、太陽が一直線に並ぶ現象であると言うことを用いればよい。皆既日食や金環食があることは、月や地球の軌道が完全には円でないことを示しているが、大体の話としては、先程の月までの距離を計算したときの三角形を太陽にまで伸ばしたものが、太陽の大きさを見積もるために使えることがわかる。

すなわち、地球から太陽までの距離が地球から月までの距離の 400 倍であるとする、太陽の大きさは月の大きさの 400 倍、すなわち地球の大きさの $400/4=100$ 倍であることがわかる。すなわち、約 64 万 km が太陽の半径である。この大きさは非常に大きい。もし地球の中心に太陽があるとする、月の軌道は太陽の中ですっぽり埋まってしまう大きさである。

長さの単位は、古代には人間の身体的特徴によって決められていた。例えば旧約聖書のノアの洪水には箱舟の大きさを表す単位としてキュビットと言う単位が出てくるが、これはラテン語で「肘」を意味する cubitum に由来する。肘から中指の先までの間の長さ由来する身体尺であり、およそ 46 cm である。また、英語の feet の単数形 foot は、成人の足の長さでおよそ 30 cm である。もう少し長い単位として、新約聖書やヨセフスの表したユダヤ戦記にはスタディオンの長さの単位が出てくるが、これは約 180 m である。太陽の上端が地平線に現れてから下端が地平線を離れるまでの間に人間が歩く距離、ということである。

近代的な長さである 1 m (メートル) は 1700 年代の終わり頃フランスの百科全書派の人達によって地球の赤道から北極までの距離の 1 千万分の一と定められた。その後 1 m の長さを示すメートル法原器が作られ、現代では原子時計によるある元素の発する単色波の波長を基準に決められている。1 m は人間の身長オーダーの長さであり、日常生活には便利であるが、世の中には非常に大きなサイズのものや非常に小さなサイズのものがある。例えばすでに述べたように、地球の大きさは近似的に半径が 6,400 km であることが分かっているが、地球から月までの距離はその間に地球が 30 個ほどはまる程度の距離である。さらに太陽は約 1 億 5 千万 km 程度の距離にあり、太陽系から恒星までの距離は、さらに何桁も大きな距離にあることが分かっている。現在分かっている宇宙の大きさは多くの銀河系を含んだ大きさが 10^{24} 乗メートルの大きさであると考えられている。反対に小さい方は、例えば人体の中にある細胞の大きさは、 10^{-3} mm = 1 μ (ミクロン) のオーダーである。さらに 3 桁下がれば、 10^{-9} m = 1 nm (ナノメートル) であり、高分子化学の世界である。近年よくテレビなどで聞くナノテクノロジーというのはこのレベルのサイズの工学的応用を示している。原子レベルでの大きさの単位として便利なものは、 10^{-12} m = 1 pm (ピコメートル) ではなしに、非標準単位の 10^{-10} m = 10^{-8} cm = 1 Å (オングストローム) がよく使われる。水素の原子核を回る、1 番低いエネルギー軌道の電子の軌道半径がおよそ 0.5 Å である。人間の目で見える電磁波である、可視光線の波長は 4,000 - 8,000 Å である。 10^{-15} m = 10^{-13} cm = 1 fm (fermi) は、通常 1 fermi (フェルミ) と言われ、原子核の長さの単位として用いられる。一般に電子を含むレプトンと言われる素粒子は、その大きさが 10^{-15} cm 以下であり、有限の大きさを持つ

かどうかは今のところははっきりしていない。我々の観測の限界を超えているという意味である。現在我々の知っている重い粒子の究極の構成粒子と考えられているクォークも大きさがあるかどうかはわからないが、最近の素粒子物理学ではエネルギー領域によっては粒子ではなく弦のような振る舞いをすることも言われている。極微の世界では、宇宙的エネルギーを持った原子核反応が普通に起こっていると考えられ、その意味で宇宙規模の現象は微視の世界での現象と密接に関係している。次の図は、宇宙のはじめに起こったビックバンとその後の発展が、微視の世界の構造とその振る舞いとに密接に関係していることを示している。

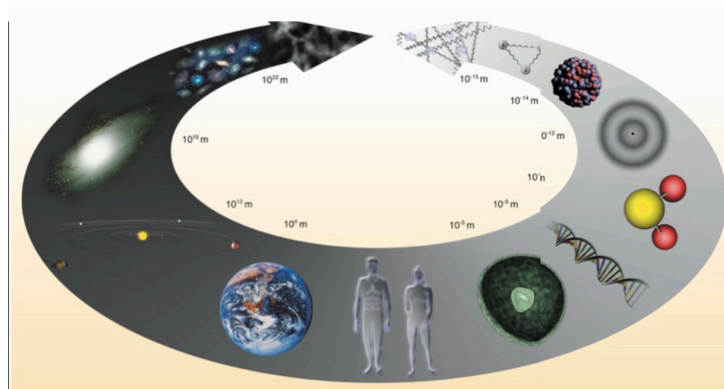


図1 The size of things, NuPECC "The nucleus" より

2 時間-その不思議なるもの

時間は座標と違って自由に右左に行けると言う類のものでは無い。時間は確実に過去から未来に向かって流れており、われわれは通常(多分)過去に戻る事はできない。時間を測る物差しは時計であって、その最小単位は秒(s: second)である。1年は約365日、1日は24時間、1時間は60分、1分は60秒である。

時間の座標軸で原点を持つものを暦という。暦には太陰暦と太陽暦があり、それぞれ月と太陽の天体の運動に基づいている。キリスト教諸国では、太陽暦(グレゴリー暦)に基づく西暦が普通用いられている。これはイエス・キリストが生まれたとされる次の年を西暦1年とする暦である。(イエス・キリストが生まれたのは、実際は紀元前4年か6年とされているようである。正確には分かっていない。)西暦1年はA.D. 1と書き、A.D. はラテン語の anno domini (主の年)の略語である。A.D. 1の前の年は1 B.C. と書き、紀元前1年と言う。B.C. は before Christ (キリスト以前)の略語である。西暦0年と言う

のは存在しない。

太陰暦は月の満月から次の満月までのおよそ 29.5 日を 1 月とする暦である。(地球を回る月の公転周期は 27.3 日であるが、その間に地球は太陽の周りを 30 度近く回転しているので、地球から見た月の公転周期は、近似的に $27.3 + 27.3 \times 30/360 = 27.3 + 2.2 = 29.5$ 日となる。これを 1 朔望月と言う。) 一方太陽暦は地球が太陽を 1 周して季節が巡るまでのおよそ 365 日を 1 年とする暦である。 $29.5 \times 12 = 355$ 日であるため、太陰暦の 1 年を 12 ヶ月とするとおよそ 10 日程度季節がずれてくる。そこで太陰暦では、3 - 4 年に 1 回閏月をもうけて 1 年は 13 ヶ月とする。一方太陽暦では、1 年は約 365.24 日であり偶数月を 30 日、奇数月は 31 日とするとほぼ 366 日となる。実際には、種々の歴史的事情から 2, 4, 6, 9, 11 月は 30 日であり、特に 2 月は 28 日である。それ以外の月は 31 日であり、合計 365 日である。そこで 4 年に一度 2 月を 29 日としてその年を閏年とすると、非常に良い精度で 1 年の季節が巡ってくることとなる。わが国では、ひと月が 31 日ではない月は、「西向く侍」と言って覚えている。現在用いられている最新の太陽暦であるグレゴリー暦では、次の原則によって閏年を決めている。

- 1) 西暦年号が 4 で割れる年は、原則として閏年。
- 2) 西暦年号が 100 で割れても 400 で割れない年は例外的に閏年にしない。

この規則によると、西暦 2000 年は閏年であるが、2100 年は閏年ではない。

1 年の日数 365 日が近似的に 360 であることは、角度を図る単位として中心角を計る角度が一周して 360 度であることと関係している事を予想させる。360 度は 60 の 6 倍であり、前回述べた 10 進法と 12 進法の最小公倍数 60 が元になっていると考えられる。直角は 90 度、平角は 180 度である。

月は地球の周りを公転しており、地球は太陽の周りを公転している。更に、月も地球もそれ自身の周りに回転しており、それを自転と言う。月の自転周期と公転周期は完全に一致しており、およそ 27.3 日である。その結果、実際に観測されているように、月は常に同じ面を地球に向けていることになる。月の裏側を撮影したものは、今のところ旧ソ連が打ち上げたルナ 3 号の映像が最初であるとされている。1959 年のことである。月の自転、公転周期の一致は、月がどのようにして出来たかと言う問いかけに対するヒントを与えていると考えられる。それは地球が出来たおよそ 46 億年頃の出来事であるが、その後長い年月(多分数千年から 1 億年)をかけて、月、地球、太陽の相互作用、即ちいわゆる潮汐効果によってこれらの周期が厳密に一致するようになったと考えられている。一方、地球の自転は 1 日、公転は約 365 日であり、大きく異なっている。

「1 日はなぜ 24 時間か？」という問いに答えられる人は、相当の天文好きと言えるであろう。夜空を忍耐強く観測すると、恒星と呼ばれる星は 24 時間でほぼ天空を 1 周する。

これは、月や太陽についても同じであって、それは勿論地球が自転しているからである。実際には、夜にしか星は見えないから、天空に存在する星座は半分しか見えないが、宵の頃東の地平線から上がってくる星座は、真夜中には天頂に達し、明け方には西の空に沈んでいく。しかしながら、地球は太陽の周りを公転しているので、地平線から上がってくる星座は1日ごとに少しずつ遅れて現れることになる。1年(約365日)でもとの時間に戻るので、1日につき約1度遅れる。地球の自転は360度で24時間なので、1度は $24 \times 60 \text{分} \div 360 = 24 / 6 \text{分} = 4 \text{分}$ に対応する。従って、例えばオリオン座が地平線に現れる時間は、毎日約4分遅れることになる。ひと月で $4 \text{分} \times 30 = 120 \text{分} = 2 \text{時間}$ 、1年で $2 \text{時間} \times 12 = 24 \text{時間}$ で、合っている。北半球ではオリオン座は冬の星座、白鳥座は夏の星座であって、それぞれの時期に天頂に達する。

地球から見ると、月や太陽はゆっくりと星座の間を動いている。太陽の出ているときには星は見えないが、上のオリオン座と白鳥座の例からは、夏には太陽はオリオン座の側にあり、冬には太陽は白鳥座の側にあることが予想される。月の場合にはそれ程明確ではないが、月と太陽以外にも星座の間を動き回る星があってそれを惑星と呼んでいる。すなわち、太陽の周りを回っている水星、金星、地球、火星、木星、土星、天王星、海王星である。(冥王星は近年太陽系惑星から小惑星に格下げされた。) これらの8つの惑星は太陽を中心とするほぼ同一平面上を回っており、地球から見れば、天空の一定の星座の間を行きつ戻りつしている。(それが惑星と名付けられた理由である。) 太陽、月、惑星の巡る星座は12個(正確には13星座)あって、その軌道を黄道十二宮と言う。占星術で用いられる(へびつかい座を除いた)おひつじ座、おうし座、ふたご座、かに座、等がそれである。ちょっと考えると、1日を12等分するのが自然だとも考えられるが、古代には1日は日の入りから始まって次の日の日の入りに終わることを考えると、夜と昼とをそれぞれ12等分したのであろう。1時間が60分で1分が60秒なのは、前回説明した60進法の名残であろう。一方、1週間が7日である事はなにも聖書の創世記にあるように、神が6日間で天地、人間、生物を創造して第7日目に安息したことによるのではない。これにも古代占星術の天体観測が関係していて、月と太陽以外に、当時わかっていた水星、金星、火星、木星、土星の5つの惑星の運行に基づいている。これらを黄道十二宮における移動速度のゆっくりした順に並べると、土星、木星、火星、太陽、金星、水星、月の順になる。1日24時間をこの順に並べていくと、 $7 \times 3 = 21$ で3つずつ横にずれていく。そこで、土曜の次は日曜、日曜の次は月曜、月曜の次は火曜、火曜の次は水曜、水曜の次は木曜、木曜の次は土曜となって元へ戻る。このようにして、土日月火水木金の順番が決まる。週の初めは日曜日か月曜日かと言う問題は、歴史的、宗教的な問題である。ユダヤ教やイスラム教では、週の初めは日曜日であって7日目の土曜日が安息日である。キリスト教を国

教に定めたローマ帝国が日曜日を休息の日としたために、月曜日から週が始まるような感覚を受けるが、実際にはローマ帝国がイエス・キリストの復活の日である日曜日を祝日と定めてそれを週のはじめとし、キリスト教徒がそれを受け入れたことに起因している。国によって違うかもしれないが、ヨーロッパやアメリカのキリスト教国や日本では、カレンダーは普通日曜日から初めて土曜日が1番右に来るようになっているようである。

ここで、以前大きなものの大きさについて議論したように、大きな時間について考えてみるのもあながち無駄ではあるまい。まず地球の年齢 46 億年から始めてみよう。この年齢は太陽系の年齢とほぼ同じであると考えられている。つまり、地球ができたのは我々の太陽系ができたのとほぼ同時であると考えられている。太陽は我々に1番近い恒星であり、その実態は水素からヘリウム原子核への核融合反応である。現在では星の進化は天体核物理学の分野として、詳しく調べられており、宇宙の始まりであるビックバン以来の恒星の辿る運命が次第に明らかになってきている。詳しい話は後に譲るが、地球 46 億年の年齢は、地球に存在する放射性元素であるウラン 235 の分量から半減期の分析を通じて得られたものである。太陽系第3惑星、地球ができてから、その後どのようにして海が出来、大気が出来、水の中からプランクトンを始めとする生命が発生し、それがカンブリア紀の古代生物を経て魚類に進化し、植物が発生し、魚が陸地に上がって恐竜や爬虫類、哺乳類、鳥類に進化していったかは、山崎努のNHKスペシャル「地球大進化」に詳しく描かれている。そこでは、母なる地球と言うよりはむしろ荒ぶる地球が地球規模の2度にわたる全球大凍結、氷河時代、地球内部のマグマの対流から来る磁場や大陸移動、火山活動や地震、隕石の衝突、地球規模の天候変化、海水の塩分濃度や大気酸素濃度、気温変化などによって、いかにダイナミックに生物を育ててきたかを、「進化カレンダー」と言う時間の座標軸に沿って見事に解説している。進化カレンダーとは、地球の年齢 46 億年を1年 365 日に換算して、1年のどの日にどのような地球進化が起きたかを端的に表したものである。これは天文学、地球物理学、海洋学、地球規模の気象学、考古学、文化人類学等の総合的研究の成果である。最後に山崎努は人類の発生と将来について述べる。人類は 500 万年前から 700 万年前頃にアフリカで類人猿として発生したと考えられるが、人類の進化もまた他の動物の進化と同様、20 種類以上の人類が発生しては消えていった歴史をたどったと考えられている。現在の人類(現生人類)、ホモサピエンスはおおよそ 20 万年前、アフリカで発生したと考えられている。近年のミトコンドリア DNA の解析による研究では、現在地球上に生きる約 70 億人の人類の先祖は、約 9 万年前にエチオピアの南にある東地溝帯に住んでいた1人の女性からすべて生まれたという驚くべき事実が明らかになりつつある。先程の山崎努の進化カレンダーでは、地球の年齢 46 年を1年に凝縮した場合、人類の発生は最後の 12 分くらいのことであると計算される。式の上で

は、1 年が約 $365 \times 24 \times 60$ 分 = 53 万分であることから、10 万年/46 億年 \times 1 年 = $10^5 / (4.6 \times 10^9) \times 5.3 \times 10^5$ 分 = $5.3 / 4.6 \times 10$ 分 = 12 分。すなわち、12 月 31 日の大晦日の 23 時 48 分頃のことである。この計算に従えば、人生 70 年生きたとしてその一生は $12 \text{分} \times 70 \text{年} / 10 \text{万年} = 12 \times 60 \times 70 / 10^5 = 0.5$ 秒、つまり 1 秒にも満たない。いかに大きなタイムスケールを我々が考えているか、また、いかに我々の人生が短いかがよくわかる。最近の NHK スペシャルで、人類オタクを自称する高橋一生氏が 3 回シリーズで 20 種類以上の人類の発生と現生人類であるホモサピエンスの発生の歴史、さらに日本人はどこから来たかと言う問題に取り組んでいる。これは非常に興味深い番組である。また日本列島は 1 億年から 7 千年前頃から、徐々に大陸から分離してできたと考えられているようであるが、これは人類発生よりもはるかに昔のことである。私が中高生の頃、学校で約 6 千年前の近代文明として世界 4 大文明、チグリス、ユウフラテス河間のメソポタミア文明やエジプト文明、中国の黄河文明、インドのインダス文明が発生したと習ったが、今やそのような説は時代遅れであり、1 万年以上も前の後期石器時代にすでに高度な文明が存在していた例が日本をはじめ世界各地で発見されているということである。いろいろな近代科学を駆使しての総合的研究はここでも大きな成果を上げている。

さらに大きな時間を扱う研究として、宇宙の研究がある。現在我々のもつ最新の科学知識によれば、宇宙にはビックバンという始まりがあつたということが明らかになっている。結論から先に言うと、宇宙の始まりは今から 138 ± 2 億年前ということである。138 という数字は奇しくも 46 の 3 倍であるが、これは偶然である。しかしながらこの年齢には注意が必要である。これより昔の時間は、アインシュタインの一般相対性理論に基づく現在の理論では考えることはできないということである。この年齢の基調になっているのは次の 3 つの実験的事実である。

- 1) ハッブルの膨張する宇宙
- 2) 前世紀の中頃、ベル研究所の研究者たちによって発見された、 3°K 宇宙背景放射
- 3) 宇宙に存在する古い星や新しい星に含まれる種々の元素の構成比が、地球を含む太陽系のそれとそう変わらないこと。

まず 1) は、宇宙にある多くの銀河は宇宙のどこから見ても遠い銀河ほど大きな速度で遠くに遠のいていくことがわかっている。これをハッブルの法則と言うが、これを逆にたどれば宇宙の一点にたどり着く。これが宇宙の始まり、すなわちビックバンである。ビックバン模型を初めて提唱したのは、ロシアの原子核物理学者、ジョージガモフである。1940 年代の事である。しかし実際に信じられるようになったのは、統一模型が確立した 1980 年代以後のことである。2) は、宇宙に充満している低い温度の電磁波の発見である。より正確には 2.7°K の電磁波が宇宙には充満していることが明らかになった。宇宙の始

まりのビッグバンの後、超高温、超高密度であった宇宙が徐々に膨張し、温度が下がっていき、約 38 万年後、温度がおよそ $3,000^{\circ}\text{K}$ になった時、宇宙を満たしていた大量の電子がプラスの電荷を持った原子核と結合して電氣的に中性である原子、分子ができたと考えられている。これを「宇宙の晴れ上がり」と言う。これにより光は電子に妨げられることなく、自由に光の速度で宇宙空間を飛びまわることができるようになった。宇宙はさらに膨張を続け、138 億年の年月を経て現在の 2.7°K になったと考えられる。3) もまた、ビッグバンの直後に、まず水素とヘリウムが出来、それ以外の重い元素も大部分が一気にできたと考えたと辻褄が合うということに基づいている。これは原子核物理学の大きな成果である。このような宇宙観は、1980 年以後確立した標準模型と呼ばれる物質観に基づいていて、いわゆる状況証拠でしかないが、大変尤もらしいと考えられている。今後ますますその正しさが確認されていくと思われる。このセミナーでは、以下で我々がそこに至った経過を物理学の発展の歴史的経過に従って数回にわたって説明していきたい。