

地球における生命誕生と量子力学

森田 健^{a,b*}

a. 静岡大学理学部

静岡市駿河区大谷836

b. 静岡大学創造科学技術大学院

静岡市駿河区大谷836

Abstract

今から約38億年前に地球で最初の生命が誕生したとされている。しかし、生命のような複雑なシステムが自然に生じる確率は絶望的なほど低い可能性がある。そのように低い確率でも、量子力学の多世界解釈に基づくと、地球における生命誕生を自然に説明できることを解説する。また、そのような生命誕生のシナリオは、量子コンピュータにおける暗号解読のアイデアと類似していることを紹介する。

*E-mail address: morita.takeshi(at)shizuoka.ac.jp

1 はじめに

地球における生命誕生の起源は、科学における最も深遠な問題の1つである。今から約38億年前、地球が形成されてから約8億年後に最初の生命が誕生したとされるが、その過程は未だ完全には理解されていない。特に生命の基本的な構成要素であるタンパク質や核酸などの複雑な高分子が自然発生し、それらが生体として機能するというのは確率論的にみても絶望的に低い可能性がある。

天文学者のフレッド・ホイルは、偶然に任せて生命ができるのは

「サルにタイプライターのキーを叩かせて、
シェークスピアの『ロミオとジュリエット』ができあがるのを待つと同じ」 [1],
「がらくた置き場の上を竜巻が通過し、
その中の物質からボーイング747が組み立てられるのと同じくらい」 [2]

だと述べた。これらは少し誇張された表現かもしれないが、生命の誕生が確率論的に非常に低い可能性があることを示すための有名な例えである。

実際、タンパク質の解析から地球上の生物は1つの共通先祖の子孫であると考えられている。また地球上で複数の生命が独立に誕生したという証拠は見つかっていないため、地球での生命誕生はその共通先祖誕生の1回のみ可能性がある。これは地球における生命誕生の確率の低さを示唆している。

本稿では、量子力学の多世界解釈[3]を用いると、地球における生命の誕生が確率論的に非常に低くても、地球に生命が存在することを自然に説明できることを議論する。またこのように非常に低い確率の事象でも量子論的に実現できるという考え方は、量子コンピュータにおける暗号解読と類似していることを紹介する。これらを通して量子力学が、これまでの確率や統計の概念を大きく変えるものであることを見ていく¹。

2 生命誕生の絶望的な確率

私たちの地球は、生命の誕生と進化に適した奇跡的な環境を持っている。液体の水が存在し、適切な温度範囲が維持され、多様な化学物質が供給されている。また宇宙線という強力な放射線からも地磁気によって守られており、生命を育むための条件がそろっている。しかし、これらの好条件にもかかわらず、自己複製能力を持つ生命のような極めて複雑なシステムが地球上において自然発生する確率は、統計的に見れば「絶望的なほど低い」可能性がある。

天文学者の戸谷友則は「RNAワールド」[4]と呼ばれる生物学の仮説と確率論に基づき、1つの地球型惑星において生命が誕生するためには、太陽のような恒星が 10^{39} 個程度必要であ

¹本稿は、静岡大学での学部生向けの量子力学の解説をもとに作成した。本稿で紹介する地球での生命誕生を多世界解釈で説明するというアイデアを明記した文献は著者が調べた限りでは見つからなかったが、人間原理や多世界解釈の研究者にとっては自然な考え方であると思われる。

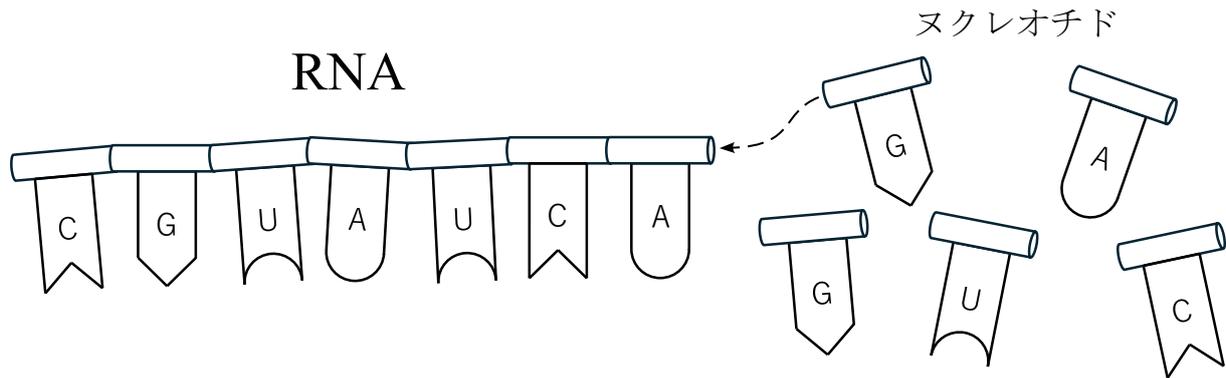


Figure 1: RNA分子は、アデニン（A）、ウラシル（U）、シトシン（C）、グアニン（G）の4種のヌクレオチドから構成される。RNAワールド仮説では、原始地球において様々なRNA分子が自然発生し、その中で生体機能を獲得したものが、最初の生物となったとされている。

ると見積もっている[5]。これは、観測可能な宇宙に存在する恒星の数（約 10^{22} 個）を遥かに超える数値であり、生命の偶発的な発生確率がいかに低いかを示唆している²。

なぜこのように低い確率となるのかを簡単に紹介する。戸谷が用いた「RNAワールド仮説」[4]とは、原始地球における最初の生物がRNAを利用していったという説であり科学界で広く支持されている。RNAは、アデニン（A）、ウラシル（U）、シトシン（C）、グアニン（G）の4種のヌクレオチドから構成される核酸であり、これらのヌクレオチドが特定の順序で一定の長さ以上結合することで自己複製やタンパク質合成などの生体機能を獲得し、それが最初の生物となったと考えられている(図1)。

実際、原始地球では、RNAを構成するヌクレオチドが自然に合成される環境が存在したと推測されている。また環境によってはヌクレオチド同士の結合も起こるとされている。そのため、このような自然発生的なヌクレオチドの結合により、生体として機能する特定の配列のRNA分子が形成されれば、生命が誕生すると期待できる。

しかし、このような過程は確率論的にみると極めて低い可能性がある。RNA分子が生命として機能するためには、ある程度以上の長さが必要である。だが、このような自然発生的な反応では長い配列ほど生成される確率が「 $1/(\text{長さ})!$ 」に比例して急激に低くなる。

さらにそのように長いRNA分子が形成されたとしても、それが生体機能を持つためには特定の配列となる必要がある。例えば、100個のヌクレオチドからなるRNA分子の組み合わせは $4^{100} \simeq 1.6 \times 10^{60}$ 通りという莫大な数になる。仮にこれだけの組み合わせのRNAを一度に作るとすると、必要なヌクレオチドの総質量は、太陽の質量の 4.6×10^7 倍という天文学的な数になる[6]。この組み合わせの中で、生命として機能するものが何通りあるかは不明であるが、偶然に生命が誕生する確率は非常に低そうである。

戸谷はRNA分子が生命活動を示すために必要な最低のヌクレオチドの個数が40の場合に、いくつかの仮定の下に、先に挙げた 10^{39} 個の恒星が生命誕生に必要であるという見積もりを示

²戸谷は初期宇宙に起きたインフレーションを考慮すると、地球から観測できない宇宙が広大に広がっているため、宇宙全体では生命誕生に必要な恒星の数を満たせると議論している[5]。本稿では、インフレーションでそこまで宇宙が広大に広がらなくても、量子力学の多世界解釈によって生命誕生を説明できることを紹介する。

した³。この見積もりには多くの不確定要素があるため、あくまで概算であるが、生命の誕生が偶然に起こる確率が極めて低いことを定量的に示す一例として重要なものである。

3 量子論による生命誕生のシナリオ

生命誕生のこの絶望的な確率は、通常確率論に基づいたものである。ここからは生命誕生がこのように低い確率であったとしても、量子論を用いると自然に生命誕生を説明できることを紹介する。そこで重要になるのは、量子力学の「重ね合わせ」と「多世界解釈」である。これにより、量子論では通常確率論的な直感とは全く異なる結果が得られることを見ていく。

3.1 「重ね合わせ」と「多世界解釈」

量子力学の「重ね合わせ」と「多世界解釈」について簡単に紹介していく。なお多世界解釈について日本語で解説した参考書として書籍[8, 9]などがある。

まず量子力学における基本的な性質である「重ね合わせ」について、電子のスピンを例にとって説明する。よく知られているように電子はスピンと呼ばれる自転運動に対応した角運動量を持ち、その角運動量の値は $+\hbar/2$ または $-\hbar/2$ の2つのうちどちらか一方の値しかとらない⁴。そこで、スピンの値が $+\hbar/2$ となる電子の状態を $|+\rangle$ とし、 $-\hbar/2$ となる状態を $|-\rangle$ で表すことにする(量子力学では粒子などの状態を $| \rangle$ 記号で表す)。このとき一般的な電子のスピン状態を $|\psi\rangle$ とすると、この状態は次のように表される。

$$|\psi\rangle = \alpha|+\rangle + \beta|-\rangle \quad (3.1)$$

ここで α と β はスピンの状態によって決まる複素数で、 $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ を満たす。そして、この電子のスピンを測定すると、確率 $|\alpha|^2$ でスピンの値が $+\hbar/2$ となり、確率 $|\beta|^2$ でスピンの値が $-\hbar/2$ となる。

このように状態 $|\psi\rangle$ のスピンの値が確率的にしか決まらないのは、古典力学では理解することができない量子力学の特徴である。仮にスピンの値 $\pm\hbar/2$ がコインの表と裏のようなものだと考えると、古典力学では表か裏のいずれかの状態しかとれない。しかし、量子力学ではこれら2つの状態を同時にとることができ、スピンの値が確率的にしか決まらないという現象が起こる。これを2つの状態の「重ね合わせ」と呼ぶ。また(3.1)式はスピンの状態 $|\psi\rangle$ が $|+\rangle$ と $|-\rangle$ の「重ね合わせの状態」であることを示している。このように異なる複数の状態を重ね合わせることができるというのは、我々の日常的な感覚とは全く異なる、量子力学の驚くべき性質の1つである(図2)。

³実際にRNAが生体として機能するためにはヌクレオチドが40個程度必要という報告がいくつかあり、例えば最近のものだと文献[7]がある。なお現在の地球上において最小のRNA配列を持つものとして、ウイロイドとよばれる植物病原体が知られており、そのRNAは200~400個のヌクレオチドからなる。参考までにインフルエンザウイルスのRNAは約13,000個、人のDNAは約30億個からなる。

⁴ \hbar は換算プランク定数(ディラック定数)で、 $\hbar = h/2\pi = 1.054\dots \times 10^{-34}$ J·sである。

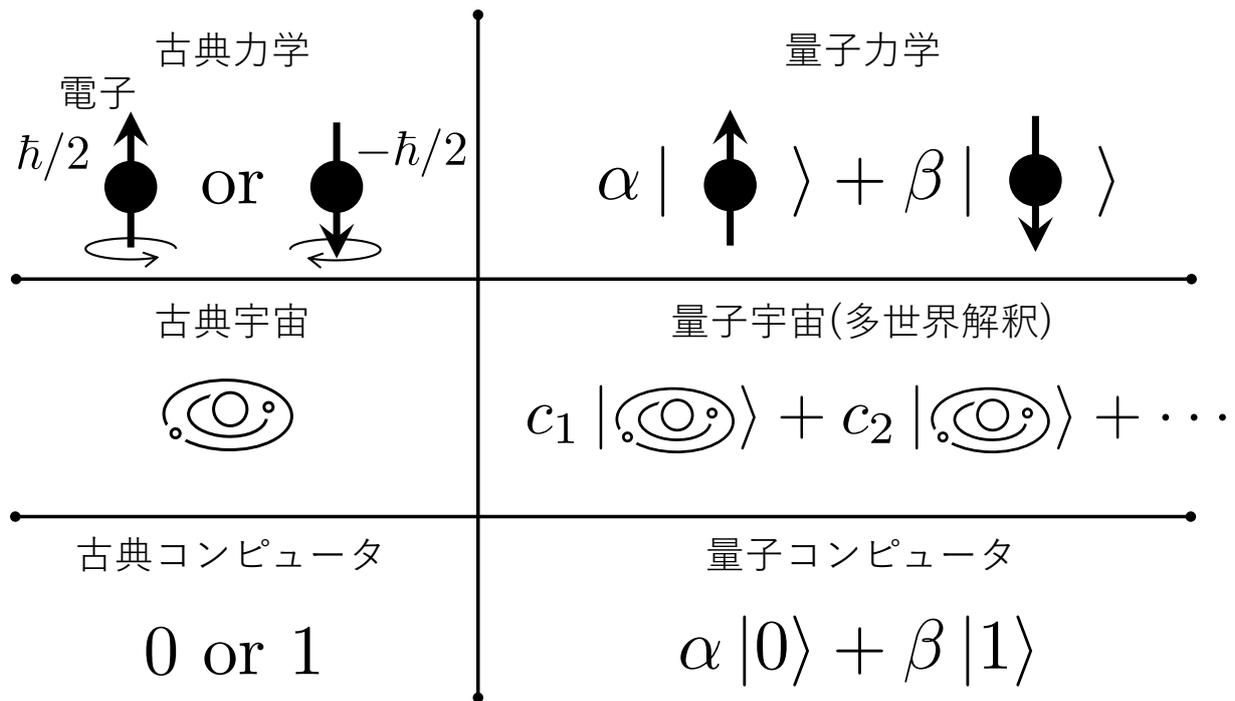


Figure 2: 量子力学と古典力学. 量子力学では古典力学と異なり, 複数の状態の「重ね合わせ」の状態が存在する. これにより, 我々の直感と反する様々な現象が量子力学では起こる. 量子コンピュータは, この重ね合わせの状態を利用することで古典コンピュータでは実現できない効率的な計算を可能にする.

さて, スピンの値を測定すると確率的に値が決まると述べたが, これは測定によって電子の状態が次のように $|+\rangle$ または $|-\rangle$ に変化することを意味する.

$$|\psi\rangle = \alpha|+\rangle + \beta|-\rangle \xrightarrow{\text{測定}} \begin{cases} |+\rangle & (\text{確率 } |\alpha|^2) \\ |-\rangle & (\text{確率 } |\beta|^2) \end{cases} \quad (3.2)$$

このような測定による状態の変化は, 実験的にも確認されている量子力学の基本的な現象である. しかし, この状態の変化が量子力学の解釈問題と呼ばれる深刻な問題を引き起こす.

この問題をみるために, この測定による状態の変化をもう少し詳しく考えてみよう. 電子のスピンを測定するためには, 何らかの測定器が必要である. そこでこの測定器も含めて(3.2)式を考察する. スピン測定前の測定器の状態を $|\text{測定器}\rangle$ とし, 測定後の測定器の状態を, 測定されたスピンの値に応じて $|\text{測定値:}+\rangle$ と $|\text{測定値:-}\rangle$ とする. そして測定前のスピンの状態と測定器の状態を $|\psi\rangle \otimes |\text{測定器}\rangle$ と書くと, 測定により次のような変化が起きたと考えられる(量子力学では複数の粒子や機器の状態を \otimes で結合して表す).

$$|\psi\rangle \otimes |\text{測定器}\rangle = \alpha|+\rangle \otimes |\text{測定器}\rangle + \beta|-\rangle \otimes |\text{測定器}\rangle \xrightarrow{\text{測定}} \begin{cases} |+\rangle \otimes |\text{測定値:}+\rangle & (\text{確率 } |\alpha|^2) \\ |-\rangle \otimes |\text{測定値:-}\rangle & (\text{確率 } |\beta|^2) \end{cases} \quad (3.3)$$

さて, この測定器は, 分子や原子などの物質からできているはずである. そのため測定器による測定は, これらの物質と電子 $|\psi\rangle$ の相互作用を通じて起こる. 量子力学における物質間の相互

作用や時間発展はシュレディンガー方程式に従うので、この測定による状態の変化もシュレディンガー方程式に従うと期待したい。しかし、そのような期待は困難である。シュレディンガー方程式は線形性を持つが、(3.3)式の状態の変化は線形性を持たないため、シュレディンガー方程式に従うことができない。そのため、(3.3)式を正当化するためには、シュレディンガー方程式以外の時間発展を導入する必要がある。測定器を構成する物質がシュレディンガー方程式に従うにもかかわらず、測定器がシュレディンガー方程式以外の時間発展をするというのは明らかに矛盾している。これが量子力学の解釈問題と呼ばれる問題の1つである。

この問題を解決するための1つのアイデアが、量子力学の多世界解釈である[3]。多世界解釈では、測定による状態の変化が(3.3)式ではなく、次のように表されるとする⁵。

$$\begin{aligned} |\psi\rangle \otimes |\text{測定器}\rangle &= \alpha|+\rangle \otimes |\text{測定器}\rangle + \beta|-\rangle \otimes |\text{測定器}\rangle \\ &\xrightarrow{\text{測定}} \alpha|+\rangle \otimes |\text{測定値:}+\rangle + \beta|-\rangle \otimes |\text{測定値:-}\rangle \end{aligned} \quad (3.4)$$

このような状態の変化は線形性を保つため、シュレディンガー方程式と矛盾しない。

多世界解釈による状態の変化(3.4)式と(3.3)式を比較してみよう。(3.3)式では、測定後の状態は、 $|+\rangle \otimes |\text{測定値:}+\rangle$ または、 $|-\rangle \otimes |\text{測定値:-}\rangle$ のいずれか一方の状態であり、測定されなかった状態は存在しない。一方、(3.4)式では、 $|+\rangle \otimes |\text{測定値:}+\rangle$ と $|-\rangle \otimes |\text{測定値:-}\rangle$ の両方の状態が、測定後も重ね合わせの状態で存在し続けている。

測定後も測定値が異なる2つの状態が共存するというのは、奇妙に感じるかもしれない。しかし量子力学では測定器のような大きな物体では、2つの状態の干渉がほぼ無くなるため、お互いの影響は無視できる(実際、我々は大きな物体の重ね合わせの状態を観測したことがない)。お互いの影響が無視できるということは、測定後の状態 $|+\rangle \otimes |\text{測定値:}+\rangle$ にとっては、状態 $|-\rangle \otimes |\text{測定値:-}\rangle$ が存在していないのと同じである。同様に、状態 $|-\rangle \otimes |\text{測定値:-}\rangle$ にとっても、状態 $|+\rangle \otimes |\text{測定値:}+\rangle$ は存在しないと見なせる。これは各々の状態にとっては、あたかも状態の変化(3.3)式のように、他方の状態が存在しないと観測されることを意味する。

また状態 $|\psi\rangle$ の電子を多数用意し、それらのスピンを測定すれば、それぞれの測定で $+\hbar/2$ が確率 $|\alpha|^2$ で得られ、 $-\hbar/2$ が確率 $|\beta|^2$ で得られることを、状態の変化(3.4)式から示すことができる(詳細は文献[8, 9]参照)。これにより、多世界解釈による状態の変化(3.4)式は、シュレディンガー方程式と矛盾することなく、実験的に観測される状態の変化(3.3)式を説明できる。

ただし、多世界解釈による状態の変化(3.4)式は、まだ不正確である。実際は、この世界には電子と測定器の他に、その他の物質や人間なども含めた宇宙が存在している。これらの状態を

⁵一般には測定後の状態に位相の変化が生じるが、ここでは簡単のため無視した。

まとめて|その他の宇宙>と表すことにすると、状態の変化(3.4)式は次のように修正される。

$$|\psi\rangle \otimes |\text{測定器}\rangle \otimes |\text{その他の宇宙}\rangle$$

$$\xrightarrow{\text{測定}} \alpha \underbrace{|+\rangle \otimes |\text{測定値:+}\rangle \otimes |\text{その他の宇宙}\rangle}_{\text{並行宇宙}} + \beta \underbrace{|-\rangle \otimes |\text{測定値:-}\rangle \otimes |\text{その他の宇宙}\rangle}_{\text{並行宇宙}} \quad (3.5)$$

これは、量子力学的な測定によって、宇宙全体が測定値の異なる2つの宇宙(並行宇宙)に分岐し、それらの並行宇宙の重ね合わせの状態になることを意味する。分岐した並行宇宙はお互いに影響を及ぼし合うことなく、独立して存在する。

これらの並行宇宙はお互いどれだけ異なるだろうか? 分岐した直後の状態(3.5)は、測定器の値と電子の状態が異なるだけで、それら以外は全て同じだ。しかし、時間が経過するにつれて、そのわずかな違いはバタフライ効果によって指数関数的に大きな違いに発展していくだろう。そしてある程度時間が経過すれば、その違いは少なくとも地球規模に影響を及ぼすと考えられる(ただし測定(3.5)を地球で行ったとした)。

このような宇宙の分岐が量子論的な測定のたびに生じるとすると、この世界には異なる並行宇宙が無数に存在することになる。そのため(3.5)式は「多世界解釈」と呼ばれる(図2)。このような並行宇宙の生成はまったく直感に反するが、これが多世界解釈の帰結である。(他の並行宇宙は観測できないので、直感に反するのは当然である。)

最後に、次節で紹介する生命誕生の議論のために、宇宙の分岐について少し補足をする。まず一般に、並行宇宙の分岐は、電子のスピン測定に限らず、様々な量子状態とそれらの状態の測定によって生じる。その際、測定によりいくつの並行宇宙ができるのかは、測定後にとりうる状態の数によって決まる。例えばスピン3重状態(=スピンの値が0と $\pm\hbar$ の3状態の重ね合わせの状態)のスピンを測定すると、3つの並行宇宙ができる。

また、ここで言う「測定」とは必ずしも測定器を用いたものである必要はなく、量子状態が、何らかの相互作用を通じて、周囲に痕跡を残すような反応を起こせば良い。痕跡を観測する人間も必要ない。ただし、痕跡があまりに小さいと、分岐した宇宙が互いに影響を及ぼし合い、実質的に分岐は起こらないと見なせることもある。どの程度の痕跡があると分岐したと見なせるかは明確でなく難しい問題である。しかし、測定器の針が動くなど、人が目視できるほどの痕跡があれば、お互いの並行宇宙の影響はほぼ完全に無くなり、「分岐」と見なすには十分であろう。

3.2 多世界解釈による生命誕生

ここまで紹介してきた多世界解釈を用いると、地球上における生命の誕生確率がいかに低くても、生命が誕生したことを自然に説明できる。

この宇宙では量子力学的な「測定」に相当する物質間の相互作用が常に行われるため、宇宙の分岐も常に起こっていると考えられる。そのため並行宇宙の数は莫大なものとなる。この

ような分岐は46億年前に地球が誕生してからも起こるので、無数の並行宇宙ごとに地球が存在することになる。このとき、各々の並行宇宙の原始地球で形成されるRNA分子の配列がランダムであれば膨大な種類のRNA配列が得られる。すると生命誕生の確率がいかに低くても、それらのRNA配列の中には生体機能を持つものが存在するだろう。そのようなRNA分子が形成された並行宇宙の原始地球で生命が誕生するというのが、多世界解釈による生命誕生のシナリオである。こうして誕生した最初の生命は、その後、進化を重ね、長い年月を経て人類が生まれた。そのため我々人類は生命が存在する地球を観測できる⁶。(他の多くの並行宇宙の地球では生命が誕生しなかっただろうが、我々からは観測されない。)

ただし、このような多世界解釈による生命誕生のシナリオを正当化するためには、十分な数(少なくとも 10^{39} 以上)の並行宇宙が存在し、各並行宇宙における原始地球でのRNAの配列がランダムに形成される必要がある。RNAの配列がランダムに形成されるためには、単に測定によって宇宙が分岐するだけでなく、その分岐の影響が地球全体に及ばなければならない。さもなければ並行宇宙が増えても、地球でのRNAの配列は変化せず、全並行宇宙で得られるRNA配列の種類は増加しないだろう。そこで、地球上のRNA分子の配列に影響を与えようとは考えにくい、地球外での「測定」は無視し、地球上での「測定」による分岐の頻度のみを調べ、その頻度が生命誕生のシナリオに十分かを考える。

しかし、先に述べたようにどの程度の量子現象(測定)で、並行宇宙の分岐が起こるのかは明確でないため、分岐の頻度の評価は難しい。そこで、地球に飛来する宇宙線を用いて大雑把に下限値を見積もることとする。

宇宙線とは、宇宙空間を飛び交う高エネルギーの粒子のことである。そして、それらが地球の大気分子と衝突することで大量の粒子が生成される。その結果、ミューオンと呼ばれる素粒子が、手のひらほどの広さ(100cm^2)に、1秒あたり1個程度地上に飛来する。これは地球全体では、1秒あたり約 5×10^{16} 個のミューオンが地上に到達していることになる(図3)。

このような大気中における宇宙線の衝突は、量子力学的な散乱現象であり、ミューオン1個ごとに、少なくとも1回の「測定」に相当する相互作用が起こると考えることができる。実際、地上に飛来するミューオンは霧箱を使えば目視できるほどの痕跡を周囲に残すので、「測定」として十分であろう⁷。ただし、この「測定」の際、並行宇宙がいくつ分岐するのかを評価するのは難しい⁸。そこで、下限値として1回の「測定」(=「1個のミューオンの飛来」)につき1つの

⁶最初の生命が人類に進化する確率も低い可能性があるが、それも多世界解釈により同様に理解できる。なお、現在の宇宙や地球の状況を説明するために、人間の存在を根拠とするものを「人間原理」と呼ぶ。本稿で紹介した多世界解釈による生命誕生のシナリオも人間原理の一種といえる。

⁷ミューオンの飛来は、大気や海水の分子の運動に影響を与え、さらにそれらが時間経過と共にバタフライ効果で増幅していくので、その効果は地球上で形成されるRNA分子の配列を変化させるだろう。そのためこの「測定」による分岐でランダムな配列のRNA分子が得られると期待できる。

⁸粒子の散乱における並行宇宙の分岐の数を評価するのが難しいのは、ミューオンの飛来場所やエネルギーなどが連続的に変化するためである。このように測定量が連続的に変化する場合は、明確にいくつの分岐が生じるのかを決めることは困難である。(電子のスピンの場合は $\pm\hbar/2$ という2つの値しかとらなかったのが、(3.5)式のように、測定により並行宇宙が2つになると簡単に示せた。)

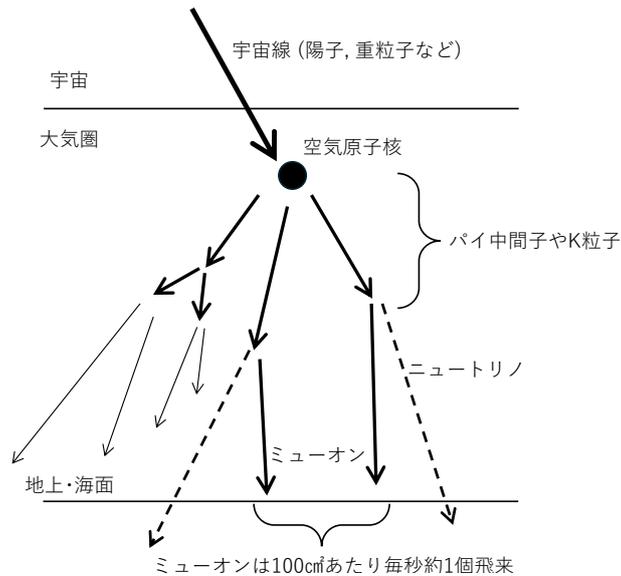


Figure 3: 宇宙線による粒子生成. 宇宙線と呼ばれる高エネルギーの粒子が地球の大気の大気分子と衝突することで、ミューオンなどの粒子が大量に生成される. このような宇宙線は絶え間なく地球に降り注いでおり、その結果、地球全体では1秒あたり約 5×10^{16} 個のミューオンが地上に飛来している.

分岐が起きると仮定すると、1秒あたり約 5×10^{16} 個の並行宇宙が生じることになる. 並行宇宙の分岐は、各並行宇宙で起こるので、並行宇宙の数が1秒あたりに 5×10^{16} 倍のペースで増加する. すると、たった3秒で並行宇宙の数は 10^{50} 倍増加し、戸谷が見積もった生命誕生に必要な恒星の数 10^{39} を優に超える. そのため得られた並行宇宙の数は、生命誕生を説明するのに十分であることがわかる. このように量子力学の多世界解釈は確率論的に絶望的と思われる生命誕生を、自然な帰結として導き出すのである.

4 量子コンピュータと生命誕生

ここまで、量子力学の多世界解釈に基づき、地球における生命誕生を議論してきた. 実はこの議論は、量子コンピュータにおける暗号解読のアイデアと類似している. 以下ではこの関係について紹介する.

まず生命誕生について、暗号解読の視点で振り返ってみる. 生命誕生の困難さの原因の1つは、RNAの組み合わせの多さに起因した. すなわちA, U, C, Gの4種類のヌクレオチドが特定の順序で40個程度以上結合しなければ生命として機能せず、これはあたかも4種類の文字(A, U, C, G)からなる40文字以上の暗号を解くようなものである. この暗号を解くために、文字列の組み合わせを総当たりで調べるとすると、 $4^{40} \approx 1.6 \times 10^{24}$ 通りもの組み合わせを試行する必要がある. そして、このような莫大な数の試行を宇宙全体で行うことで生命が誕生するためには、恒星が 10^{39} 個程度必要であると見積もられた(ただしこの見積もりでは多世界解釈は考慮されていない).

一方、量子力学の多世界解釈では、このような試行を並行宇宙で同時に行うことができる.

生命誕生時期の宇宙全体の量子状態を、地球におけるRNA分子の配列だけに注目して表すと

$$|\text{全宇宙の状態}\rangle = c_1 |AAA \cdots A\rangle + c_2 |AUG \cdots C\rangle + c_3 |AGC \cdots U\rangle + c_4 |ACU \cdots A\rangle + \cdots \quad (4.1)$$

という様々な状態の重ね合わせにより記述される。ここで c_i は $\sum_i |c_i|^2 = 1$ を満たす複素数である。また $|AUG \cdots C\rangle$ は $AUG \cdots C$ という配列のRNA分子が原始地球で形成された並行宇宙の状態を表している。(もちろん、1つの並行宇宙で複数種類のRNA分子が形成される可能性があるが、ここでは簡単のため1つの配列のみ記した。) 前節で説明したように、右辺は莫大な数となるので、(極端に長くない限り)ありとあらゆる配列のRNA分子があらわれ、その中には生命として機能するRNA分子の配列も存在することになる。これにより生命機能を持つRNA分子の配列という「暗号」が解かれたことになる。

さて、このような多世界解釈に基づくRNAの暗号解読で重要だったのは、この宇宙が膨大な数の並行宇宙の重ね合わせの状態(4.1)であると考えたことだった。実は、量子コンピュータによる暗号解読も、重ね合わせの状態が重要な役割を果たす。

例として0と1の2進法で表される N 桁(N ビット)の暗号について考える。この暗号は関数 f を用いて表されるとし、暗号の解 x_* は $f(x_*) = 1$ を満たし、それ以外の x は $f(x) = 0$ となるとする。(ここで、 x_* と x は N ビットの数を表す。)

この暗号を通常のコンピュータ(古典コンピュータ)で解くためには、 2^N 通りの N 桁の数($0 \cdots 000, 0 \cdots 001, \dots, 1 \cdots 111$)を一つずつ f に代入し、 $f(x) = 1$ となるものを探す必要がある。これは $N = 100$ のとき、 $2^{100} \approx 1 \times 10^{30}$ という膨大な数を試行することになる。そのため古典コンピュータでこの暗号を解くのは、現実的な時間内ではほぼ不可能である。

一方、量子コンピュータは量子ビットと呼ばれる量子力学的なビットが基本構成要素となる。そして、この量子ビットは $|0\rangle$ と $|1\rangle$ という2つの状態の重ね合わせを実現することができる。

$$1\text{量子ビット} : \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \quad (4.2)$$

ここで、 α と β は $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ を満たす複素数で、量子コンピュータはこの値を制御できる(図2)。さらに N 個の量子ビットを用いると、 2^N 通りの状態 ($|0 \cdots 000\rangle, |0 \cdots 001\rangle, \dots, |1 \cdots 111\rangle$) の重ね合わせの状態を操作することができる。

コンピュータ科学者のLov Groverはこのような重ね合わせの状態を用いて、高速に暗号を解く方法(Groverアルゴリズム[10])を考案した。彼は暗号を解くために次の状態を利用した。

$$\frac{1}{\sqrt{2^N}} \underbrace{(|0 \cdots 000\rangle + |0 \cdots 001\rangle + \cdots + |1 \cdots 111\rangle)}_{2^N \text{通りの数の状態}} \quad (4.3)$$

右辺は 2^N 個という膨大な数の状態の重ね合わせであり、その中には暗号の解 $|x_*\rangle$ が必ず存在する。そして量子コンピュータは、この重ね合わせの状態に対して演算 f をたった1回施すこと

で, 2^N 個の状態 $|0 \cdots 000\rangle, |0 \cdots 001\rangle, \dots, |1 \cdots 111\rangle$ に対する, $f(x)$ を一斉に評価することができる.

ただし, (詳しい説明は省略するが)このままでは暗号の解 $|x_*\rangle$ を特定することはできず, さらに f を $\sqrt{2^N}$ 回程度作用させることで, 解を増幅させる操作が必要である[10]. これにより, 量子コンピュータでは $\sqrt{2^N}$ 回程度の操作で暗号の解を得ることができる. 古典コンピュータでは解を得るために 2^N 回程度の操作が必要だったことを思い出すと, 量子コンピュータでは操作の回数が古典コンピュータの約 $1/\sqrt{2^N}$ で済むことになる. これは $N = 100$ では $\sqrt{2^{100}} \simeq 1 \times 10^{15}$ となり, 量子コンピュータの圧倒的な効率の違いを示している.

ここまで量子コンピュータによる暗号解読を見てきた. 量子コンピュータは暗号の解 $|x_*\rangle$ を含む, 2^N 個という膨大な数の重ね合わせの状態(4.3)を利用することで, 暗号を効率的に解くことができた. 興味深いことに, このアイデアは最初の生命誕生の説明とよく似ている. それは, 莫大な数の並行宇宙の重ね合わせの状態(4.1)があれば, その中には生体機能を持ったRNA配列が存在するという考えであった. 最先端の科学技術である量子コンピュータと, 遠い過去の生命誕生という一見無関係な現象が, 量子力学という共通の原理で結びつくというのは, 物理学の深遠さを示すものであるといえよう.

5 まとめと今後の展望

本稿では, 確率論的に絶望的に低いはずの生命誕生が, 量子力学の多世界解釈によって自然な現象として理解できることを紹介した. これは生命誕生という太古の歴史的事象が「必然的に起こった奇跡」であったことを示している.

また一見無関係に思われる量子コンピュータによる暗号解読と生命誕生が, 量子力学の「重ね合わせ」という共通の原理で結びついていることを紹介した. 暗号解読とRNA配列の探索は, 両者とも膨大な組み合わせの中から特定の解を見つけるという点が類似していた. 従来の統計的方法では到底不可能なこの問題が, 量子力学の重ね合わせの状態を利用することで解決される. これは, 量子力学が単なるミクروسケールの理論ではなく, 確率・統計の概念そのものを根本的に変えるものであることを示唆している.

ただし, 本稿で紹介した生命誕生の議論は多くの仮定の上に成り立っていることを強調しておく. 主なものは以下の通りである:

- RNAワールド仮説が妥当であること.
- RNA分子の形成過程がランダムであること (実際には化学的なバイアスが存在するかもしれない).
- 量子力学の多世界解釈が正しいこと (この問題は物理学において未解決).

これらの仮定の検証には、生物学、化学、地球惑星学、物理学といった多分野の融合的な研究が不可欠であろう。生命の起源という生物学における究極的な問題と、量子力学の解釈問題という物理学の深刻な問題が、密接に関わるといえるのはとても興味深い。

さて、多世界解釈による生命誕生のシナリオが正しい場合、地球以外の太陽系の惑星に生命が存在するだろうか？ 仮に生命誕生の確率が極めて低いとすると、その可能性は低いと考えられる。(無数の並行宇宙の中には、地球と火星など複数の惑星で生命が誕生したものもあるかもしれないが、我々の並行宇宙がそうである確率は、単純に考えると非常に低い。) しかし、地球以外の惑星で生命が誕生しなかったとしても、地球における巨大隕石の衝突などにより、宇宙空間に微生物や孢子などが放出され、それらが他の惑星に移動する可能性はある。また逆に、地球における最初の生命が宇宙空間からもたらされた可能性も否定できない。さらに他の惑星ではRNAを用いない全く異なる生命が誕生している可能性もある(環境にもよるだろうが、このような生命の誕生確率がRNAを用いたものより高ければ、地球外生命が存在するかもしれない)。これらの様々な可能性を追求する意味でも、太陽系の惑星や小惑星などの探査は重要であろう。

謝辞 静岡大学で量子コンピュータの集中講義を行った入江広隆氏に感謝する。本研究は科研費 (No. 20K03946) の支援を受けている。

References

- [1] C・ウィックラマシンジ F・ホイル. 『生命は宇宙から来た』 ダーウィン進化論は、ここが誤りだ. 光文社, 1983.
- [2] リチャード・ドーキンス. 盲目の時計職人. 早川書房, 2024.
- [3] Hugh Everett. "relative state" formulation of quantum mechanics. *Rev. Mod. Phys.*, 29:454–462, Jul 1957.
- [4] Walter Gilbert. Origin of life: The rna world. *Nature*, 319:618–618, 1986.
- [5] Tomonori Totani. Emergence of life in an inflationary universe. *Scientific Reports*, 10:1671, 2020.
- [6] 戸谷友則. 生命の起源と宇宙論/ダークエネルギーと人間原理/高速電波バースト. 31th ICEPP symposium 講演スライド, 2月 2025. <https://indico.global/event/10103/sessions/15662/>.
- [7] Edoardo Gianni, Samantha L. Y. Kwok, Christopher J. K. Wan, Kevin Goeij, Bryce E. Clifton, Enrico S. Colizzi, James Attwater, and Philipp Holliger. A small polymerase ribozyme that can synthesize itself and its complementary strand. *Science*, 0(0):eadt2760.
- [8] S・ワインバーグ. ワインバーグ量子力学講義 (上). 筑摩書房, 2021.
- [9] 和田純夫. 量子力学の解釈問題多世界解釈を中心として. SGCライブラリ161. サイエンス社, 2020.

- [10] Lov K. Grover. A fast quantum mechanical algorithm for database search. 5 1996.