

コメント

Multiverse に対して

田中 一

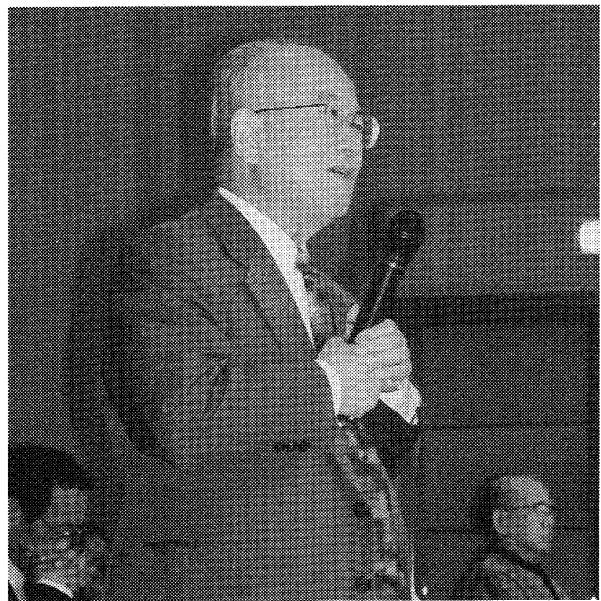
佐藤勝彦氏はその講演中で multiverse の可能性についてお話しになった。その理論の包括する内容の広大さに強い印象を受けた人が多いとは思いますが、同時に、その内容に現実感が伴ってこなかった方も少なくないように思う。ここでは、筆者がかねて理解し難いと思っていたことが multiverse の存在によって些か納得がいくように思われので、その詳細をコメントすることにする。

それは以下の3つの事項に関することである。講演会の性格を考慮してやや解説的に述べることにする。

1. 原子核の存在

原子核は原子の中央にあって、原子の約1万分の1の大きさをもつ陽子と中性子の集団である。その最も簡単なのは陽子ただ1個の水素原子の原子核である。以下の話題は陽子と中性子が2個ずつで構成されるヘリウムの原子核すなわち α 粒子のことである。以下核子という用語をよく用いる。核子とは陽子と中性子の総称である。

上に述べたように、 α 粒子は2個ずつの陽子と中性子すなわち4個の核子で構成されている。 α 粒子からその内の1個を取り出すには α 粒子にエネルギーを与えねばならない。別の言い方をすれば、 α 粒子の核子はエネルギー的に低い状態にある。それは粒子の間に引力が働いているためである。粒子の間に引力が働いているとその粒子系全体のエネル



田中 一 氏

ギーが低くなる。逆に粒子間に斥力が働くと粒子系のエネルギーが高くなる。このように、粒子間に力が働くと系全体のエネルギーが変化する。このエネルギーの変化量をポテンシャルエネルギーという。

今まで力と呼んできたものもそれがどの程度のエネルギー変化をもたらすかという捉え方をして力という代わりにポテンシャルという。わざとそういう気取った言い方をしているのではない。実は力という概念はミクロの世界では成り立たないのである。ミクロの世界の現象を分かり易く説明するための方便として力という用語を用いているだけである。

α 粒子のエネルギーはポテンシャルエネルギーだけで決まるのではない。日常の出来事を観察しても分かるように、運動している

物体は運動していることによってエネルギーを所有している。これを運動エネルギーという。運動エネルギーは速さの自乗に比例して大きくなる。流星が光を発するのはその速さが大気との摩擦で次第に減していくため、もともと持っていた運動エネルギーを背負いきれなくなって別の形のエネルギーすなわち熱エネルギーに換えて仕舞うからである。

α 粒子の全エネルギーはこの正值の運動エネルギーと負値のポテンシャルエネルギーの和となる。 α 粒子からその構成粒子である核子を取り出すのにエネルギーを与えねばならないのは、運動エネルギーの値よりもポテンシャルエネルギーの絶対値の方が大きくそのため α 粒子の全エネルギーが負になっているためである。 α 粒子が核子の安定した結合系になっているのはその全エネルギーが負になっていて、エネルギーを与えてやらなければ粒子を取り出すことが出来ないからである。

以上は準備的な話であるが、本論に入るとして、ここにまことに注目すべきことがある。それは、 α 粒子の運動エネルギーとポテンシャルエネルギーはその絶対値が可成り大きく、両者を加えると殆どを互いに打ち消してしまい、残った α 粒子のエネルギーの絶対値は、核子間のポテンシャルの取り方によるが、下のポテンシャルエネルギーの10分の1程度になってしまうことである。核子間ポテンシャルはまだ確定しないので、何分の1か確定的なことはいえないが、おおよその見当としては5分の1から10分の1程度である。よくぞポテンシャルエネルギーが残っているものだ、よくぞ核子間ポテンシャルが α 粒子の存在を許すかつかつの強さになっているものだという感が強い。

と同時にどうしてこのようなかつかつの強さになっているのか不思議な思いに駆られてしまう。そこで立ち入って核子間ポテンシャルの出生の由来を探ってみる。よく知られて

いるように、核子間ポテンシャルは核子が湯川中間子をやりとりすることによって生ずる。湯川中間子を π 中間子と呼んでいる。このやりとりから核子間ポテンシャルが生じてくる経過は略することにする。もっとも2核子が可成り近づいた時の2核子間ポテンシャルは π 中間子のやりとりだけでは導くことができないが、 α 粒子のポテンシャルエネルギーに寄与するのは湯川中間子のやりとりからの寄与が大きな比重を占めるので、ここでは核子間ポテンシャルを生むのは π 中間子からくるものだけであるとする。

さて仮想的な話であるが、もし π 中間子の質量が現実のものよりも少し大きかったとしよう。このとき α 粒子のポテンシャルエネルギーはその絶対値が少し減る。それは核子間の作用する範囲がやや小さくなって、結果的には核子間ポテンシャルが弱くなるからである。このためただでさえ α 粒子の運動エネルギーの値とポテンシャルエネルギーの絶対値が近い値で両者がほぼうち消し合っていたのであるが、その傾向がますます著しくなって、終いには打ち消し合いが逆転して α 粒子のエネルギーが全体としてプラスになり、 α 粒子を構成する核子は α 粒子に拘束されなくなる。言い替えれば、 α 粒子はバラバラに分解してしまう。

それでは一体 π 中間子の質量がどの程度増えれば α 粒子はバラバラになってしまうのであろうか。 π 中間子の質量を現実の π 中間子の質量を少し増加させてその時の α 粒子のエネルギーを求めてみる。その結果、 π 中間子の質量が2.5%増えただけで、 α 粒子のエネルギーは相当変化し、 π 中間子の質量が10%程度の増で α 粒子はバラバラになってしまう。

さて考えてみれば、 π 中間子の質量は自然のもっと奥深いところでその値が定まってきているはずである。別に α 粒子が無事に結合するようを予定していたはずもないであら

う。それは原子核一般の形成条件でもある。なぜならば、 α 粒子の結合の強さは原子核一般の結合の強さと同程度かそれ以上であるからである。にもかかわらず、 π 中間子の質量は α 粒子を形成するための条件、これ以上の大ききくはできないという大きい方の可成り厳しい条件を満たしている。偶然にしては偶然すぎる感がある。

2. 元素の合成

さて π 中間子の質量が適宜な値を取って α 粒子が無事形成されたとする。一般の元素、もう少し正確には他の原子の原子核はどのような経過を経て形成されるのであろうか。

α 粒子が形成されると高温の天体の中で陽子や中性子が α 粒子に衝突してこれに吸収され、核子数がより大きい原子核が形成されるはずである。事実陽子が 6 個で中性子が 6 個で構成されている炭素の原子核炭素 12 が存在すると、この原子核に核子が衝突して次々と吸収されて次第に核子数の大きな原子核が出来上がる。陽子数が 26 で中性子数が 30 の鉄の原子核までは、このようにして合成される。しかし残念なことに、 α 粒子は陽子 2 個と中性子 2 個で纏まりすぎていて α 粒子全体と核子との間のポテンシャルは可成り弱く、そのため α 粒子は核子を繋ぎ止めることが出来ないのである。これは π 中間子の性質から来ることである。そのため、太陽の中でもそうであるが、一般に天体の中では 4 個の陽子から α 粒子が合成されるにも拘わらず、それ以上の原子核を次々と核子数を増やしながらより大きい原子核を合成していくことは出来ないのである。

しかし実際には太陽を始め各天体の中では α 粒子が 3 個集まって炭素 12 が合成され、炭素 12 から核子がはじき飛ばされてこれよりは核子数の少ない原子核が合成され、また核子を次々と吸収してより核子数の多い原子

核が合成されていく。鍵を握るのは炭素 12 の合成であるが、その合成過程はまことにスリルに富んでいる。

α 粒子と α 粒子が衝突しても陽子と中性子が 4 個ずつの安定した原子核を作ることがないが、約 1 京分の 1 秒弱の間結合している。この時間は極端に短くあまり結合しているという意味がないように見えるが、そうでもない。全く結合していない 2 個の α 粒子が会う時間間隔は 2 個の α 粒子がただすれちがうのに要する時間である。 α 粒子は光の速さに近い速さで飛び回っているので、 α 粒子の大きさからそのすれ違いに時間はすぐ求めることが出来る。その時間は 1 京分の 1 秒の百万分の 1 を超えることはない。10 日に対する 1 秒以下である。2 個の α 粒子は衝突して結合状態としては充分意味のある時間結合しているのである。

このように 2 個の α 粒子が泡沫の間結合しているとき、他のもう 1 つの α 粒子が衝突するとしよう。3 個の α 粒子は互いに堅く結合することが出来るので、ここで炭素 12 という安定した原子核が形成され、この原子核から他の原子核が次々と形成されるのである。きわどい経過ではあるが。

さて問題はこれからである。ここで仮に陽子の持つ荷電量が少し違う値になったとしよう。自然の粒子の荷電量はコォークを除いて全て同じ大きさである。その大きさを単位荷電といい、 e で表している。コォークの荷電量も単位荷電の 3 分の 1 を単位にしているので、単位荷電 e が単位であることに変わりがない。前節の考察の流儀に従い、 e の値を少し変えて見てどうなるかを調べてみよう。

e の値が少し増加すと α 粒子間の斥力が少し増加する。なぜなら α 粒子は陽子を 2 個含んでおり、陽子が正の荷電を持っているため、 α 粒子間には電氣的斥力が作用しているからである。このためただでさえ弱い α 粒子間の引力は一層弱くなり、2 個の α 粒子が結

合している時間がさらに短くなる。実際に温度が1億度の天体の中で計算してみると、単位荷電 e がただの1%増加しただけで、2個の α 粒子の結合時間は千分の1になってしまう。この減少の割合は天体の内部の温度に余り関係しない。この減少の結果、 α 粒子よりも核子数の多い元素の量は極度に少なくなる。このような宇宙では、冷えた α 粒子の元素つまりヘリウムガスは立ちこめていても、地球のような風景、すなわち色々な元素とそれらの化合物からなる世界は宇宙のどこにも見られないのではなかろうか。われわれは e の現在の値に感謝しなければならないようである。

しかしながら、考えてみると、この e の値はそれこそ自然の奥深いところで決まっているはずである。この自然の元素の種類を多くするという目的の下何等かの方法で現在の値を取るようにしてあるのではないであろう。炭素12以上の元素の合成が可能になるよう単位荷電量が現在の値になっているのはどうしてであろうか。不思議である。

3. 魔法数のズレ

つぎの話のためには原子核と原子の「魔法数」について説明しなければならない。

原子核は陽子と中性子を構成粒子とする多体系であって、陽子数と中性子数が異なれば原子核として異なったものとなり、その種類は何千という数に上る。これらの原子核はそれぞれ性質が異なっていて、安定なものもあれば不安定なものもある。安定な原子核にもとくに安定なものとはそうでないものがある。ここでいう安定とはどのようなことを指すのか若干説明しておこう。

すでに述べたように、原子核から核子を1個引き離そうとすればそれだけ何ほどのエネルギーが必要である。このエネルギーが大きければ、その原子核を壊すには大きなエネルギーが必要になる。このときには原子核

の安定さが高いということになる。安定な原子核を良く見ると面白いことに気が付く。それは陽子にしても中性子にしても原子核を構成している陽子あるいは中性子の数が2, 8, 20, 28, 50, 82, 126のどれかになっている原子核は、その周辺の原子核に比べるととくに安定である。前節でたびたび取り上げた α 粒子では陽子数と中性子数がいずれも2であるので、とくに他の原子核より安定である。酸素の原子核の大部分は陽子数と中性子数が両方とも8である。この酸素の原子核は格別に安定である。上に述べた一連の整数を魔法数という。魔法数を持つ原子核は安定であるので、一たび天体の中で合成されると壊れにくい。その結果、魔法数を持つ原子核は周辺の原子核つまり近い核子数を持つ原子核に比較し自然の中に多量に存在している。

原子にも魔法数がある。原子では中心にある原子核の周りを電子が運動しているが原子全体としては電気を帯びていないので、原子核の周りを運動している電子数は正の荷電を持つ原子核内陽子数に等しい。電子は陽子の数だけあるのである。原子には原子番号というものがあるが、これは要するに原子内の電子数のことである。

この電子数が2, 10, 18, 36, 54等の原子は安定である。もっとも魔法数という用語は主として原子核に対して使用されているのであって、原子に対しては原子核からの借用である。

さてここで原子や原子核が安定であるということにはもう一つの面があることに指摘しよう。原子は通常他の原子と結合して分子を作る。酸素や水素の原子は2個結合して酸素や水素の分子を作る。原子間には引力が働いており、この引力によって原子は結合することが出来る。さて原子間の引力はどのようにして生ずるのであろうか。それは2個の原子が近づいたときそれぞれの原子を構成している原子核と電子の間の電氣的引力によって

2個の原子が変形し、その結果全体のエネルギーが下がり、あたかも引力が働いたのと同様なことになるからである。したがって、安定な原子は変形しにくく原子間の引力が生じない。実際元素の中には希有元素というのがある。ネオン、アルゴン、クリプトン、キセノンがそうであって、何れも原子の魔法数を持っている。これらの元素では、1個の原子がそのまま分子であって、他の原子と化合することが極めて少ない。

さて上の原子と原子核の魔法数を改めて見れば分かるように、両方の魔法数は同じでない。両者にズレがあることがこの自然の組み立ての上で極めて貴重なことであるというのが私の意見である。このことを以下に述べよう。

すでに上で述べたように、魔法数を持つ原子核は安定で天体の中では他の周辺の原子核よりも多量に合成される。その結果、原子核の魔法数を持つ原子もまた多量に存在する。一方原子の電子数すなわち原子番号が魔法数であれば、その原子は安定で他の原子と化合することがない。そこで一つ仮想的な自然を想定しよう。もし原子核の魔法数と原子の魔法数が一致する自然があるとすれば、それはどんな自然であろうか。そこでは多量に存在する元素が互いに化合せず、気体として存在する全く混沌・カオスの自然である。もとより生物の誕生もなければ、人間社会も生まれない。面白くもない自然である。

この自然の実際はそうではない。それは双方の魔法数がずれているからである。とくに注目すべき元素は酸素である。酸素の原子核の陽子数と中性子数はいずれも魔法数である。したがって酸素の原子核は安定であって、そのため天体の中で多量に合成され、またその結果としてこの宇宙における酸素元素の量は極めて多い。その酸素原子の電子数すなわち原子番号は8で原子の魔法数10から2つずれている。このズレが絶妙の効果をもたら

すのである。

電子数が魔法数の原子は安定であることをすでに述べたが、その裏返しとして、電子数が魔法数より1個少ないか多い原子は電子を1個増減させて電子数が魔法数の安定な原子になりやすく、そのためこのような原子は容易に変化し化学的に反応性に富む。例えば原子の魔法数10に対して、原子番号が9のフッ素や原子番号11のナトリウムは化学的にきわめて反応する。そこで酸素に注目しよう。すでに述べたように、酸素の原子核は魔法数の陽子と魔法数の中性子でできており、2重の魔法数を持つ結果として極めて多量に合成されることを述べたが、その上、原子番号は原子の魔法数から2つずれているため、適当に活発に化学反応を行う。水素に関して言えば、もともと陽子はこの諸々の元素合成の最初にあった粒子であってそのため多量に存在するが、原子番号が1で原子の魔法数からずれているため、化学的によく反応する。

自然に多量に存在する元素が化学的に活発に反応するからこそ、この自然は面白くなる。多量に存在する原子が化学的に反応しないようではこの自然も構造はまことに単純になってしまう。この自然が多彩な様相を示す背景には、原子核と原子の魔法数のズレが背景になっているのである。

さてそれでは原子核と原子の魔法数がずれるのはどうしてなのであろうか。核子数の大きな原子核はもともと少量しか存在しないので、自然の多彩さを論ずるときには核子数の比較的小さな原子核についてズレの起源を考察すればよい。

原子の魔法数は原子内の電子が受けるポテンシャルの作用によって決まり、原子核の魔法数は核子が原子核内で受けるポテンシャルの作用で決まります。問題はこれらのポテンシャルの違いにある。くわしいことは多少面倒な数式を必要とするのでここでは省略することになるが、原子内のポテンシャルは丁度

ポテンシャルの中心とその作用を受ける電子までの距離を r とすると $1/r$ に比例する強さとなる。この形は重力と同じである。

太陽系の惑星には太陽から随分遠いところを回っているものがある。彗星には惑星よりも遙かに遠くまでその軌道が広がっているものがある。これは $1/r$ という形を取るポテンシャルの作用を受けて周期運動をする物体の特性で、このポテンシャルの作用を受けて周期運動をする物体の運動エネルギーもまたポテンシャルと同じく $1/r$ 程度の大きさを持つことが分かっており、その結果、物体が回転運動の中でどこまで遠く回っても、その時の運動エネルギーとポテンシャルエネルギーとは同程度になり、ポテンシャルの効果が有効になっているのである。このため $1/r$ の形を取っているポテンシャルを遠距離性を持つという。

これに対して原子核内の核子が受けるポテンシャルは遠距離性を持たず、原子核の境界で殆ど消えてしまう。これを近距離性という。近距離の程度は第1節ででてきた π 中間子の質量による。その質量が大きくなれば、近距離性が著しく、うんと小さくなれば遠距離性に移る。原子核の魔法数が原子のそれとずれるためには現在の π 中間子程度の質量が必要である。実際原子に中の電子が受けるポテンシャルは通常クーロン力と呼んでいるもので、その遠距離性は光に質量が無いことによる。こうして2種の魔法数のズレの起源が明らかになった。それは光が質量を持たないことに対して、 π 中間子が相当な質量、実際には電子の265倍の質量をもっているためである。

ここに至って第1節と第2節と同様な疑問を提起せざるを得ないことになる。光に質量が無く、 π 中間子が電子の265倍の質量を持つ根拠は自然の奥深いところにある。今日のような多彩な自然の出現を目的として光と π 中間子の質量が決まったはずがないであ

う、偶然にしては偶然過ぎる。一体どうしてであろうか。

4. Multiverse の視点に立てば

今までの話をまとめよう。最初の話では、天体の中で原子核が合成の出発点としての α 粒子の形成が可能になるためには、 π 中間子の質量が現在値より大きくなることができなかつた。第2の話では、天体内で作られた α 粒子から炭素12という原子核が合成される、 α 粒子を超えて他の原子核の合成が可能であるためには、単位荷電が現在値より大きな値を取ることができなかつた。最後の第3の話では、元素の化学反応が多彩な自然を形成するためには、 π 中間子の質量が現在値より小さくなることを避けねばならなかつた。これらの事実は漠然としたわれわれの通念を覆すのではないであろうか。

われわれは何となくつぎのように思っている。たとえ自然の基本定数が今の値からズレるようなことがあっても、高々その影響は私達が見る自然に量的な変化を与えるだけで、自然の構造自身には余り変わりがないのではなかろうか、例えば地球の大きさが半分になったり、私達の身長が倍になったりすることはあるかも知れないかと。

この通念は正しくなく、われわれが見る自然の多彩さが現実化し得るためには、自然の基本定数が可成り厳しい条件を満たさねばならないようであるというのが、今まで示してきたところである。もしそうだとすると、これは実に理解し難いことである。なぜならば、自然の基本定数は自然の奥深い基本の構造から定まってくるものである筈である。単位の単位荷電などはまだどのようにして定まってきたのかよく分からない。その自然の基本から定まってくる筈の基本定数が出来上がった自然が多彩になれるよう、狭い条件を予め満たしていなければならぬことになる。自然を多彩にするため予め何かの原理が

あって、その原理に従って宇宙が形成されたという予定調和説を取ることなく、これをどのように合理的に理解するばよいのであろうか。これが最後に提起したい問題である。

このことを理解する方法の一つとして、自然の基本定数が超々長期の間に次第に変化得るもので、その変化の途時にたまたま多彩な自然の構成の可能な組み合わせがあって、その時には宇宙に多彩な自然が成長することができる。われわれは丁度その時にあるのであると。

この考えは受け容れ難い。なぜならば、物質とそれに関わる基本定数とは密接不可分の関係にあり、基本定数だけが変化することは有り得ないように思われるからである。そこで Multiverse の出番となる。もし宇宙が数多く形成され、ある宇宙はわれわれの宇宙より

も多次元であり、他の宇宙は時空の構造がわれわれの宇宙と異なるということもあり得ようが、その中には、自然が多彩な自然に進化し得るような自然の基本定数の組み合わせを持ったものが混じっていてそれがわが宇宙ではあるという可能性もあろう。そのような宇宙の一つがわが宇宙であるとすれば、ここで述べた基本定数のミステリーを合理的に理解することができるように思われる。どうであらうか。

追記 この話の1部を最初に述べたのは1973年に夏に開かれた原子核三者夏の学校で行った講義の中であった。その後1982年に新潟大学理学部の集中講義「自然のシルクロード」としてほぼここで述べた内容を講じた。