

物質の根源と歴史 — 世界を形作るものはどこから来たのか？

Constituents and history of matter – Where has matter come from?

谷村 省吾 (Shogo Tanimura)

大阪市立大学大学院工学研究科応用数学分野
Graduate School of Engineering, Osaka City University

558-8585 大阪市住吉区杉本

Sugimoto, Sumiyoshi-ku, Osaka 558-8585, Japan

(大阪市立大学国際学術シンポジウム「材料と文明」2004年10月)

Abstract: How is matter constructed at the ultimate level? Is matter eternally unchangeable? Elementary particles constitute matter but they are not static but highly dynamical objects in the perpetual processes of creation, annihilation and transformation. Antiparticles are key-ingredients that enable such dynamical nature of particles. Elements on the earth were produced via various processes in the early universe and in a star that had shone and exploded in the past. We would like to discuss our concept on matter and material from the viewpoint of modern physics. 物質は究極的には何からできているのだろうか？物質は永遠に不変だろうか？物質は素粒子でできているが、素粒子は不変不滅の存在ではなく、不断に生成・消滅・転化を繰り返す動的な存在であることがわかってきた。その背後には反粒子の存在があった。地球にある元素は昔から今までどおりあったのではなく、灼熱の初期宇宙での3分間、燃え盛る星の中での数億年、爆発する星での数秒といったさまざまなタイムスケールの過程を経て合成されたことがわかってきた。現代物理が描く動的・歴史的物質観について概観したい。

1. 序論

物質の根源と起源を人類はどう理解してきたかという話題を提供したい。物質の基本構成要素は何かというミクロに掘り下げていく方向と、地球や生体を構成する物質はいかにして作られたかという宇宙史を辿る方向に沿って、現代物理学が描く物質観について理解を深めたい。本講演が「材料と文明」というテーマを掲げた本シンポジウムの議論の種になれば幸いである。

2. 物は何からできているのか？

物質の特徴として、普遍性（あまねく世界中に存在している）、多様性（おびただしい種類と多様な存在様式がある）、保存性（性質や量が時間的に変わらない。運んでも変わらない。多少の変化があっても、なくなったり増えたりしない）といった特徴をとりあえず挙げてよいだろう。世界には多種多様な物質があり、観察に堪える時間は不変な性質を帯びており、多少は物質の性質を変化させることもできる、という観察から、見かけ上多種多様な物質は、じつは共通の単純な根源物質からできているのでは

ないだろうか？だとしたら、根源物質は何だろうか？という問いを発するのは自然な発想だろう。

2.1. 古代ギリシャ文明が発した問い

こういう問いをまともにとりあげたことが記録に残っているのは、今から2500年ほど前の地中海東岸周辺の文明においてである。タレス(BC624-547?)は「水が万物の根源である」と考えた。ここで水が正解か土が正解かということは重要ではなく、重要なことは「万物に共通の根源物質があるに違いない」と考え出したことであろう。

デモクリトス(BC455-370?)は、物質は原子でできているという原子論を唱えた。原子は分割不可能、不変不滅の存在と考えられた。原子は真空中を運動しており、原子の間には力が働いて、これらの離合集散、配列や運動形態によって目に見える物質の性質を説明しようとした。しかし真空も原子も人々には受け入れがたく、実験的手法も到底不十分であり、そもそも思弁的な議論に終始していたため、この時代の原子論は発展性に乏しかった。

物質の構成要素の解明は、イスラーム文明、錬金術、近代化学、放射能の発見などを通して、結局2500年かけて進められた。なおこの問題提起から解

決まで本質的な寄与のほとんどすべてがユーラシア大陸西部の文明で行われた理由とその影響は、さらに検討されるべき課題であろう。

2.2. 現代の物質理解

物質の基本構成要素は現在どのように理解されているか、概観しよう。物質は分子・原子で構成され、原子は原子核と電子から成り、原子核は陽子と中性子から成り、陽子や中性子はクォークから成る、というのが現段階での到達点である。電子とニュートリノの仲間を総称してレプトンと呼ぶ。光子の同類にゲージボソンと総称される粒子がある。クォークとレプトンとゲージボソンが基本粒子である。基本粒子と呼んだのは、これよりも細かい内部構造はないと考えられる粒子である。陽子や中性子と同様にクォークから成る粒子は多種類あるが、これらもひっくるめて素粒子と呼ぶことにする。

素粒子は直接目には見えず、非常に間接的な手段でしか観察できない。驚いていただきたいことは、この粒子とあの粒子は同じ粒子であるとか違う粒子であるといった同定が可能であり、素粒子の性質や運動を測定したり解釈したり、ついには新種の粒子の存在や性質までも予測することが 20 世紀後半にできるようになったことである。

2.3. 反粒子

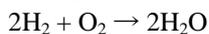
素粒子のふるまいの一番の特徴は、個数が不変ではないということである。例えば中性子 n はほうっておくと平均時間 15 分ほどで陽子 p と電子 e^- と反ニュートリノ $\bar{\nu}$ に崩壊する。このことを記号的に

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$$

と書く。また別の実験では、陽子 p にパイマイナス π^- という素粒子をぶつけると、ラムダ粒子 Λ とケイ粒子 K に変わり、 10^{-10} 秒ほどで Λ 粒子は、陽子 p とパイマイナス π^- に崩壊し、 K 粒子はパイプラス π^+ とパイマイナス π^- の対に崩壊する：

$$p + \pi^- \rightarrow \Lambda + K \rightarrow p + \pi^- + \pi^+ + \pi^-$$

素粒子は不変不滅ではなく、その個数すら一定ではないのである。一方、化学反応では、例えば



のように反応の前後で原子の個数は一定であり、分子を構成する原子の組換えが起こるだけである。ところが、素粒子の反応の前後で保たれるのは、粒子数ではなく、エネルギーや電荷といった量である。アインシュタインの関係式 $E=mc^2$ によって、エネルギー E は質量 m の粒子に転換可能なのである。

なぜ素粒子の個数が変化できるのかというと、反粒子が存在するからである。反粒子とは、粒子と同じ質量や寿命を持っていて、電荷だけはプラス・マイナス反転しているような粒子である。陽子には反陽子、クォークには反クォーク、電子 e^- には反電子

e^+ (陽電子) という相棒の反粒子がある。光子は電荷ゼロであり、反光子は光子と一致している。電子と陽電子は衝突すると消えて光子 γ の対になる：

$$e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma$$

光子 γ が原子核 N のそばを通過するとき電子・陽電子の対を生成することもある：

$$\gamma + N \rightarrow N + e^- + e^+$$

もっと極端には電子を加速運動させてやると (つまり電子を揺さぶってやると)、エネルギーを供給し続ける限り、光子を何個でも放出する：

$$e^- \rightarrow e^- + \gamma + \gamma + \gamma + \dots$$

こんなふうであるから、電子の中に光子が何個入っていたか? という問いは意味を持たないのである。

ディラックは相対論と量子論にもとづいて反粒子の存在を 1930 年に予言した。1932 年にアンダーソンが陽電子を観測した。反粒子という誰も見たこともなかった存在を、純粹に理論的な推論だけで予測したという事実は、まことに驚異的である。

3. 宇宙にはどんな物がどれだけあるのか?

3.1. 星の組成

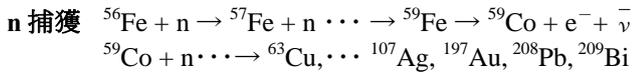
太陽や星は地球と同じ物質でできているだろうか? そもそも太陽や星が何でできているか知る手段があるだろうか?

古代ギリシャのアリストテレス (BC384-322) は地上の物質は水・土・火・空気の四元素から成り、天体はエーテルという根源元素から成ると考えた。エーテルは、月の表面で発生して宇宙を満たし、完全な物質であり、完全な形すなわち球形をなし、完全な運動すなわち円運動をするものだと考えられた。

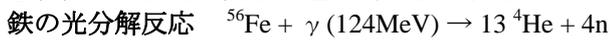
17 世紀にガリレオは月を望遠鏡で観察して、月の表面は山ありクレーターありで、でこぼこであることを発見した。そうすると月も地球と同じ普通の物質でできているのではなからうか、という気もしてくるわけである。

レンズ磨きの職人であったフラウンホーファーは太陽光線をプリズムや回折格子にあてて分解すると多数の暗線が入っていることを 1814 年に発見した。後に 574 本もの暗線を数え上げて分類を試みている。1859 年、炎色反応を研究していたブンゼンにキルヒホッフがプリズムを用いることを示唆し、各元素は特有の発光・吸収スペクトルを持っていることを発見。いわゆる分光学が始まる。キルヒホッフは太陽のスペクトルを実験室のスペクトルと比較し、太陽が地上にあるのと同じ物質でできている証拠を初めて見つけた。1868 年ロッキヤーが太陽スペクトル中であって、地上にはない元素の存在に気づき、ヘリウムと名づける。1870 年代にハギンスが何百個もの星のスペクトルを観測し、星は水素、ケイ素、鉄、ナトリウムなど、地上にもありふれた元素でできて

中性子は電氣的反発力を受けずに他の原子核に吸収される。中性子捕獲とベータ崩壊の繰り返しによって、重い元素の合成過程がゆっくりと進む：



ビスマスよりも重い原子核はただちにアルファ崩壊してしまうために蓄積されない。つまりウランやラジウムはこの過程では作られない。燃料が尽きたとき、次の破滅的な反応が短時間に進行する：



中性子密度が上昇すると、原子核が次々と中性子を捕獲し、重い原子核が崩壊する暇もなく合成され、一気に ${}^{238}\text{U}$ までの重元素が合成される。

3.3. 星の進化史

原子核はプラスの電荷を持っているので互いに反発しあう。核融合が起こるためにはこの反発力に打ち勝って原子核が衝突しなければならないので、高温高密度の環境でのみ、すなわち星の中心付近（コア）でのみ核反応が起きる。大きな原子核ほど電氣的反発力も大きいので、反応の進行のためにはより高温高密度が必要になる。星をつぶそうとする重力と、膨らまそうとするガスの圧力ががつりあっている間は星は安定である。もし圧力が急に消失すると星全体が星の中心めがけて落下しだす。これが重力崩壊である。

太陽はコアの密度が約 150g/cm^3 、コアの温度が約 1500 万度で、H 燃焼を 100 億年くらい続ける（あと 55 億年）。燃えかすのヘリウムがコアにたまと、コアは圧縮され、バランスをとるためコアを取り巻いている水素ガスは膨張し、赤色巨星になる。その後 He 燃焼温度には達するが、C 燃焼温度には達せず、膨れ上がった太陽は外層大気をゆっくり吹き飛ばして、収縮し、電子の縮退圧で自重を支える白色矮星になると考えられている。太陽は地球の大きさほどに縮み、密度は 1cm^3 あたり 1.4 トンにもなる。

重い星ほどコアは高温高密度であり、核反応はすみやかに進行する。太陽の 25 倍ほどの質量を持つ星の場合、中心温度 6000 万度、630 万年ほどで H 燃焼を終える。燃えかすのヘリウムがコアにたまとやはり赤色巨星になる。中心温度が 2 億度に達して He 燃焼が始まり、引き続き 50 万年ほど燃える。C 燃焼は 9 億度で起こり、6 千年ほど燃える。Ne 燃焼は 17 億度、1 年で尽きる。O 燃焼は 23 億度、0.5 年。Si 燃焼は 41 億度、1 日で燃え尽きる。

コアの燃料が使い果たされたとき、以下の反応が数分で進行する。コアが星自身の重みでつぶされ、50 億度に達すると鉄の光分解反応が始まり、これは吸熱反応であるために圧力の低下を招き、さらに圧縮が進行する。コア密度が高まると、電子が原子核

の中の陽子に押し込まれる逆ベータ崩壊が起こり、電子の縮退圧が消失するため、星の重力崩壊はさらにとめどなくなる。コアの中性子化が進み、密度が 1cm^3 あたり 5 億トンに達すると中性子の縮退圧が生じるようになり、コアの圧縮が急激に止まる。コアの上から落ちてきたガスは弾き返され衝撃波を生じ、中性子コアを残して星全体を吹き飛ばす。これが II 型超新星と呼ばれる爆発である。コアの中性子化が始まってからウランに達する重元素合成を完了するのにかかる時間は数秒である。この星の理論によれば超新星爆発の際、逆ベータ崩壊によって大量のニュートリノが短時間に生ずるはずである。地球から 16 万光年離れた大マゼラン星雲の SN1987A という超新星爆発のときに放たれたニュートリノを日本のカムイオカンデが観測したことは、星の進化的理論の正しさを裏付けるものであった。

地球は炭素や窒素、酸素やカルシウムや鉄もウランもある星だが、これら元素は、かつての星の燃えかすであり、爆発物の残骸なのである。星や太陽は、生命を育むエネルギー源であるだけでなく、生命の材料を生み出す元素合成炉でもあると言える。地球や我々の体を構成する物質は、かつて燃える星の中で過ごしてきたのである。

3.4. 宇宙の進化史

地球や太陽は、先代の星で合成され超新星爆発でばらまかれた元素を大量に含んでいる。しかし、まだ謎が残る。宇宙にある原子の 9 割は水素、1 割はヘリウム、その他は全部あわせても 1 パーセントしかない。もし最初はすべて水素で、他の元素は星の核反応で作られたとしたら、ヘリウムよりも先まで反応が進んで他の元素ももっとできるはずである。星以外のどこかで大量のヘリウムを作ってストップした元素合成過程があったのだろうか？

答えを言うと、宇宙のごく初めの灼熱の時期にヘリウムが作られたのである。宇宙が始まって 3 分くらいの頃に水素の融合反応で大量のヘリウムとわずかなリチウムとベリリウムが作られた。その後、宇宙は膨張し冷えていったため、それより重い元素が合成されることはなかったのである。これがビッグバン宇宙論の答えである。

ビッグバン宇宙論は、宇宙は超高温高密度の状態から始まって膨張し冷却しつつあるという説である。この説による宇宙の歴史はこんなふうである。宇宙の始まりの瞬間に何があったかはわからない。宇宙が始まって 10^{-10} 秒ほど経ったとき、宇宙の温度は 10^{15}K ほどであり、大量の光子とクォーク・反クォーク、レプトンと反レプトンが宇宙を満たしていた。この高温では光子は粒子と反粒子の対を作ることができた。宇宙が膨張し冷えるにしたがって、対生成は起きにくくなり、粒子と反粒子の対消滅が起きた。

このとき反粒子 10 億個につき、粒子は 10 億個よりも余分に 1 個あり、かろうじて粒子が残った。言わば物質と反物質の大量絶滅が起きたが、奇跡的に物質が残った。10⁻⁵ 秒ほど経ったとき、温度は 10¹² K で、クォークは陽子や中性子を形成し始めた。1 分経つと温度は 10⁹ K 程度に下がり、陽子から重水素、ヘリウム、リチウム、ベリリウムまでの原子核が合成された。3 分経つとこの反応も進まなくなった。このときの温度と時間が水素とヘリウムの存在比を決定した。

30 万年かかって宇宙の温度は 3000K まで下がった。この温度になると、電子が原子核の周りに捉えられて、原子が形成された。それ以前は、温度が高過ぎて光子のエネルギーが大きく、原子ができたとしても、光子がたちどころに電子を弾き飛ばしてしまっていたのである。原子は電氣的に中性なので、電磁波との相互作用が弱い。このときから光が遠くに届くようになった。つまり宇宙が透明になり晴れ上がった。このとき放たれた光は現在 2.7K の温度にまで冷めて、マイクロ波となって観測されている。

宇宙が始まっておそらく数億年後、最初の星が生まれた。いまは宇宙ができてから 140 億年経ったと考えられている。

ビッグバン宇宙論は次の 3 つの謎を解決するものである。一つは、なぜ宇宙にヘリウムはたくさんあるのに他の元素は少ないのか、という元素合成の謎。二つ目は、赤方偏移の謎（1914 年にスライファーが毎秒 1000km ほどで遠ざかっている銀河をいくつか発見した。ハッブルは後退銀河までの距離を測定し、遠くの銀河ほど距離に比例した速さで遠ざかっていることを 1929 年に結論した）。三つ目は、背景放射の謎（1965 年にペンジャスとウィルソンが、宇宙のあらゆる方向から 1~400GHz の電波がやって来ていることを偶然発見した）。1948 年頃にガモフは火の玉宇宙論を唱えた。それはアインシュタインの一般相対論が予言する宇宙膨張を額面どおり受け止めて、膨張を宇宙の最初までさかのぼることにして、元素合成の謎を解決しようというアイデアであった。ついでにガモフは、原始火の玉の名残として今も宇宙を満たす電波があるはずだと予言していたが、その予言はペンジャスらの発見まで忘れられていた。

4. 動的・歴史的物質観と文明

ここまでの話を整理したい。我々の素朴な物質観は、どちらかと言うと、物質は静的で不変なものだという見方であった。しかし素粒子のレベルで見れば、素粒子はそもそも個数すら一定ではなく、絶えず生成・消滅・転化している動的な存在だということを知った。

宇宙史的スケールから見れば、物質は昔から今までどおりあるのではなく、進化しているのである。

初期宇宙における劇的な粒子・反粒子の大量消滅の後に奇跡的に粒子が残った。灼熱の宇宙の中、3 分間でヘリウム、ベリリウムまでの元素が合成された。何億年も経た後、最初の星の火が点った。星は宇宙に浮かぶ核融合炉であり、元素のるつぼである。星の燃焼の中で、数億年かけて炭素や酸素、鉄や金といった元素がじっくりと合成される。星の重力崩壊と爆発という破局的な場面でわずかに数秒の間にウランのような重元素が合成され、宇宙にばらまかれる。それらが次の星の材料となり、生命の材料となり、文明の材料となるのである。

宇宙の物質の起源に関して残る謎をいくつか述べてこの論文を閉じよう。なぜ反粒子は絶滅して、粒子は残ったのだろうか？ビッグバン宇宙論によれば、10 億分の 1 の偶然で完全消滅を免れた粒子が残ったという。なぜ粒子と反粒子は同数完全消滅しなかったのか？ひょっとすると宇宙のどこかにまだ反粒子は残っているのだろうか？宇宙のかなたからはときどき反陽子や陽電子が飛んで来ることがある。でもこれは普通の粒子を衝突させてもできるものだ。もしどこからか反炭素や反酸素原子がやってきたら、これは大変なことを意味している。どこかに反物質でできた星があつて核融合反応をしなければそんな原子は作れないのである！

また、宇宙が原始火の玉となる 10⁻¹⁰ 秒よりも前の時刻に宇宙がどんな様子であったのか謎である。インフレーションという説や、量子宇宙論という説があるが、まだ確かなことはわからない。背景放射や極めて遠い天体についての観測データも近年蓄積されつつある。最初の星や銀河がいつ、どう形成されたかというのも謎である。宇宙で最初にできた星を探すのもたいへん難しいが、興味深い問題である。

なお、本論文では宇宙の物質とは、電磁波で見える物質のことを指していたが、宇宙には電磁波では見えない物質、ダークマターが大量にある可能性があり、その正体はまだ明らかにされていない大問題だということをつけ加えておく。

文献

- [1] E. Anders, M. Ebihara, "Solar-system abundances of the elements", *Geo.Cosmo.Acta* 46 (11) 2363-2380 (1982).
- [2] マーカス・チャウン (糸川洋訳), 僕らは星のかけら: 原子をつくった魔法の炉を探して, 無名舎, 2000.
- [3] ワインバーグ (小尾信彌訳), 宇宙創成ははじめの三分間, ダイヤモンド社, 1977 (新版 1995).
- [4] 青木和光, 物質の宇宙史, 新日本出版社, 2004.
- [5] 理化学研究所, 元素誕生の謎にせまる, 2002.
- [6] 佐藤文隆, 宇宙物理, 岩波書店, 1995.
- [7] インターネットで solar spectrum, SOHO NASA, Hubble NASA, WMAP といったキーワードで検索すると面白い画像や情報を得ることができます。

