

第116回アブダクション研究会開催のご案内

アブダクション研究会
代表・世話人 福永 征夫
TEL & FAX 0774-65-5382
E-mail: jrfd117@ybb.ne.jp

事務局 岩下 幸功
TEL & FAX 042-35-3810
E-mail: chaino@cf6.so-net.ne.jp

■ホームページ■
<http://abductionri.jimdo.com/>

第116回アブダクション研究会の開催について、下記の通りご案内を申し上げます。

(1) 第115回アブダクション研究会のご報告をします。

■2017年7月29日(土)に開催しました第115回アブダクション研究会は、『「量子力学で生命の謎を解く」/ジム・アル＝カリーリ&ジョンジョー・マクファデン著(2015・SBクリエイティブ) /を輪読研究して量子生物学の知見を学ぶ』という重要なテーマで、大河原敏男氏と世話人の福永征夫が下記のように分担し合って、20世紀における困難な離陸を果たして発展の道を模索する量子生物学という21世紀以降の広域学の最重要分野のパイオニアによって示された新たな知見の入り口を有意義に研鑽する機会を得ることができました。

◇呼吸、光合成、嗅覚、磁気感覚、酵素作用、遺伝、意識、生命の起源・・・
◇生命の秘密は、量子の世界に隠されていた!!

| | | |
|--------------------------------|----|--------|
| 第1章・・・はしがき | 担当 | 福永 征夫 |
| 第2章・・・生命とは何か? | 担当 | 大河原 敏男 |
| 第3章・・・生命のエンジン | 担当 | 大河原 敏男 |
| 第4章・・・量子のうなり | 担当 | 大河原 敏男 |
| 第5章・・・二モの家を探せ | 担当 | 大河原 敏男 |
| 第6章・・・チョウ、ショウジョウバエ、 量子のコマドリ | 担当 | 大河原 敏男 |
| 第7章・・・量子の遺伝学 | 担当 | 福永 征夫 |
| 第8章・・・心 | 担当 | 福永 征夫 |
| 第9章・・・生命の起源 | 担当 | 福永 征夫 |
| 第10章・・・量子生物学 ---嵐の縁の生命 | 担当 | 福永 征夫 |

《以上、敬称略》

■先ずは、ご多忙のなか労を惜しまずに積極的にご参加いただいた大河原敏男氏に感謝しお礼を申し上げます。

■1981年にMITで行われた「コンピュータの物理学」学会の基調講演で、ファインマンは次のように言っています。

「我々はずっと、量子力学の世界観を理解するのに大変な苦勞をしてきました。少なくとも、私は今でもそうです。・・・新しい考えというものに本質的な問題がないとわかるまでには、つねに1世代か2世代ほどの時間がかかることはご存じでしょう。

本質的な問題がないかどうか、私にははっきりしません。

本質的な問題を明確にできないので、本質的な問題はないのでしょうか。

ですが、本質的な問題がないとも言い切れません。

だからこそ私は考えてみたいのです。

コンピュータにまつわる問題、量子力学の世界観にまつわる謎なのかそうでないのかわからない問題を考えることで、私は何か得られるのでしょうか？

ともかく、古典的なコンピュータは量子系をシミュレートできるだろうか？

もし・・・インチキがなければ、答えは間違いなく『ノー！』です。

これは隠れた変数問題とよばれています。

私がやろうとしているのは、みなさんが量子力学の本当の答えをなるべく上手に咀嚼し、物理学者がこれまで説明に用いたのとは異なる視点をもてないかを調べることです。

私の主張は変わらず、コンピュータ・シミュレーションの本当の使い道は・・・量子力学的現象を説明するという難題に取り組むことなのです。・・・

古典的な理論としか調和しない分析は、どれも満足できません。

なぜなら自然は古典的ではないからです。」（以上は『宇宙は「もつれ」でできている』ニルイーザ・ギルダー著＝山田克哉監訳・窪田恭子訳（2016・講談社）から抜粋・引用させていただきました）。

■わたくし（世話人）は、第115回アブダクション研究会での研鑽を跳躍台にして、すぐさま、ジョンジョー・マクファデン著『量子進化』＝斎藤成也監訳／十河和代・十河誠治訳（2003・共立出版）の内容の研鑽と探究に集中して取り組みました。このかなり理論的な著述において、マクファデンは、量子力学の本質が一般に理解され、受け入れられるように、並々ならぬ熱意と情熱で説明の努力を積み重ねています。そしてその基盤に立って新たなアイデアとともに量子生物学の展開を試み提唱しようとしています。

■量子力学に対するコペンハーゲン解釈と呼ばれる1920年代の当初からの考え方は、その後も今日に至るまで、概念の論理的な整合性と納得性を目指してあらゆる努力と試みがなされてきていますが、マクファデンの『量子進化』の中にも、そのような努力の営みが色濃く見られます。

■わたくしの目から見ても、「粒子と波動の二重性」という量子力学の基本的な部分に自然の時間と空間の統一性への関わりの欠如を感じます。わたくしの目には次のように見えます。

(1) 単一の素粒子

不確定性原理によって、位置を絞ると運動量が不確定になり、運動量を絞ると位置が不確定になります。

前者を波動性、後者を粒子性と考えます。

前者は空間の情報、後者を時間の情報と考えます。

相補性の原理により、波動性と粒子性は交互に入れ替わっていると考えます。

空間の情報と時間の情報は、交互に接続されて、自然の時間と空間の統一性の基盤をなしていると考えます。

(2) 複数の素粒子

2つの素粒子の波動性の局面が相互作用すると、互いに引き込み合っ、XもYもという空間の情報をもたらすと考えます。

2つの素粒子の粒子性の局面が相互作用すると、互いに斥け合っ、XかYかという時間の情報をもたらすと考えます。

空間の情報と時間の情報は、相補性の原理によって、交互に接続されて、自然の時間と空間の統一性の基盤をなしていると考えます。

(3) 自然のコンピュータ（量子コンピュータ）

自然の量子計算のプロセスでは、ひとつ一つの素子（自然の部分域）は、松のとがった葉のように、2本の針葉からできているものと考えます。

一本は時間の情報（XかYか＝1か0か）で、前の松葉の、空間の情報の針葉と接合すると考えます。

もう一本は空間の情報（XもYも＝1も0も）で、次の松葉の、時間の情報の針葉と接合すると考えます。

量子力学で生命の謎を解く

【以下は、同書第1章はしがきの要約です】

【1】ヨーロッパコマドリの磁気受容の能力

動物界では渡りはふつうにおこなわれている。

動物がどのようにして遠い場所までの行き方を知ることができるかは、何百年ものあいだ謎だった。

だがいまでは、さまざまな方法を使っていることが分かっている。

日中は太陽を、夜は星を使うものもいるし、地上の目印を覚えているものもいるし、方角を嗅ぎ取ることができるものさえいる。

しかしなかでももっとも謎めいているのは、ヨーロッパコマドリが持っている、地磁気の方角と強さを感知できる知覚で、この能力は磁気受容と呼ばれている。

【2】どの方角へどれだけ遠くまで飛べばいいか

コマドリがどの方角へどれだけ遠くまで飛べばいいかを知るために使うメカニズムは、両親から受け継いだ DNA にコードされている。

精巧で並外れた能力であり、その「第六感」を使って進行方向を決める。

ほかの多くの鳥、さらには昆虫や海洋生物と同じように、地球の弱い磁場を感知し、生まれつき持っている方向感覚を使って方角の情報を導くことができるのだが、この鳥の場合、そのためにはまったく新しいタイプの化学コンパスが必要である。

【3】問題は地磁気がきわめて弱いこと

磁気受容は不可解な能力だ。

問題は地磁気がきわめて弱いこと。

地上では 30 から 70 マイクロテスラ、うまくバランスを取った摩擦の小さいコンパスの針を動かすには十分だが、冷蔵庫に貼るふつうの磁石に比べたらその磁力は 100 分の 1 ほどしかない。

そこからある難問が浮かび上がってくる。

動物が地磁気を感知するには、体内のどこかで起きる化学反応がそれに影響を受けなければならない。

何と言っても、人間を含めすべての生き物は、それによって外部の信号を感知しているのだから。

しかし、細胞のなかの分子と地磁気との相互作用によってもたらされるエネルギーの量は、化学結合を切ったり作ったりするのに必要なエネルギーの 10 億分の 1 にも満たない。

だとしたら、コマドリはどうやって磁場を感知できるのだろうか？

【4】1976 年にドイツ人鳥類学者・ヴィルチュコ夫妻の論文

1976 年、フランクフルトで活動するドイツ人鳥類学者の夫妻ヴォルフガング・ヴィルチュコとロスヴィサ・ヴィルチュコが、学術雑誌『サイエンス』に、コマドリは確かに地磁気を感知していることを疑いようもなく実証する画期的な論文を発表した。

さらに驚くことに、鳥の感覚のしくみはふつうのコンパスとは違っていた。

コンパスは磁北極と磁南極の違いを区別できるが、コマドリは磁極と赤道の違いしか見分けられないのだ。

【5】伏角コンパス

磁力線とは磁場の方向を示す目に見えない線で、コンパスの針は磁場のなかのどこに置いても磁力線と同じ方向を向く。

地球全体を巨大な棒磁石に見立て、南極から磁力線が出て外側に広がって、ループを描いて北極に入っていくとイメージしてほしい。

両極近くでの磁力線の方向は地面とほぼ垂直だが、赤道に近づくにつれて傾いてきて、地面とほぼ水平になる。

そのため、磁力線と地面が作る角度（伏角）を測るためのコンパス（伏角コンパス）を使うと、極の方角と赤道の方角は区別できるが、北半球と南半球で磁力線は同じ伏角を示すため、北極と南極を見分けることはできない。

【6】伏角の感知と量子力学

ヴィルチュコ夫妻の 1976 年の研究によって、コマドリの磁気感覚はちょうど伏角コンパスのように作用していることが明らかとなった。

問題は、その生物学的な伏角コンパスがどのようなしくみなのか、その手掛かりがまったくないことだった。

当時、動物の体内で地磁気の伏角を感知できることを説明するメカニズムなど、知られていないばかりか想像さえできなかった。

実はその答えは、量子力学という奇妙な科学と関係があったのだ。

量子力学とはいったい何だろうか？

ここでは、我々の生活の礎となっている見えない不気味な現実の実例を紹介しよう。

●見えない不気味な現実

【7】量子世界の奇妙な特徴

最初の例は、量子世界の奇妙な特徴の一つ、おそらくはもっとも決定的な特徴といえる、波動と粒子の二重性だ。

量子力学が誕生したのは20世紀前半、素粒子が波動のように振る舞い、光の波動が粒子のように振る舞うことが明らかとなったときだった。

二つ目の例は、さらに根本的な疑問と関係している。

太陽はなぜ輝いているのか？

太陽はいわば核融合炉であって、水素ガスを燃やして熱と光を放出し、地球上のすべての生命を養っている。

しかし、粒子が「壁をすり抜ける」という驚くべき量子の性質がなかったら、太陽は決して輝いていなかったはずだということを知っている人は少ない。

【8】太陽の核融合

太陽を含め、宇宙に存在するすべての恒星が大量のエネルギーを放出できるのは、陽子と呼ばれる正の電荷を帯びた粒子一個からなる水素原子の原子核が融合し、その結果として、その結果として、我々が太陽光と呼ぶ電磁気放射という形でエネルギーが放出されるからだ。

二個の水素原子核は互いにきわめて接近しないと融合できないが、どちらも正の電荷を持っていて同種の電荷は反発するため、近づけば近づくほど反発力が強くなる。

融合するのに十分なほど接近するには、一見したところ通り抜けられそうもないエネルギー障壁、いわば素粒子の世界のレンガ壁をくぐり抜けられなければならないのだ。

古典物理学によれば、そのようなことは起きるはずがないと予測される。

粒子は壁を通過できず、したがって太陽は輝かないはずなのだ。

【9】「波動と粒子の二重性」

しかし、量子力学の法則に従い原子核などの粒子は、「量子トンネル効果」と呼ばれるプロセスによって、こうした障壁をたやすくすり抜けることができるのだ。

根本的にそれを可能にしているのが、波動と粒子の二重性である。

波動は、海岸の小石などの物体を回り込んで伝わることができるだけでなく、隣の部屋のテレビの音が壁を通して聞こえてくるように、物体を通過して伝わることもできる。

【10】「重ね合わせ」

三つ目の例もいまの二つと関係があるが、量子世界のまた違うさらに不気味な特徴を物語っている。

粒子が同時に二通り、あるいは100通りや100万通りの振る舞いをすることができる「重ね合わせ」と呼ばれる現象だ。

この宇宙がきわめて複雑で興味深いものであるのは、この性質のおかげである。

宇宙を誕生させたビッグバンから間もない頃、空間にはたった一種類の原子しか存在して

いなかった。

正の電荷を帯びた陽子一個と負の電荷を帯びた電子一個からなる、もっとも単純な構造の原子である水素だ。

そこは恒星も惑星もなく、もちろん生命体も存在していなかった。

我々の身体を含め身の回りのすべてのものは、水素だけでなく、炭素や酸素や鉄といったもっと重い元素からできている。

幸いにもこれらの重元素は、水素で満たされた恒星のなかで作られた。

その出発原料である水素の一形態、重水素が存在するのは、ちょっとした量子のマジックのおかげなのだ。

【11】「量子トンネル効果」

それを作るレシピの第一段階は、二個の水素原子核すなわち陽子が量子トンネル効果によって十分に近づき、(融合によって) エネルギーの一部を放出して、それが地球を温める太陽光に変わるというプロセスだ。

そのとき、その二個の陽子は結合しなければならないが、それらのあいだに働く力は十分に強くないため、一筋縄ではいかない。

そして二個の陽子の複合体は存在できず、一方の陽子がベータ崩壊して中性子に変わることになる。

すると、残った陽子と新たに生成した中性子は結合して、重陽子と呼ばれる複合体(重水素と呼ばれる水素の重い同位体の原子核)を作ることができ、それがさらに核反応を起こして、水素よりも重いヘリウム(二個の陽子と一個または二個の中性子からなる)をはじめ、炭素や窒素や酸素などの元素に含まれる、さらに複雑な原子核を作り出すのだ。

【12】「量子スピン」

ここで重要な点として、重陽子が存在できるのは、量子重ね合わせによって二つの状態を同時に取ることができるからだ。

陽子と中性子の結合のしかたには、「スピン」の取り方によって区別される二通りの方法がある。

この「量子スピン」という概念は、実際にはテニスボールなど大きな物体の自転(スピン)とはまったく別物だ。

だが、ここでは粒子が自転しているという古典的な直感に則って考え、重陽子のなかで陽子と中性子の両方が、ゆったりとしたワルツと素早いジャイブをうまく組み合わせたダンスを踊りながらともに自転しているとイメージしてほしい。

1930年代後半、重陽子のなかでは、この二個の粒子は、この二つの状態のどちらか一方のダンスを踊っているのではなく、同時に両方の状態を取っていることが明らかとなった。ワルツとジャイブが同時に重なり合ったダンスを踊っており、そのおかげで互いに結合できているのだ。

したがって、もし粒子がジャイブとワルツを同時に踊ることができなかったとしたら、この宇宙はずっと水素ガスのスープのままで、恒星も輝かず、ほかの元素も作られず、この文章を読んでいるあなたも存在していなかった。

我々が存在しているのは、陽子と中性子が直感に反するこの量子的な振る舞いを取ることができるからなのだ。

●量子生物学

【13】遊離基の化学反応で電子はどのように移動するのか

1970年代前半にヴィルチュコ夫妻は、コマドリの磁気感覚が伏角コンパスと同じ働き方であることを明らかにした。

当時、生物的な伏角コンパスがどのような仕組みなのかまったく手掛かりがなく、これはとてつもなく不可解な事実だった。

しかし同じ頃、ドイツ人科学者のクラウス・シュテルンが、遊離基（フリーラジカル）が関与する化学反応で電子はどのように移動するのかという問題に興味を持った。

遊離基とは、一番外側の電子殻にひとりぼっちの電子を持っている分子のことだ。

それ以外の電子は原子軌道のなかでペアを作っている。

スピンの不気味な量子的性質を考えるとときには、この遊離基が重要となる。

ペアを組んだ電子はスピンを互いに反対方向へ向ける傾向があるため、全体のスピンは打ち消し合ってゼロになる。

しかし、遊離基のなかにあるひとりぼっちの電子にはスピンを打ち消す相棒がないため、全体としてスピンが残り、その遊離基は磁氣的性質を持つようになる。

そのスピンの方向が磁場の方向へ向くのだ。

【14】電子の「量子もつれ」状態

シュテルンは、「高速三十項反応」と呼ばれるプロセスで生成する遊離基の「ペア」が、それに対応して互いに「量子もつれ」状態にある電子を持つのではないかと提唱した。

互いに引き離された二個の電子が作るこのような壊れやすい量子状態は、のちに説明する難解な理由のせいで、外部磁場の方向にきわめて敏感である。

さらにシュテルンは、あの謎めいた鳥のコンパスにはこの種の量子もつれメカニズムが使われているのではないかとまで提唱した。

【15】「不気味な遠隔作用」

「量子もつれ」は、量子力学のなかでも、おそらくもっとも奇妙な性質だ。

いったん一緒になった粒子どうしは、互いにどれだけ遠くに引き離されても、魔法のように瞬時にコミュニケーションを取れるのだ。

たとえば、一度は接近していたがその後遠くに引き離され、宇宙の互いに反対側に持っていかれた粒子どうしも、少なくとも原理的にはずっと結びついている。

ここで一方の粒子にいわば何かちょっかいを出すと、遠く離れた相棒が瞬時に、びっくりして飛び上がる。

量子もつれは量子力学の開拓者たちが方程式から自然な形で導き出したものだが、その意味するところはあまりにも風変わりだったため、ブラックホールや時空の湾曲を導いたアインシュタインでさえ受け入れようとせず、「不気味な遠隔作用」と呼んでバカにした。

しかしその点ではアインシュタインは間違っており、いまでは実験によって、量子的粒子は確かに長距離の瞬間的な結びつきを持ちうるということが分かっている。

【16】フランス人物理学者アラン・アスペの実験

量子もつれという不気味な性質が通常の化学反応に関係しているという考え方は、1970年代前半には突飛なものともみなされていた。

しかしそれから何十年かのあいだに、数々の巧妙な実験によって、そうした不気味な結びつきが現実存在することが裏付けられた。

なかでももっとも有名なのが、1982年、アラン・アスペ率いるフランス人物理学者の研究チームがおこなった実験である。

アスペのチームは、互いにもつれ合った偏光状態にある光子（光の粒子）のペアを発生させた。

光の偏光に関して我々にもっとも馴染み深いのは、偏光サングラスだろう。一個一個の光子は、ある種の方向性、つまり偏光角を持っており、それは先ほどのスピンの性質に似ている。太陽光に含まれる光子はあらゆる偏光角を取りうるが、偏光サングラスはある特定の偏光角を持った光子だけを通過させる。アスペが発生させた光子のペアは、互いに偏光の向きが違ふ---ひとつは上向きで、もうひとつは下向きとしよう---だけでなく、互いにもつれ合っている。そして、先ほどのダンスを踊る陽子と中性子のように、このもつれ合ったペアのどちらの光子も、実際には上向きでも下向きでもなく、同時に両方の向きを向いている。ただし測定するまでは。

【17】測定という行為

測定という行為は、量子力学の持つ側面のなかでもとりわけ謎めいていて、間違いなく大いに議論の的となっている。それは、すでにあなたも気づいているはずのある疑問と関係している。なぜ、目に見える物体はけっして、量子的粒子が取りうる不気味で不思議な振る舞いを示さないのだろうか？ミクロな量子の世界で、粒子が同時に二つのことをし、壁をすり抜けたり、不気味なつながりを持ったりと奇妙な振る舞いをするのができるのは、誰にも見られていないときだけである。ひとたび観測されたり何らかの方法で測定されたりすると、その不気味さを失い、身の回りに見える古典的な物体と同じように振る舞うようになるのだ。すると、量子的振る舞いを古典的振る舞いに変える測定という行為は、いったいどんなところが特別なのだろうか？この疑問に対する答えが、きわめて重要である。測定は量子世界と古典世界の境界線上、いわば量子の縁ぎりぎりに位置していて、生命もその縁の上にいると私たちは主張しているのだ。

【18】もつれ合った光子のペアを測定

ここでは、量子測定の問題に対するもっとも単純な解釈を受け入れることにしよう。つまり、偏光状態などの量子的性質を科学装置で測定すると、その粒子は、同時にいろいろな方向を向くという量子的な能力を瞬時に忘れ、一つの方向だけを向くという従来の古典的な性質を取るしかなくなるのだ。アスペの実験では、もつれ合った光子ペアの一方の偏光状態を、偏光レンズを通過するかどうかによって測定したところ、その光子は相棒との不気味な結びつきを瞬時に失い、一つの偏光方向だけを取るようになった。そしてその相棒も、たとえどんなに離れていようが瞬時に同じ振る舞いを示したのだ。少なくとも量子力学の方程式から予想されるとおりの振る舞いで、もちろんアインシュタインが気に入らなかったまさにその現象である。アスペのチームはこの有名な実験を、実験室のなかで互いに何メートルも引き離れた光子のペアを使っておこなった。あまりに距離がありすぎるため、光の速さで影響が伝わったとしても、二個の光子のあいだで偏光角を調整しあうことはできない。そして相対論によれば、光より速く伝わるものなど存在しない。それでも、ペアをなすそれぞれの光子の測定結果には互いに相関があった。つまり、一方の偏光が上向きだと、もう一方は下向きだったのだ。

1982年以降この実験は何度も繰り返され、互いに数百キロの距離に引き離された粒子どうし、アインシュタインが受け入れられなかった不気味なもつれ状態の結びつきを持つことが分かっている。

【19】コンパスの作用に鳥の目が大きな役割

シュルテンが鳥のコンパスには量子もつれが関係していると提唱したのは、このアスぺの実験がおこなわれる数年前のことで、この現象に対してはまだ異論が多かった。

しかもシュルテンには、コマドリがどのようにしてこのような理解しがたい化学反応を使って地磁気を見ているのかは、見当も付かなかった。

「見る」という言葉を使ったのは、ヴィルチュコ夫妻がもう一つの奇妙な事柄を発見したからだ。

ヨーロッパコマドリは夜に渡りをするが、磁気コンパスを作動させるには少量の光（可視光の青色端の周辺）が必要であることが分かり、コンパスの作用に鳥の目が大きな役割を果たしていると推測された。

目はどのようにして、視覚だけでなく磁気感覚の一端も担っているのだろうか？

遊離基によるメカニズムを受け入れるかどうかと関係なしに、それもまったくの謎だった。

【20】クリプトクロムが動物の目で発見

鳥のコンパスが量子的なメカニズムを持っているというこの説は、20年以上顧みられることはなかった。

シュルテンはアメリカへ戻ったが、あの突飛な説を忘れることはけっしてなく、高速三重項反応に必要な遊離基のペアを生成しそうな生体分子（細胞が作る分子）の候補を提唱する論文を何度も書きつづけた。

しかしどれも完全には条件に合わなかった。

遊離基のペアを生成することができないか、または鳥の目には存在しないかのどちらかだった。

ところが1998年にシュルテンは、クリプトクロムという謎めいた光受容体が動物の目の中に発見されたことを知って、すぐにピンときた。

クリプトクロムは遊離基のペアを生成する能力を持つタンパク質であることが知られていたのだ。

2004年に「ネイチャー」で発表されたシュルテンとリッツの共著論文は、大勢の人の関心を惹き、鳥の量子コンパスはすぐに、量子生物学という新たな科学を象徴する存在となった。

●量子力学がありふれたものだとしたら、なぜ量子生物学に注目すべきなのか？

【21】生物学に量子現象が関係

量子トンネル効果も量子重ね合わせも、太陽の内部および、電子顕微鏡やMRIといった科学装置のなかで実際に起きている。

だとしたら、生物学に量子現象が関係してくることがなぜ驚きなのだろうか？

生物学は詰まるところ応用化学の一つで、化学は応用物理学の一つだ。

だから、我々もほかの生き物も含めすべての物体は、おおもとまでさかのぼれば単なる物理なのではないか？

多くの科学者は、深いレベルでは生物にも量子力学が関係しているはずだという考え方を受け入れながらも、その役割はわざわざ取り立てるほどのものではないと言い張っている。どうということかという、原子の振る舞いは量子力学の法則に支配されていて、生物には

突き詰めれば原子の相互作用が関係しているのだから、量子の世界の法則が生物の体内の微小スケールでも作用しているのは確かに間違いないが、それはその微小スケールだけの話であって、生命にとって重要な大きなスケールのプロセスにはほとんど、あるいはまったく影響をおよぼさないということだ。

【22】生体分子の素粒子の相互作用は量子力学に支配されている

もちろんそうした意見も、少なくともある程度は正しい。

DNA や酵素などの生体分子は陽子や電子といった素粒子からできていて、素粒子の相互作用は量子力学に支配されている。

あなたが歩き、話し、食べ、寝て、さらには考えるしくみも、究極としては電子や陽子などの素粒子を支配する量子力学的な力によって決まっているのだ。

しかしあなたはそれを知る必要はほとんどない。

根本的なレベルで見れば、この世界は馴染みのものとまったく異なる法則に従って動いているのだが、そのことを知らなくても、ほとんどの人は問題なく暮らしていける。

微小レベルで起きる不気味な量子現象は、我々が日々目にしたり使ったりしている車やトースターのような大きい物体には、ふつうは何の作用ももたらさないのだ。

【23】量子系は測定装置と相互作用すると不気味な量子的性質を失う

なぜだろうか？

フットボールが壁をすり抜けることもなければ、人間どうしが不気味な結びつきを持つこともないし（いんちきなテレパシーは別だが）、残念なことにあなたが同時にオフィスと自宅の両方にいることもできない。

それでも、フットボールや人体のなかに存在する素粒子はこうした芸当をすべてできる。我々が見ている世界と、物理学者が知っている、その水面下に実際に存在している世界とのあいだには、なぜこのような境界線、いわば断層が走っているのだろうか？

それは物理学全体のなかでももっとも深遠な問題の一つで、先ほど説明した量子測定の現象と関係している。

ある量子系が、アラン・アスペの実験で使われた偏光レンズなどの古典的な測定装置と相互作用すると、その量子系は不気味な量子的性質を失って、古典的な物体のように振る舞うようになる。

【24】ランダムな運動で量子の干渉性は打ち消し合い消えてしまう

その答えは、大きい（マクロな）物体のなかで粒子がどのように並び、どのように動いているかに関係している。

原子や分子は、生きていない固体のなかではランダムに散らばって不規則に振動していることが多い。

液体や気体のなかではさらに、熱のためにたえずランダムな運動をしている。

分散や振動や運動といったこれらのランダムな要因によって、粒子の不安定な量子的性質はあっという間に消えてしまう。

物体を構成するすべての量子的粒子の作用が組み合わさって、それぞれ互いが互いを「量子測定」する。

それによって、我々の身の周りの世界は正常に見えているのだ。

量子の不気味さを観察するには、普段と違う場所（太陽の内部など）に行くか、ミクロの世界を深くまでのぞき込む（電子顕微鏡などの装置を使って）か、または、量子的粒子を慎重に並べ、歩調を合わせて振る舞うよう仕向けるしかない（MRI 装置に入ってあなたの体内にある水素原子核のスピンを整列させるように。しかし磁石のスイッチが切られると、

原子核のスピン向きは再びランダムになり、量子の干渉性は打ち消し合って消えてしまう)。

このような分子のランダムな振る舞いのおかげで、我々はほとんどの場合、量子力学を知らなくてもやっていける。

周りに見える、生きていない物体のなかでは、ランダムな方向を向いて常に動き回っている分子によって、量子の不気味さはすべて消し去られてしまっているのだ。

【25】細胞の中は動き回っていて不気味な量子効果は消えてしまうと予想されていたシュルテンが発見したように、高速三重項反応の速度は、量子もつれという繊細な性質が関わっていると考えないと説明できなかった。

しかし高速三重項反応は、その言葉どおり速い反応だ。

しかもこの反応には二個の分子しか関与していない。

一方、これが鳥の渡りを可能にしているとしたら、コマドリの身体全体に長時間続く影響をおよぼすような反応でなければならない。

したがって、鳥の磁気コンパスは量子もつれ状態にあるという主張と、たった二個の粒子が関係する風変わりな化学反応に量子もつれが関係しているという主張とでは、まったくレベルの違う話だ。

かなりの疑念を招いたのも当然である。

細胞はほとんどが水と生体分子からできていて、それらはつねに激しく動き回っている状態にあると考えられていたため、瞬時に測定がおこなわれて不気味な量子効果は消えてしまうと予想されていた。

ここで「測定」というのはもちろん、我々が物体の重さや温度を測定して、その値を紙やコンピュータのハードディスク、または単に頭のなかに半永久的に記録するのと同じようなことを、水分子や生体分子がおこなっているという意味ではない。

ここで言っているのは、もつれ合った粒子のペアの一方に水分子がぶつかったときに何が起きるかだ。

水分子のその後の運動はぶつかった粒子の状態に影響を受けるので、その水分子ののちの運動を調べれば、ぶつかった粒子の性質の一部を導くことができるだろう。

その水分子の運動は、誰かが調べるかどうかとは関係なしに、もつれ合ったペアの状態を記録していることになるため、その意味でこの水分子は「測定」をおこなったといえる。

このような偶発的な測定でも、ふつうはもつれ状態を壊すのに十分である。

それゆえ、細胞の内部という温かく入り組んだ環境のなかで壊れやすい量子もつれ状態が存在しつづけられるという主張は、多くの人に突拍子もない考え方、ほとんど狂気の沙汰だと受け止められたのだった。

【26】最近、量子現象は多種多様な生命現象で見つかっている

ところが最近になって、このような現象に関する知見が大幅に広がり、鳥以外でも同様の現象が発見されるようになってきた。

重ね合わせやトンネル効果といった量子現象は、植物が太陽光を捕らえるしくみから、我々の細胞が生体分子を作るしくみまで、多種多様な生命現象で見つかっている。

我々の嗅覚や、両親から受け継いだ遺伝子でさえ、不気味な量子の世界に頼っているのかもしれない。

いまや量子生物学に関する論文が、世界有数の科学雑誌にたびたび掲載されている。

また、生命現象には量子力学の一面が重要な欠かせない役割を果たしていて、量子の世界と古典的世界の縁に位置するそうした不気味な量子的性質を維持する特異な存在が生命であると主張する科学者の数も、少ないながら徐々に増えている。

【27】生命とはいったい何だろうか？

そうした科学者が数えるほどしかいないことを身にしみて感じたのは、私たち著者二人が2012年9月、サリー大学で量子生物学に関する国際的な研究会を主催したときだった。この分野の研究者のほとんどに参加してもらったところ、全員が小さな講堂に収まってしまったのだ。

しかし、日常的な生命現象における量子力学の役割が次々に発見されるにつれ、この分野は急速に発展しつつある。

さらに、きわめて刺激的な研究テーマとして、暖かく湿っていて取り散らかった生物の体内でどのようにして量子の不気味さが存在しつづけているかという謎が、最近解き明かされようとしている。

その答えは、新たな量子テクノロジーの開発にも大きな影響を与えるかもしれない。

しかし、そうした発見の重要性を深く理解する前に、まずは一見したところ単純なある疑問について考えなければならない。

生命とはいったい何だろうか？

■この案内状の最後部には、『ジョンジョー・マクファデンに学ぶ量子力学と生命』と題するレポート資料を掲載しました。

●これは、ジョンジョー・マクファデン著『量子進化』＝斎藤成也監訳／十河和代・十河誠治訳（2003・共立出版）から、主要な部分を分節し、抜粋・引用した上で、その要約文を表記したものです。

■案内状の最後部のレポート資料を、粘り強く、繰り返しお読みいただいて、マクファデンが説く量子力学の本質と、パイオニアとしての量子生物学の展開の試みについて、広く深く研鑽する機会になさってください。

また、それらをこれからの研究活動とアブダクション研究会での探究に生かしていただくようお願いをいたします。

■その他の参考文献

1. ルイーザ・ギルダー著＝山田克哉監訳・窪田恭子訳『宇宙は「もつれ」でできている』（2016・講談社）

2. アミール・D・アクゼル著＝水谷淳訳『量子のからみあう宇宙』（2004・早川書房）
 3. セス・ロイド著＝水谷淳訳『宇宙をプログラムする宇宙』（2007・早川書房）
 4. ハンス・クリスチャン・フォン・バイヤー＝水谷淳訳『量子が変える情報の宇宙』（2006・日経BP社）
-

■ところで、話題が変わりますが、わたくしは最近、著しい高齢化と少子化の中で、高齢者と若年者が抱える、ある面の課題について、身じかに痛感する機会を経験いたしました。

■2015年7月の中旬に、会員の皆様に配信しました世話人のエッセイを、下記に再録しますので、ご高覧ください。

環境が人間の能力を発展させたり、錆びつかせたりする

◇わたくしには、現在の高齢化と環境問題の趨勢がピークアウトするとされている、2050年に向かって進んでいるこの時期に、どうしても方向づけておかなければいけないコンセプトがあるように思われます。

◇それは、①人との会話を不得手にし好まない若年者が増えていることに歯止めをすることと、②高齢者の概念を熟達者の概念に転換して、人は生活習慣を刷新すればいつまでも伸び続けるのだという社会の通念と確信を築くことです。

◇ある都内の公共施設の会議室をお借りして、アブダクション研究会を開催したのですが、講演者の説明資料を投射するプロジェクターが機能しないという失敗をしました。

◇以前のNEC会館では専門の人にやってもらっていましたし、学会の発表でもスタッフがやってくれますので、わたくし自身がプロジェクターの扱いを知らなくてもよかったです。

◇新しい会場ではその条件がなくなっていたのです。ピンチに遭遇して、わたくしは現場で方法の限りをつくしたのですが、かなわなかったのです。

◇その翌日から、調査を始めました。映らなかった機械A（品番を記録しておきました）、機械B（品番を記録しておきました）、ともにエプソン製でしたのでメーカーサイドに確かめました。

福永：プロジェクターのコネクターは、マイナスピン（メスピン）。PCのコネクターもマイナスピン（メスピン）。

両方をつなぐには、プラスピン（オスピン）とプラスピン（オスピン）を両端にもつケーブルが必要なのですが、機械Aにも機械Bにもついていないのは、どういうわけなのか。

会場の担当の方に重ねて聞いても、そのようなケーブルはありませんという返事だったので。

メーカーサイド：機械Aには付属品としてついていたはずですが。

機械Bではユーザーが用意する必要があります。

福永：機械Bには、PCのUSBから、プロジェクターのUSB端子に接続するコードがあったものですから、それに接続の機能があるものと推定して、いろいろやってみたのです。ところが、全く結果がでなかったのです。

メーカーサイド：機械BのUSB経路を利用するには、PC側にソフトのインストールが必要です。

◇われわれは、以上のようなボトルネックによって、失敗すべくして失敗したのだということが判明したのでした。

会場の施設側にも配慮の不足があったのですが、いまさら言っても、覆水は盆には返りません。

わたしに事前の知識なり取り扱いの経験さえあれば、近所の電気屋さんから、プラスピン（オスピン）とプラスピン（オスピン）を両端にもつケーブルを緊急調達することもできたし、USB経路を利用することもできたのです。

◇ところで、都内にある、次のアブダクション研究会の会場を事前にチェックしたところ、プロジェクターの借用料がかなり高額なのです。

より低額品の借用の交渉をしましたが、自己防衛も必要と考えて、携帯用の自前のプロジェクターをネットで購入しました。

そして、くだんのプラスピン（オスピン）とプラスピン（オスピン）を両端にもつ5mケーブルを手に入れるため、辺鄙な立地のA電気という量販店に雨の中をタクシーで往復しました。

◇この量販店のA電気に関連して、わたくしが見聞きしたことは、またもや驚きの経験でした。

スタッフの人は、物品の場所まで案内してくれるのですが、ほとんど会話の機会を与えようとしないかのような無口な接客様式なのです。

帰りのタクシーの運転者が物知りの人でしたので、聞きましたら、最近の若い人には、初めての人と丁寧な言葉でやりとりするのを好まない、もっと言えば、嫌がり、忌避する傾向が増えているので、

量販店のA電気は、それに合わせた接客様式をベースにしているようだという話をしてくれました。

◇わたしがネットで取得した携帯用プロジェクターを試して見たのですが、やはりパワーが不足していて、大きな会議室での利用には向かないことも、経験をして見て、やっと分かったことなのでした。

◇いかにして、[熟達者が新しいことを経験しながら社会生活をするように、自分を仕向けていくことができるのか。](#)

◇若年者が、他者とのコミュニケーションの習慣を充実させるように、いかにして、自分を仕向けていくことができるか。

◇必要は発明の母とはよく言ったもので、環境が人間の能力を固定化したり、発展もさせるのです。

わたくしには、2050年に向かって進んでいるこの時期に、熟達者と若年者の社会的な活性化策は、どうしても方向づけておかなければいけないことだと思われま

以 上

(2) アブダクション研究会は、次なる30周年に向けて、新たに有意義なスタートを切ってまいります。

今年は歩んできた道を踏みしめ、次なる30周年に向けて、新たなステージの夢と展望を描いて共有し、気持ちも新たに有意義なスタートを切ってまいりたいと存じています。

次なる30周年に向けた、新たなステージの夢と展望は、「どのような方向に広域学の確立をめざすのか」という点に求めて行きたいものと世話人は思案をしています。

すなわち、それは、次の二点に集約されます。

①「精神」のプロセス、「物質」のプロセス、および「生命」のプロセスを、共通的に認識し理解できるように、広域的な知識を発見し発明して高次の包括的な知識を創造する道への入り口をどのように切り拓くのかを探究し、発信できるようにすること。

②以上の探究と平行に、「持続可能性を確保する知識と行動」を探究し実践に移すことのできる条件を確保できるようにすること。

皆様はいかがお考えでしょうか。

わたくし宛にご意見とご感想をお寄せくださることを希望し期待しています。

(3) 次なる30周年に向けた、新たなステージのアブダクション研究会は、「過去を想起し、未来を想像し予期して、今ここに対処する」という、人間の認知、思考と行動、評価・感情のパターンに則って、テーマや活動の時間・空間の深さと拡がりを目指してまいります。

これは、世界や社会の歴史と未来への展望のはざままで、現前に対して、避けず、逃げず、ぶれずに、本質的で、現実的な、対処をして行かなければならないという、アブダクション研究会がめざす、取り組みの基本的な姿勢と態度でもあります。

また、狭義には、過去とは、アブダクション研究会の今までの記録でもあり、未来とは、次回研究会から来年度までの予定と計画でもあります。

常に、そうした活動の時間・空間の深さと拡がりの幅・厚みと奥行きを意識し合い、認識し合い、確認し合いながら、現前の活動を連綿として引き継いで、躍動するように、活動を積み上げてまいります。

(4) 各界、各分野の皆様の積極的なご参加をお願いします。

既存の領域的な知識をベースにして、新たな領域的な知識を探索し、それらを広域的な知識に組み換えて、より高次の領域的な知識を仮説形式的に創造することを目標に、アブダクション研究の飛躍を期してまいりますので、各界、各分野、各層の皆様の積極的なご参加をお願いします。

(5) アブダクション研究会は、現在、新規の会員を募集しています。

新規の会員として、年齢・性別を問わず、①環境の変化に対応して個人や集団の能力をどのように発展させるのか。②人・もの・生命の情報のネットワークはどのように組織化されるのか。③持続可能性を確保するための知識と行動とはどのようなものなのか。などのテーマの研鑽と探究に興味と関心を共有でき、隔月のアブダクション研究会に継続して出席できる方を募集しています。

皆様のご友人や知人、関係先の方で、われわれと志を共有できる方がおられましたら、世話人または事務局に積極的にご連絡くださいますようお願いいたします。

(6) アブダクション研究会は、知識の広域化と高次化を目指し進化を続けてまいります。

1996年に設立されたアブダクション研究会は、地球規模の難題に真正面から対処するために、知識の広域化と高次化を目指し、いつまでも、真摯に、勇気を持って、粘り強く、積極的に、可能性を追求し、多様な探究を積み重ねて、一步一步進化を続けてまいります。

(7) 発表をしてみたいテーマのご希望があれば、世話人宛に、積極的にお申し出下さい。

皆様には、今後、ぜひとも発表をしてみたいテーマのご希望があれば、世話人宛に積極的にお申し出をいただきたく、お願いを申し上げます。お申し出は、通年的にいつでも、お受け入れをいたします。上記の方向に沿うものなら、いかなる領域に属するいかなるテーマであっても、将来の可能性として、誠意を持って相談をさせていただき、実現に向けて調整を果たす所存であります。

記

◇ 日時： 2017年9月30日(土) 13:00~17:00(本会)

17:15~19:15 (懇親会)

◇ 場所: 3331 Arts Chiyoda 1階・101会議室

〒101-0021 東京都千代田区外神田6丁目11-14 (旧・練成中学校内)

TEL 03-6803-2441 (代表)

東京メトロ・銀座線 末広町下車④出口 徒歩10分 練成公園隣の旧・練成中学校内です。

*当日の連絡先 (福永征夫・携帯電話) 080-3515-9184



◇ テーマ: 解説発表

『ルース・G・ミリカンに学ぶ
「意味と目的の世界」(2007勁草書房)(仮題)』

伊藤 万利子 氏 (早稲田大学)

参考文献：当日までにできるだけ早くお知らせします。

■■会員の皆様には、知人や友人もお誘いいただいて、
積極的なコミットメントをお願いします■■

◇プログラム：

- | | |
|------------------------------|--------------------|
| (1) 解説発表[PART-1] | <u>13:00~14:20</u> |
| <小休止> | <u>14:20~14:30</u> |
| (2) 解説発表[PART-2] | <u>14:30~15:50</u> |
| <小休止> | <u>15:50~16:00</u> |
| (3) 総合的な質疑応答： | <u>16:00~16:30</u> |
| (4) 諸連絡： | <u>16:30~17:00</u> |
| (5) 懇親会：<皆様の積極的なご参加を期待しています> | <u>17:15~19:15</u> |

【第116回 アブダクション研究会の出欠連絡について】

- 9/25（月）までに、下欄の要領で、必ず、ご返信ください。
- なお、研究会会場では、飲み物のサービスがありませんので、
皆様が各自で、ペット・ボトルや水筒をご持参ください。

第116回 アブダクション研究会（9/30）の出欠連絡

●9/25（月）までに、必ず、ご返信ください。

●研究会、懇親会とも、必ず、下記により、ご連絡ください。

新会場のため、研究会、懇親会とも、より綿密な準備が必要なことを、何卒、ご理解ください。

FA X : 042-356-3810
E-mail : chaino@cf6.so-net.ne.jp 岩下 幸功 行

出席 出席
●9/30（土）の研究会に、未定ですが調整 します。●懇親会に、未定ですが調整 します。
欠席 欠席

ご署名 _____

■次々回 2017 年 11 月度の第 117 回アブダクション研究会は、

●2017 年 11 月 26 日（日）に、3331 アーツ千代田地階 105 室にて、開催いたしますので、皆様には今からご予約いただき、積極的にご参加ください。

会場確保の都合で、今回は、日曜日の開催になりますので、注意してご予約ください。

●テーマ : 『「数学の大統一に挑む」／エドワード・フレンケル著＝2015 文藝春秋／を輪読研究して壮大な数学プロジェクトの意義を学ぶ』

憧れのモスクワ大学の力学数学部の試験に全問正解したにもかかわらず
父親がユダヤ人であるために不合格。

それでも少年は諦めず、数学を学び続けた。

「ブレイド群」「リーマン面」「ガロア群」「カツ・ムーディー代数」「層」「圏」……、
まったく違ってみえる様々な数学の領域。

しかし、そこには不思議なつながりがあった。

やがて少年は数学者として、異なる数学の領域に架け橋をかける

「ラングラズ・プログラム」に参加。

それを量子物理学にまで拡張することに挑戦する

●至急に、輪読研究の発表者を募集します。

こす原因となる。不確定性原理と光のもつ波の特性は、じつは同じ基本的な存在性を二つおりに表現したものである。

不確定性原理によって受けることになる制限は、光子だけでなく、すべての粒子に適用される。

ここに述べたような実験は、電子、中性子、陽子や原子全体でもくり返され、それらはすべて同じ回折効果を示す。

【4】不確定性原理は、位置と運動量の測定を同時に行なうことを制限するだけでなく、他の相補的な特性の測定も制限する。

不確定性原理は、位置と運動量の測定を同時に行なうことを制限するだけでなく、他の相補的な特性の測定も制限する。

エネルギーと時間を同時に測定することも、同じように不確定性原理によって制限される。偏光の方向や、相補的な平面における電子あるいは陽子の回転の大きさ、すなわち角運動量の測定も、同様に制限される。

ハイゼンベルグの研究仲間であり指導者でもあったニールス・ボーアは、すべての測定は二つの関連する相補的な特性（位置と運動量など）に影響し、したがって、ある一つの特性を測定することは、もう一つの特性が不確定になる原因であることを発見した。これは、相補的原理とよばれるものである。

【5】ビリヤードの玉の位置の測定は、ビリヤードの玉の位置と運動量を同時に測定できないという、不確定性原理で論じている内容に一致するように見える。

よくいわれるように、ハイゼンベルグの不確定性原理は、物体の邪魔をせずに測定を行なうことができないために起こる。

側面が開いている箱の下に隠された、静止した、すなわち運動量ゼロのビリヤードの玉の位置を測定することを考えてみよう。

われわれの測定は、測定のための別のビリヤードの玉（エムボールと名づける）に箱を通過させて、エムボールが通過の際にどの方向に向きを変えたかを知ることによって成立するようなものだ。

入射するエムボールに対し、箱の未知の領域に向けて直線を引き、同じように、どこかの方向にそれて箱から現われたエムボールに対する直線を引けば、直線は衝突した点で交わる。

われわれはこのようにして、ビリヤードの玉の位置を測定してきたのだ。

しかし、エムボールが運ぶ運動量は、衝突の際に目的の玉に移る。

つまり、その運動量は移動してしまう。

ビリヤードの玉の運動量は、もはやゼロではないのである。

この結果は、ビリヤードの玉の位置と運動量を同時に測定できないという、不確定性原理で論じている内容に一致するように見える。

【6】光子はとても小さい運動量のかたまり、いわば量子を運ぶ。したがって、光子を測定に使用すれば、光子とあらゆる重たい物体との衝突があっても、その重たい物体はほん

のわずかししか乱されないと確信できる。一個の光子によるこの乱れのレベルは、あらゆる物体と測定装置とのあいだの相互作用の最小レベルを表わす。

エムボールの代わりにピンポン球を使うことができるとする。

ピンポン球はとても軽いので、移動する運動量はより少なくなり、標的であるビリヤードの玉が受ける影響はずっと少ない。

ピンポン球は、同じように正確な位置測定を可能にし、しかもターゲットの運動量への影響は無視できる。

だが、ピンポン球にこだわる必要はない。

たとえば、一個の原子や電子や光子のようなもっとずっと軽い物体を発射して、ターゲットによって生じる偏向を測定することができる。

これはもちろん、われわれが物体を見るときに行なっていることとまったく同じである。

光子はたいてい、われわれではなく太陽やランプから発射され、測定装置としてはたらくのは目である。

光子はとても小さい運動量のかたまり、いわば量子を運ぶ。

したがって、光子を測定に使用すれば、光子とあらゆる重たい物体との衝突があっても、その重たい物体はほんのわずかししか乱されないと確信できる。

乱される運動量の総量は、比較的簡単に見積もることができる。

なぜなら、光子の運動量はプランク方程式、つまり定数 h を光子の波長で割ったものによって与えられるからである。

一個の光子によるこの乱れのレベルは、あらゆる物体と測定装置とのあいだの相互作用の最小レベルを表わす。

不確定性原理にプランク定数が現われるのは偶然ではない。

すべての測定はエネルギーの交換を含まなくてはならないし、不確定性原理はそのような交換が発生したときの最小の乱れの可能性を定量化する。

【7】ビリヤードの玉にとって、光子との衝突によって分け与えられる少量の運動量の不確定性はごくわずかであり、われわれが検出できるよりもはるかに小さい。しかし、電子と衝突するあらゆる光子は、かなりの運動量の量子を電子に分け与えるだろう。一個の電子に対するあらゆる正確な位置測定は、その運動量と未来の軌跡を変えるだろう。

ビリヤードの玉にとって、光子との衝突によって分け与えられる少量の運動量の不確定性はごくわずかであり、われわれが検出できるよりもはるかに小さい。

しかし、電子（酵素作用に含まれるものなど）にとって、定数 h はとても重要である。

電子と衝突するあらゆる光子は、かなりの運動量の量子を電子に分け与えるだろう。

一個の電子に対するあらゆる正確な位置測定は、その運動量と未来の軌跡を変えるだろう。

もし、自由電子の位置を、たとえば原子の幅の精度まで測定したとすれば、測定によって与えられた運動量の不確定性によって、電子は次の瞬間に小さな町ほどの大きさのどこかに行ってしまうほどのスピードで瞬時に放り投げられてしまうであろう。

【8】量子力学のコペンハーゲン解釈においては、位置や運動量などの特性は、測定されたときにのみ実在のものとなる。

不確定性原理は避けられないものである。

不確定性原理の影響は、重たい物体に対しては無視できるが、その背後にはつねに少量の不確定性が生じているのである。

微小な粒子にとって、不確定性原理の効果はけっして無視できない。

しかし、ハイゼンベルクの不確定性原理は、単に系を邪魔することなしには測定できない、ということだけではない。

不確定性原理は、測定装置の限界を理解することよりも、実在性ということに対する見方にもっと根本的な方向転換を要求する。

標準的な量子力学の解釈では、測定できないものは存在しないということになる。

量子力学のコペンハーゲン解釈においては、位置や運動量などの特性は、測定されたときにのみ実在のものとなる。

【9】もし、位置を測定することを選べば、測定を行なった粒子の位置は実在の特性となるのに対し、運動量は不確定で実在しないままとなる。同様に、運動量を測定すれば、粒子の運動量は実在の特性となるが、位置についての実在は犠牲となる。

不確定性原理は、位置と運動量の不確定性の積の最小値を決めるものであり、どちらか単独の最小値は決めることができない。

あらゆる実験において、これら相補的な特性の一つを選択して高い精度で測定できる。

もし、位置を測定することを選べば、測定を行なった粒子の位置は実在の特性となるのに対し、運動量は不確定で実在しないままとなる。

同様に、運動量を測定すれば、粒子の運動量は実在の特性となるが、位置についての実在は犠牲となる。

量子力学において、測定はけっして無害ではない。

測定は、外部に存在する実在性を変更するのである。

測定は実在性をつくり、異なる測定は異なる実在性をつくることになる。

光と二つの穴

【10】光の二重スリットの実験では、いくつかの位置では、両光線からの光が足し合わされて明るい帯が生じるし、また他の場所では、それぞれの光がおたがいを打ち消し合って暗い帯が生じる。この明暗の帯のパターンは、干渉パターンとして知られる。

1センチメートルの幅のスリットをもつスクリーンを通る光線を考えてみよう。

スリットを通過する光子の運動量を測定することを選択するなら、光子の位置は不確定となり、量子力学の標準的な解釈によれば実在しないものとなる。

まず、左のスリットを覆って実験を行なう。

これは本質的に一つのスリットでの実験と同じ設定であり、散乱した（回折した）像が壁に見える（[右]と表す）。

同じく右のスリットを覆えば、同様に左に散乱した細い線が見える（[左]と表す）。

両方のスリットでは、おそらく二つの回折パターンを合わせた[右] + [左]というものが見られると予想される。

これは、ふつうの粒子（たとえば銃弾など）を発射してスリットを通過させたときに予想されるパターンである。

しかし、光をスクリーンに通したとき、予想されたような足し合わせパターンは見られず、その代わりに、壁には明暗の帯がくり返し現われるだろう。

この像はまちがいなく、二つの独立した光線を単純に足し合わせたものではない。

というのも、どちらか一方のスリットが開いているときに明るくなっていた壁の部分が暗くなり、暗かった領域が明るくなっているからである。

この明暗の帯のパターンは、干渉パターンとして知られる。

いくつかの位置では、両光線からの光が足し合わされて明るい帯が生じるし、また他の場所では、それぞれの光がおたがいを打ち消し合って暗い帯が生じる。

明暗の縞模様という特異的な性質を示すために、それを「右（+/-）左」と示すことにする。

（+/-）は、スリットが両方開いた場合（+）と、両方閉じた場合（-）の干渉パターンによる像の複雑な重ね合わせであることを示している。

【11】以上のことは、多少の差はあるが、19世紀初頭にトーマス・ヤングの行なった古典的な実験と事実上同じである。その実験は、光の波動理論が証明された決定的な実験のひとつであった。干渉とは、波のもつ特徴である。

以上のことは、多少の差はあるが、19世紀初頭にトーマス・ヤングの行なった古典的な実験と事実上同じである。

その実験は、光の波動理論が証明された決定的な実験のひとつであった。

干渉とは、波のもつ特徴である。

波は、空間を伝わるとともに広がり、同時に二つの場所（スクリーンの二重スリット）を通過することができる。

しかし、そこからこんどは再結合して干渉パターンをつくる。

干渉は古典的粒子の特徴ではない。

古典的粒子は空間上の場所が特定され、二つの別々の地点を通過して移動することはできない。

19世紀の物理学者に光の波動論を決定づけたのは、ヤングによる光の干渉効果の発見であった。

【12】それならば、どうすれば光の粒子である光子の存在と干渉効果を一致させられるのだろうか？

それならば、どうすれば光の粒子である光子の存在と干渉効果を一致させられるのだろうか？

もっとも単純な解釈は、光の波のような振る舞いは何百万個もの光子の運動を示していると結論づけることだろう。

この場合、一個の光子は、空間での実際の位置を占め、それぞれの光子の運動は波のような干渉パターンの証拠を示さないだろう。

光子に関する現実主義的位置の主張を証明するために行なわなければならないことは、いちどに一個の光子を使って二重スリットの実験をくり返すことだ。

【13】両方のスリットを開け、一個の光子をスクリーンに向けて発射すると、予想されるとおり、光子の到着点が写真乾板上に銀の点として記録される。さらに、たくさんの点がスクリーンに現われるまで一個ずつ光子を発射しつづける。一個一個の光子の到着を記録する点のパターンが写真乾板上に蓄積すると、得られる像は、強い光線によって見られるのとまったく同じ明暗の干渉パターンをつくる。散乱パターンは見られず、一個の光子が干渉効果を示す。

この考えを試すため、再び光の強度を、光源からいちどにたった一個の光子が放出される程度に弱め、それぞれの光子が写真乾板に検出されるようにする。

右側のスリットだけを開けて実験を行なった場合、点の集合は、右のスリットを通過して回折された強い光線によって照らされるのと同じ〔右〕領域に達する。

この光子の到着の分布を、散乱パターンとよぶことにする。

というのも、このパターンはあらゆる粒子（銃弾など）がせまいすきまを通ったときの散乱に対して生じることが予想される分布だからである。

同様に、左のスリットを開けると、左のスリットを粒子が通ったときに示される散乱パターンを表わす〔左〕で示される照射領域内に光子が到着する。

次に、両方のスリットを開けると、個々の光子は左か右かどちらかのスリットを通らなければならない。

右のスリットを通ることを選んだ光子にとっては、左のスリットが開いていようが閉じていようが、ちがいはない。

したがって、右のスリットを通る光子は、左のスリットが閉じていて、この道しか通れなかったときと同じ〔右〕領域内に到達すると予想される。

同様に、左のスリットを通過することを選んだ光子も〔左〕領域内に到達すると予想される。

乾板上の点によるパターンは、各単一スリットの実験での散乱パターンを単純に重ね合わせた（〔右〕 + 〔左〕）像を形成するだろう。

両方のスリットを開け、一個の光子をスクリーンに向けて発射すると、予想されるとおり、光子の到着点が写真乾板上に銀の点として記録される。

次に、もう一個光子を発射して、二個目の点を得る。

さらに、たくさんの点がスクリーンに現われるまで一個ずつ光子を発射しつづける。

それぞれの光子はスクリーン上の一つのスリットだけを通過しているのだろうか？

一個一個の光子の到着を記録する点のパターンが写真乾板上に蓄積すると、得られる像は、強い光線によって見られるのとまったく同じ明暗の〔右（+ / -）左〕干渉パターンをつくる。

散乱パターンは見られず、一個の光子が干渉効果を示す。

【14】われわれの目的は、位置が光子の実際の特性であることを示すことであった。

もし正しければ、光の粒子は空間におけるある一つの決まった軌跡を通り、二個のスリットのうちただ一方を通る経路を移動しなければならない。だが、一個の光子が両方を通して干渉パターンをつくるかのように見えるのだ。

われわれの目的は、位置が光子の実際の実験の特性であることを示すことであった。もし正しければ、光の粒子は空間におけるある一つの決まった軌跡を通り、二個のスリットのうちただ一方を通る経路を移動しなければならない。だが、一個の光子が両方を通して干渉パターンをつくるかのように見えるのだ。

光子は、波のようにいちどに両方のスリットを通らなければならない。

結論は明白である。

われわれの現実主義的位置の主張に反し、個々の光子はいつも空間における実際の位置を有しているわけではない。

量子力学の勝利である。

【15】この物質の波と粒子の二面性は、量子力学において量子の重ね合わせとして記述される。光子がスクリーンを通過するとき、その光子は、左のスリットを通る光子と右のスリットを通る光子の量子の重ね合わせとして存在するという。

物理学者のリチャード・ファインマンは、次のように考えた。

「二重スリットの実験は・・・それ自身の中に量子力学の核心をもっている。

実際のところ、この実験は唯一の謎を含んでいる・・・。

それがどう作用するか説明しようとするれば、量子力学の基本にある奇妙さを述べることになるだろう」。

二重スリットの実験で、光子は粒子として放出されるかもしれないし、粒子として検出されるかもしれないが、観測されていないときには波として空間を伝わるのである。

この物質の波と粒子の二面性は、量子力学において量子の重ね合わせとして記述される。光子がスクリーンを通過するとき、その光子は、左のスリットを通る光子と右のスリットを通る光子の量子の重ね合わせとして存在するという。

光子が右のスリットあるいは左のスリットを通るといふどちらの確率も、それ自体は完全に実在するものではない。

【16】量子の重ね合わせは、量子力学の基礎となる要素である。

量子の重ね合わせは、量子力学の基礎となる要素である。

量子の重ね合わせは、位置の状態の重ね合わせ（一個の粒子がいちどに二つの場所にいること）にも関係するが、それは同じように運動量の状態、エネルギーの状態、偏光角、回転角、あるいは量子系におけるあらゆる特性の重ね合わせを説明することができる。

【17】波と粒子の二面性、量子の重ね合わせ、そして不確定性原理は、実際には同じ根元的な量子力学的存在性をちがった方法で表現したものである。

波と粒子の二面性、量子の重ね合わせ、そして不確定性原理は、実際には同じ根元的な量子力学的実在性をちがった方法で表現したものである。

粒子の運動量を測定する場合、不確定性原理によって粒子の位置は空間を波のように広がる。

粒子の位置は、あらゆる可能な位置状態の量子の重ね合わせとして存在する。

同様に、粒子の位置を測定する場合には、不確定性原理に従って粒子の運動量は波の特性をもち、さまざまな運動量をもった状態の量子の重ね合わせとして存在する。

【18】古典的な二重スリットの実験と同じような実験が、粒子の形態をもつすべてのもの、すなわち陽子、中性子、原子、分子、イオンについて行なわれ、すべて干渉効果を示す。

古典的な二重スリットの実験と同じような実験が、粒子の形態をもつすべてのもの、すなわち陽子、中性子、原子、分子、イオンについて行なわれ、すべて干渉効果を示す。

すべてが同じように、波と粒子の二面性を示し、すべて状態の量子の重ね合わせとして存在する可能性がある。

【19】生体の酵素は細胞内の特定の経路にそって粒子を動かすことで仕事をするのが発見されている。乳酸デヒドロゲナーゼによって触媒される反応は、酵素タンパク質にあるヒスチジンと乳酸基質分子のあいだの経路にそって陽子が動かされることで始まる。実際には、陽子は量子の重ね合わせとして、両方の位置（ヒスチジンに捕捉されている位置および乳酸分子にくっついている位置）を占めていなければならない。

ここで量子力学に帰結する問題を再考しなければならない。

それならば、あらゆることはどのようにして起こるのだろうか？

物体を動かしているものはなんだろうか？

生体の酵素は細胞内の特定の経路にそって粒子を動かすことで仕事をするのが発見されている。

たとえば、乳酸デヒドロゲナーゼによって触媒される反応は、酵素タンパク質にあるヒスチジンと乳酸基質分子のあいだの経路にそって陽子が動かされることで始まる。

あらゆる瞬間において、陽子は基質に向かって動いているか、ヒスチジン上にとどまったままかのどちらかだ、と考えるかもしれない。

しかし、陽子はハイゼンベルクの不確定性原理に従う基本的な粒子であり、つねに位置状態の重ね合わせとして存在できる量子として記述されなければならない。

実際には、陽子は量子の重ね合わせとして、両方の位置（ヒスチジンに捕捉されている位置および乳酸分子にくっついている位置）を占めていなければならない。

同様に、DNA分子上のある位置から別の位置への陽子の運動（互変異性）によって始まるような変異を考えたとき、量子力学は、陽子は量子の重ね合わせとして、いちどに両方の位置に存在するということを教えてくれる。

【20】われわれが手や足を動かすときには、陽子がミオシンに結合した水分子からATPに跳躍して、筋肉収縮を始めなければならない。しかし、量子力学では、これと相補的な、跳躍しないという事象が量子の重ね合わせの一部として起こっていることになる。

だが、それならば、あらゆることはどのようにして起こるのだろうか？

われわれが手や足を動かすときには、陽子がミオシンに結合した水分子からATPに跳躍して、筋肉収縮を始めなければならない。

しかし、量子力学では、これと相補的な、跳躍しないという事象が量子の重ね合わせの一部として起こっていることになる。

これらの相補的事象はどうしたのだろうか？

プロサッカー選手がペナルティキックを蹴ろうと構えているところを想像してみよう。

彼の脚の筋肉は臨界状態に達しており、一回の量子的事象、つまり一個の陽子がミオシンからATPへ跳躍する、もしくは跳躍しないことによって、ゴールに対するボールの軌道を1ミリメートル変えることができる。

しかし、もし陽子が跳躍する・しないという量子の重ね合わせとして存在するならば、選手（と脚）も得点を挙げるかそうでないか、という量子の重ね合わせとして存在する。

変異を起こす量子的事象は、サッカーの得点よりも、歴史に大きな影響を与えたにちがいない。

原始的な細胞から脊椎動物やわれわれ人間までの生命の出現と発達には無数の変異が伴ったはずであり、それぞれの変異が起こったかどうかは量子事象が起こったかどうかにかかっている。

【21】量子力学は、それぞれの変異が、あるレベルでは量子の重ね合わせとして起こったのでもあり起こらなかったのでもあることを教えてくれる。

量子力学は、それぞれの変異が、あるレベルでは量子の重ね合わせとして起こったのでもあり起こらなかったのでもあることを教えてくれる。

スティーブン・ジェイ・グールドは著書『ワンダフル・ライフ』の中で、地球上の生命の進化の歴史は、偶然的な事象の積み重ねによるものであったと述べている。

生命の記録テープをもういちど再生してみれば、人類が登場しない可能性も含め、あらゆることがまったく異なる進化の歴史が展開されるかもしれない。

これら進化における偶然性の多くは、量子レベルの事象だったにちがいない。

もし、変異を起こす粒子が位置とエネルギーの状態の重ね合わせとして存在するならば、その変異を遺伝する動物は変異状態の重ね合わせとして存在しなければならない。

地球上の生命全体の歴史は、これまでに存在した可能性のあるすべての動物、植物、そして微生物の、大規模で複雑な重ね合わせになるだろう。

測定と存在

【22】われわれが見たり聞いたり感じたり味わったり嗅いだりする世界は、量子力学の規則に従っていない。量子力学は、物質の微視的な組成、すなわち電子、陽子、原子などに適用される。われわれが目にする実在の世界は大きく、膨大な数のこれらの粒子から成り立っている。

多くの実験による量子力学の証明にもかかわらず、量子跳躍や量子の重ね合わせ、相補性原理を含む理論には、明白で根本的な欠点が存在するように見える。われわれが見たり聞いたり感じたり味わったり嗅いだりする世界は、量子力学の規則に従っていない。

サッカーのゴールに得点が入った状態と同時に、得点が入っていない状態を見ることはけっしてない。変異が起きたと同時に、変異が起きていない動物を見ることはけっしてない。量子跳躍を見ることはないし、車やビリヤードの玉の位置と運動量の両方を測定することには何の問題もない。

なぜだろう？

この分裂の第一の、そしてもっとも明白な原因は、問題となる物体の大きさである。量子力学は、物質の微視的な組成、すなわち電子、陽子、原子などに適用される。われわれが目にする実在の世界は大きく、膨大な数のこれらの粒子から成り立っている。われわれが見慣れている運動、たとえば蹴られたサッカーボールの軌跡や川の流れなどは、何十億もの粒子の運動によって生じている。

【23】プランク定数ほどの小さなスケールでの量子化は、大きなかたまりの物体には不適切なものだが、生細胞内に含まれる粒子を含む基本的な粒子の挙動を説明するときにはきわめて重大なものとなる。

古典物理学は昔もいまも、大きな物体におけるたくさんの粒子のかたまりの振る舞いを記述し予想する点においては非常にうまくいっている。古典物理学の予想が、実験物理学者の観察と矛盾したときに初めて、微視的な世界を扱うために新しい道具を構築する必要が生じ、そして量子力学が創り出された。

古典論に最初に打ち込まれたくさびは、プランクによる運動の量子化 (\hbar を含む) であり、われわれはすでに大きな世界と小さな世界の一つの区切り、すなわち \hbar の相対的な重要性についてふれてきた。プランク定数ほどの小さなスケールでの量子化は、大きなかたまりの物体には不適切なものだが、生細胞内に含まれる粒子を含む基本的な粒子の挙動を説明するときにはきわめて重大なものとなる。

【24】われわれと量子の世界の相互作用はすべて、測定装置というある種の翻訳装置によって古典力学の言葉に翻訳される必要がある。

われわれの認識に対する感覚および情報伝達能力は古典的な法則に基づくものだ、とボーアは指摘した。

われわれは古典力学の現象によらずに、量子的事象を認識したり説明したりできないのだ。われわれと量子の世界の相互作用はすべて、ある種の翻訳装置によって古典力学の言葉に翻訳される必要がある。

測定装置は、量子的な事象を古典的な現象、すなわち計器の文字盤上の針の位置やガイガー計数器の検出音、われわれの身のまわりのあらゆる詳細なことなどに変換する翻訳装置なのだ。

【25】世界は目に見えない量子の領域と、われわれが認識する古典力学の法則に従うおなじみの領域とに分割される。

このように、世界は目に見えない量子の領域と、われわれが認識する古典力学の法則に従うおなじみの領域とに分割される。

その境界をまたいでいるのが、量子測定装置なのである。

量子の領域を調べる物理学者たちは、単純な写真乾板から、欧州原子核共同研究所(CERN)の27キロメートルもの長さの巨大なハドロン粒子加速器にいたるまで、さまざまな測定装置を利用する。

しかしながら、これらの道具すなわち測定装置の本質は、量子力学のもっとも得体の知れない面を残したままである。

私は、生細胞がもっとも原始的なレベルにおいて、自分自身の内部の状態を測定する量子測定装置だということを議論するつもりである。

したがって、生命を理解するためには、いかに量子測定装置が世界を实在のものにするかということを見つめていかなければならない。

量子測定と情報

【22】二重スリットの実験において、一個の光子は二つの経路を通過するよう見えるし、干渉パターンをつくる。たぶんまだ納得できないままだろうし、移動中の光子を捕まえて二つの経路を同時に通っているところを直接見てみたいと思うだろう。

二重スリットの実験において、われわれの当初の目的は、光子（あるいは電子や他の粒子）の位置と運動量を正確に測定することであった。

われわれは、両方の特性を同時に測定することが、不確定性原理によって制限されるということを見つけた。

そこで、志を低くして修正した目的は、位置と運動量という特性が、同時には測定できないけれども本当に光子が実在することを示すことだった。

これは、一個の粒子が二つのスリットのうちの一つを通るただ一つの経路を移動して、散乱パターンを形成することを示す試みに等しい。

しかし、一個の光子は二つの経路を通過するように見えるし、干渉パターンをつくる。

たぶんまだ納得できないままだろうし、移動中の光子を捕まえて二つの経路を同時に通っているところを直接見てみたいと思うだろう。

いまのところ、われわれは実験で用意された、ただひとつの測定装置である写真乾板しかもっていない。

しかし、写真乾板での測定は、スリットのあるスクリーン上の光子の位置測定とは異なる。なぜなら、どちらの経路を通った光子も、乾板上では同じ点に到達するからである。

【23】光子検出器を光源(懐中電灯やレーザーポインター)のすぐ下流に設置してみよう。この位置では、光子検出器は、光子がとりうる経路を区別することはできないが、検出器が検出した光が粒子であることを確かめることができる。しかし、ここでも、光は粒子として放出され、写真乾板上に粒子として到着するが、干渉パターンをつくることによって、途中では波のように存在するという証拠を示すのだ。

光子を途中で捕まえるためには、量子測定装置を追加しなければならないだろう。これに適した装置は、飛行中の光子の通過を検出して、その信号を可聴信号音に増幅することができる光子検出装置だろう。

通常どおり、まず強い可視光線から始めて、最初に光子検出器を光源(懐中電灯やレーザーポインター)のすぐ下流に設置してみよう。この位置では、光子検出器は、光子がとりうる経路を区別することはできないが、検出器が検出した光が粒子か波かということは調べることができる。

最初、光子検出器は、強い光が発射されると連続的な信号音を発する。しかし、光の強さを弱めて、写真乾板上にいちどに一個の黒点が生じる程度にすると、光子検出器は光子が検出されるたびに一回ずつ、単発の信号音を発する。この追加された量子測定装置はこのようにして、光源が光を粒子の流れとして放出していることを確かめるのに成功した。

しかし、この量子測定装置と写真乾板の粒子の測定にもかかわらず、写真乾板上に蓄積される黒点は以前と同じ、光の明暗の帯である[右(+/-)左]パターン、すなわち干渉パターンをつくるのである。

ここでは、光は粒子として放出され、写真乾板上に粒子として到着するが、干渉パターンをつくることによって、途中では波のように存在するという証拠を示すのだ。

【24】もう一对の光子検出器を購入し、各スリットのところに一つずつ置くことにしよう。しかし、実際に二つの検出器による実験をくり返すと、光子がスクリーンを通るときには一つの検出器しか鳴らない。各光子は片方のスリットだけを通過するように見え、けっして両方を通過してしない。写真乾板を調べてみると、干渉パターンは消えている。この光子は、光源でもスリットでも写真乾板でも、敏感な粒子として振る舞うのだ。

われわれは、実験設定のどこに粒子と波の振る舞いの遷移が発生しているのか、をきっちり発見する決心をした。

そこで、もう一对の光子検出器を購入し、各スリットのところに一つずつ置くことにしよう。

もし干渉パターンが示唆するように、各光子が同時に両方のスリットを通過するなら、スクリーンを光子が通過するたびに、両方の検出器がそろって、たぶんそれぞれ半分の音量で音を発すると予想される。

しかし、実際に二つの検出器による実験をくり返すと、光子がスクリーンを通るときには一つの検出器しか鳴らない。

左側の検出器は約半数の光子に対して音を出し、右側の検出器はその残りの光子に対して音を出す。

各光子は片方のスリットだけを通過するように見え、けっして両方を通過してしない。スリットを通過する光子は結局のところ、波ではなくやはり粒子なのだろうか？

しかし、ちょっと待ってほしい。

写真乾板を調べてみると、干渉パターンは消えている。

明暗の帯の複雑な [右 (+/-) 左] パターンの代わりに、集まった点は、単純な二つの散乱パターンの足し合わせ ([右] + [左]) をつくっている。

干渉パターンがなければ、もはや光の量子的な特性を提案する必要は何もない。

この光子は、光源でもスリットでも写真乾板でも、敏感な粒子として振る舞うのだ。

光子の波動性はどうなってしまったのだろうか？

【25】追加した二つの検出器を取り除き、もともとの検出器を右側のスリットの上に来るように置くことによって試すと、干渉効果は現われない。一個の検出器でも十分に光の波動性を壊すことができるが、それは光子の経路を区別できるときだけのようである。

まず、追加した測定装置がスリットを通る光の波を邪魔し、干渉パターンを壊したのだという考え方があるのかもしれない。

この仮説は、追加した二つの検出器を取り除き、もともとの検出器を右側のスリットの上に来るように置くことによって試すことができる。

以前の実験からわれわれは、一個の検出器を光源の下流に置けば、干渉パターンを乱さないことを知っている。

しかし、その位置からは、光子が右と左のどちらの経路を通ったかを区別することはできなかった。

新しい位置では、この検出器は光子の経路を区別でき、しかも干渉パターンを完全に残すかもしれない。

しかし、実験をくり返すと、点は（先ほどと同じように）二つの散乱パターンの足し合わせのパターン ([右] + [左]) 内に集まり、干渉効果は現われない。

一個の検出器でも十分に光の波動性を壊すことができるが、それは光子の経路を区別できるときだけのようである。

【26】 検出器が光子の経路を見ることができない位置にあるとき、位置状態に関する量子の重ね合わせ、つまり光子の波動性は存続する。しかし、もし同じ検出器が経路を区別される位置にあれば、波動性は崩れ、粒子性つまり光子が得られる。この点において、実験系は光子の位置についての量子測定を行なっている、といえる。量子測定は量子の重ね合わせを壊し、干渉パターンを破壊する。

光の波動性は、測定そのものというよりも、どちらの経路？という情報を抽出する測定に対してのみ敏感なようだ。

検出器が光子の経路を見ることができない位置にあるとき、位置状態に関する量子の重ね合わせ、つまり光子の波動性は存続する。

しかし、もし同じ検出器が経路を区別される位置にあれば、波動性は崩れ、粒子性つまり光子が得られる。

この点において、実験系は光子の位置についての量子測定を行なっている、といえる。量子測定は量子の重ね合わせを壊し、干渉パターンを破壊する。

標準的な量子力学においては、量子の重ね合わせの [右 (+/-) 左] パターンが収縮して、次のいずれかの単純な状態になるという。

すなわち、光子が右のスリットを通過する [右] 状態、もしくは光子が左のスリットを通過する [左] 状態である。

測定によって、各光子は左と右のどちらのスリットを通過するかを選ばなければならない。

つまり、[右 (+/-) 左] パターン + 量子測定 → [右] または [左]、となる。

この量子測定における情報抽出という特徴は、生細胞の活動を量子測定装置として調べる際にきわめて重要になるだろう。

量子測定の非局所性

【27】 カエルの物理学者に、壁の前のある位置（それは両方のスリットが開いているときに、干渉によって暗い帯のできる部分の中の位置である）に座ってもらう。この位置は、両方のスリットが開いているときには、干渉による暗い帯の部分の中であるが、どちらか片方のスリットが開いているときには明るい領域になる。右のスリットのみを開けると、カエルは右からぴかっと光（光子）が出てくるごとにそれを報告する。右のスリットを閉じて左のスリットを開けると、カエルは左から光が出てくることを正確に報告する。両方のスリットを開けると、カエルのいる地点は真っ暗になってしまい、どちらのスリットからも光が出てこないと報告する。

量子測定のもうひとつの半直観的な面、つまりそれが非局所的であるということは、写真乾板の位置に観測者を置けば明らかになる。

われわれの目は一個の光子の到着を見ることができないので、信用に足り意識のあるカエルの物理学者（カエルの目は敏感で一個一個の光子を検出できる）の助けを借りて、光子の観察を記録することにしよう。

このカエルの物理学者に、壁の前のある位置（それは両方のスリットが開いているときに、干渉によって暗い帯のできる部分の中の位置である）に座ってもらう。

この位置は、両方のスリットが開いているときには、干渉による暗い帯の部分の中であるが、どちらか片方のスリットが開いているときには明るい領域になる。

最初に右のスリットのみを開けると、カエルは右からぴかっと光（光子）が出てくることにそれを報告する。

次に、右のスリットを閉じて左のスリットを開けると、カエルは左から光が出てくることを正確に報告する。

最後に両方のスリットを開けると、カエルのいる地点は真っ暗になってしまい、どちらのスリットからも光が出てこないと報告する。

【28】両方のスリットを開き（干渉パターンは元のままである）、次に光子検出器を右側のスリットのところに置く。この測定は、光の波動性を破壊し、光子に右か左かのどちらかのスリットを選ばせる。検出器が止まっているとき（干渉パターンができていないとき）、カエルにはどちらのスリットからの光も見えない。しかし、検出器をオンにすると、両方のスリットから光が見える。

スクリーンに背を向けているカエルは、干渉パターンには気づかない。カエルが見るのは、一方あるいはもう一方のスリットから出てくる光だけだ。

それゆえカエルは、少し前には左のスリットから光が出てきていたのに、両方のスリットが開けられると光が見えなくなったので、とても混乱する。

「何が起きているんだ？」カエルは声高に叫ぶ。カエルには、これは光の量子力学的特性と完全に一致することだと言っておいてひとまず安心させるが、もっと悪いことがそのうち起こることも警告しておく。

両方のスリットを開き（干渉パターンは元のままである）、次に光子検出器を右側のスリットのところに置く。

光子検出器は量子測定を行なうので、[右(+/-)左]パターン+量子測定 → [右]または[左]、となる。

この測定は、光の波動性を破壊し、光子に右か左かのどちらかのスリットを選ばせる。

干渉パターンは消滅し、再び単純な [右] + [左] の散乱パターンが現われる。

カエルのいる地点は、片方のスリットが開いていたときには明るかったのだから、干渉効果のない状態でのこの地点は、両方のスリットが開いていても明るくなるだろう。

したがって、カエルは光が見えることを報告するが、今回それは両方のスリットから来ている。

カエルはまた、[右] 地点に置かれた測定装置が、検出器の置かれた [右] 地点だけでなく、検出器から離れた [左] 地点からも光を出させることができるのがわからない、と言う。

疑い深いカエルはトリックがあるのではないかと思い、[右] 地点にある検出器のスイッチをオンにしたりオフにしたりしてくれ、と言う。

検出器が止まっているとき（干渉パターンができていないとき）、カエルにはどちらのスリットからの光も見えない。

しかし、検出器をオンにすると、両方のスリットから光が見える。

光子が左側のスリットを通過するときには、それは明らかに右のスリットは通らない。右のスリットのところにある検出器には、このような事象を検出できるわけがない、のである。

だが、カエルがもっとも困惑したのは、右側の検出器が動いていて何も記録していないときに、カエルは左のスリットからのみ光子が出てくるのを見る。

そして、検出器が止まっていてやはり何も記録していないときには、左のスリットからは光が出てこない。

右側のスリットに動作中の検出器がただ存在しているというだけで、何も記録していないにもかかわらず、光が左のスリットから現われるのである！

【29】 困り果てたカエルは、何か秘密のやりとりがあったのではないかと疑っている。たぶん、右のスリットは左のスリットに、検出器が動いているかいないかという情報を送っているのだろう。

困り果てたカエルは、何か秘密のやりとりがあったのではないかと疑っている。

たぶん、右のスリットは左のスリットに、検出器が動いているかいないかという情報を送っているのだろう。

そうすれば、左側のスリットはそれに従って、光透過特性を調整することができるだろう。

カエルは、この予想される伝達経路の裏をかくような、きわめてうまい方法を考え出した。

一般相対性理論の基本原則では、信号は光速よりも速く伝わることはできない。

実際には、一般相対性理論は光よりも速い信号を禁じているわけではないが、このような信号は時間を逆戻りして伝わらなければならないことが示されている。

時間を遡る信号は、因果律を破壊する。
なぜなら、未来が過去に影響しうるからである。
物理学者のあいだでの優勢な見解は、光よりも速い信号が排除されるというものだ。

【30】賢いカエルはわれわれに指示して、両スリットの間隔をととても広くし、また検出器のスイッチのオン・オフをととてもすばやくして、たとえ光速で伝わる信号を使っても、一個の光子が飛んでいるあいだに右の検出器が動いているかどうかを左のスリットに教えられないようにする。カエルはこうした厳密な条件下で実験をくり返すが、同じ結果しか得られない。カエル（そしておそらく読者）が経験したこの当惑は、アインシュタインの疑問と同じである。アインシュタインは、量子測定の本局的であるという特徴を、「離れたところの幽霊のような作用」と説明した。

賢いカエルはわれわれに指示して、スクリーンとスリットと検出器の配置を変えさせ、両スリットの間隔をととても広くし、また検出器のスイッチのオン・オフをととてもすばやくして、たとえ光速で伝わる信号を使っても、一個の光子が飛んでいるあいだに右の検出器が動いているかどうかを左のスリットに教えられないようにする。

カエルはこうした厳密な条件下で実験をくり返すが、なんということだろう。
同じ結果しか得られない。
カエルは、遠く離れた右側のスリットに置かれた検出器が動いているときにのみ、左のスリットから出てくる光を見るのである。
右側のスリットに動作中の検出器が存在することは、左のスリットの特性に瞬間的な、少なくとも光よりは速い変化をひき起こすのである。
たとえ何も検出していなくとも。

カエルは実験の設計にさらに巧みな変更を加えようとする。
カエルは、光子検出器を右のスリットの下流（写真乾板とスリットのあいだ）に置くように指示する。
ただし、検出器はスリットの直後のスリップストリーム（後方に発生する流れ）の中に配置して、右のスリットを通過する光子をなおも明確に検出できるようにする。

さて、このような検出器は、光子がどちらかのスリットを通過したあとにのみ光子を検出するように配置されたのだから、もはや光子が左のスリットを通過することには影響を及ぼせないのではないだろうか？

だが、検出器はなおも影響するのだ。
結果は、検出器をスリットの直前に置いたときとまったく同じである。
カエルは、検出器が動いているときにのみ左のスリットから出てくる光を見る。
しかし今回の検出器は、すでにスリットを通った光子しか検出できない。
測定装置の状態（動いているかどうか）は、すでに起こった事象に影響を与えられるように見える。

カエル（そしておそらく読者）が経験したこの当惑は、アインシュタインの疑問と同じである。

アインシュタインは、量子測定の本局的であるという特徴を、「離れたところの幽霊のような作用」と説明した。

しかし、この「幽霊のような作用」は明らかに実在性のひとつの要素である。

何もしないこと（「ゼロ測定」）

【31】本局的であることよりも、おそらくもっと奇妙な量子測定の特徴は、測定で何も記録されなくても実験系の挙動に影響を及ぼしうることだ。二重スリットの実験では、たとえ何も測定しなくても、右のスリットに検出器を置くことによって、カエルが左のスリットに見たものに影響を及ぼした。

本局的であることよりも、おそらくもっと奇妙な量子測定の特徴は、測定で何も記録されなくても実験系の挙動に影響を及ぼしうることだ。

二重スリットの実験では、たとえ何も測定しなくても、右のスリットに検出器を置くことによって、カエルが左のスリットに見たものに影響を及ぼした。

物理学者は、この現象を「ゼロ測定」（null measurement）とよんでいる。

右のスリットの検出器は何も測定しなかったが、そのゼロ測定は、超高速の速さ（光速より速いスピード）で左のスリットに影響を及ぼすことのできる量子測定だったのだ。

【32】二重スリットの実験で光子が光源から放出されたとき、その光子を量子波動関数 Ψ [光子]として記述する。光子が検出されずにスクリーンを通ったときには、その波動関数は両方の位置状態の重ね合わせとして両方のスリットを通過する。しかし、右のスリットのところに置かれた光子検出器は、量子測定を行なって波動関数を収縮させ、位置状態の重ね合わせを壊してしまうだろう。

これらの特異性を理解する助けとして、量子波動関数の概念を利用することにしよう。

波動関数はギリシャ文字の Ψ （プサイ）で表わされる。

この波動関数は、実際にはとても複雑な数学的対象なのだが、ここでは単に量子の世界を説明するのを助ける一種の記号として使うことにしよう。

二重スリットの実験で光子が光源から放出されたとき、その光子を量子波動関数 Ψ [光子]として記述する。

光子が検出されずにスクリーンを通ったときには、その波動関数は両方の位置状態の重ね合わせ、すなわち、 Ψ [{右のスリットの光子} (+/-) {左のスリットの光子}] として両方のスリットを通過する。

波動関数は、古典力学における波の多くの特性をもっており、波と同様に二カ所あるいはそれ以上の地点を同時に通過することができる。

しかし、右のスリットのところに置かれた光子検出器は、量子測定を行なって波動関数を収縮させ、位置状態の重ね合わせを壊してしまうだろう。

すなわち、 Ψ [{右のスリットの光子} (+/-) {左のスリットの光子}] + 量子測定 \rightarrow Ψ [{ [右] 地点の検出器で検出される右のスリットの光子}] あるいは Ψ [{ [右] 地点の検出器で検出されない左のスリットの光子}]、となる。

この装置によって測定される二者択一の状態（ビーッと鳴って光子の通過を記録するか、鳴らずに光子が存在しないことを記録する）は、測定装置の固有状態（eigenstate）とよばれる（eigenstateはドイツ語で「自身の状態」という意味である）。

測定は、量子系に対し測定装置のとりうる固有状態のどれかを選択させる。測定のもの、量子系と測定装置は、これらの固有状態のどれか一つの中になければならない。

【33】 右のスリットで行なわれる測定は、あらゆるところ（あらゆる可能な位置）にある光子の波動関数を瞬時に収縮させる。つまり、波動関数は測定装置に出会うと、占めているすべての空間において収縮する（離れた場所での幽霊のような作用）。

検出器が、右と左のどちらのスリットのところに置かれているかは問題ではないことが明らかである。

なぜなら、測定装置に出合って両スリットを通るのは、波動関数 Ψ だからだ。

測定のもの、波動関数は収縮し、その結果、光子はどちらかのスリットで見いだされるだろう。

右のスリットで行なわれる測定は、あらゆるところ（あらゆる可能な位置）にある光子の波動関数を瞬時に収縮させる。

これは、右と左のスリットのあいだにある、謎めいた伝達の源である。

つまり、波動関数は測定装置に出会うと、占めているすべての空間において収縮する（離れた場所での幽霊のような作用）。

光子は測定のあいだは実在の粒子として存在する、という考えに固執するならば、「ゼロ測定」はただ逆説的でしかない。

だが、もし測定状態に介入する非局所的な波動関数の存在を受け入れるならば、パラドックスはなくなるだろう。

「ゼロ測定」は、測定装置がとりうる二つの固有状態のうちの一つにすぎないのだ。

原因のない世界

【34】 測定による量子波動関数の収縮のあとに、どちらのスリットから光子が検出されるかを決定するものは何だろうか？それはまったくランダムなのだ。このことは、この実験系（そして他の量子系すべて）において、生じうる二者択一の事象を分けるような原因は存在しない、という明白な結論をもたらす。量子的事象は、ただ起こるだけだ。このことは、古典科学の土台である因果律、すなわち原因と結果の原則との根本的な断絶を表わしている。

量子測定装置が波動関数から情報をもらったあとには、光子は左か右のどちらかのスリットで検出されるだろう。

もし二重スリットの実験が対称に設定されていれば、光子の半分は左のスリットで検出され、残りは右のスリットを通るだろう。

しかし、一個の光子しかない場合はどうだろうか？

その場合の光子は50パーセントの確率で左側のスリットから検出され、50パーセントの確率で右側のスリットから検出されるだろう。

ここで、光子はなぜ右ではなく左のスリットを通ったのだろうか、という疑問が生じるかもしれない。

古典物理学では、光子の奇跡はそれをもたらす原因をもつ。

だが、基本粒子のレベルでの事象は原因を持たない、というのが量子力学における基本教義である。

測定による量子波動関数の収縮のあとに、どちらのスリットから光子が検出されるかを決定するものは何だろうか？

それはまったくランダムなのだ。

量子力学では原則として、どんなに注意深く条件を制御したとしても、どちらのスリットを光子が通るか予想できるように二重スリットの実験を設定することは不可能なのである。どれほど厳密に制御したとしても、光子がどちらかのスリットで検出される確率が等しい、という以上のことは得られない。

このことは、この実験系（そして他の量子系すべて）において、生じうる二者択一の事象を分けるような原因は存在しない、という明白な結論をもたらす。

量子的事象は、ただ起こるだけだ。

このことは、古典科学の土台である因果律、すなわち原因と結果の原則との根本的な断絶を表わしている。

ここには、左のスリットを通る光子という、原因をもたない結果がある。

因果律がないということは、量子力学が古典力学ではないということである。

このことはアインシュタインを深刻に悩ませ、彼は自分が手を貸して確立させた理論の真実をけっして完全に受け入れることはできなかった。

確率としての実在性

【35】量子力学では、個々の光子がどこに到達するかを正確に予測することは不可能であるが、多数の光子のおおまかな分布を予測することは可能である。特定の範囲に到着する光子の確率を計算することができるからだ。

量子力学では、個々の光子がどこに到達するかを正確に予測することは不可能であるが、多数の光子のおおまかな分布を予測することは可能である。特定の範囲に到着する光子の確率を計算することができるからだ。

このような確率分布の計算は、量子力学の大部分を占める。

計算の手がかりとして用いられるパラメーターは、波動関数 Ψ である。

原則的には（実際にはそうではないが）、計算は単純である。

量子力学の創始者であるマックス・ボルンは、古典力学における確率は、量子波動関数の振幅を二乗することによって得られることを示した。

振幅は波の特性であり、波の高さを表わす。

波動関数の振幅は、波動関数の中で波打っているものの高さとして記述することが可能である。

したがって、写真乾板のあらゆる地点に到着する光子の確率を計算するためには、その地点での波動関数の振幅さえわかればよく、それを二乗すれば、光子が到着する確率が得られる。

【36】一方のスリット、たとえば右のスリットだけが開いていれば、光子がとることのできる経路は一つしかない。したがって、写真乾板上のあらゆる点での Ψ の振幅を計算し、その振幅を二乗して、光子が到着する確率を得ることは簡単だ。両方のスリットが開いているときには、波動関数が乾板に到着する前にとることのできる二つの異なる経路を考慮に入れなければならない、まず左あるいは右のスリットから到達した波動関数 Ψ_L と Ψ_R の振幅をたしあわせなければならない。

一方のスリット、たとえば右のスリットだけが開いていれば、光子がとることのできる経路は一つしかない。

したがって、写真乾板上のあらゆる点での Ψ の振幅を計算し、その振幅を二乗して、光子が到着する確率を得ることは簡単だ。

もし、乾板に光子が達する確率の密度を、高い確率は白い点で、低い確率は黒い点で表わせば、それらの点はこの単純な散乱パターンを再生するだろう。

両方のスリットが開いているときには、計算はもっと複雑になる。

こんどは、波動関数が乾板に到着する前にとることのできる二つの異なる経路を考慮に入れなければならない。

実際の波のように、波動関数 Ψ はスリットに到着すると、二つの波動関数の波束 Ψ_L と Ψ_R に分かれる。

ひとたび波束が乾板に到達すれば、その振幅を再び二乗して、古典力学的な確率に変換しなくてはならない。

だが、その計算をするためには、まず左あるいは右のスリットから到達した波動関数 Ψ_L と Ψ_R の振幅をたしあわせなければならない。

だが、波動関数 Ψ は波を記述するものであり、波は同位相あるいは逆位相の状態をとりうることを思い出してほしい。

乾板上のいくつかの点では、波は同位相で到着してともに大きな振幅になる。

一方、別の点では、波は逆位相で到着しておたがいを打ち消しあう。

干渉効果を生み出すのは、このプラスとマイナスの振幅の合成なのだ。

合成された振幅は再び二乗され、生じた確率をわれわれは、生じた確率をわれわれは、黒（低い確率）と白（高い確率）の点として表わすことができる。

点のパターンはスクリーン上に連続的な明暗の帯を形成し、それは干渉パターンを再生したことになるだろう。

【37】両方のスリットを開け、光子検出器を片方に置いたとすれば、波動関数 Ψ は写真乾板に着くまで元のままでいることはできず、スリットのところに置かれた検出器に波動関数が到達すると、波動関数は収縮してしまう。検出によって古典力学レベルの信号が生成されるため、ここで波動関数の振幅を二乗して、確率を得る必要がある。乾板中の感光乳剤は、左か右のスリットを通るかどうかをすでに決めた光子（波動関数ではない）に出合うだろう。それでも、光子到着の確率分布を得るためには、とりうる経路に対する確率を足し合わせることが必要である。

さて、光子の通過を検出しようとするれば、どのようなことが起こるだろうか？
両方のスリットを開け、光子検出器を片方に置いたとすれば、波動関数 Ψ は写真乾板に着くまで元のままでいることはできない。
もう予想がつくように、スリットのところに置かれた検出器に波動関数が到達すると、波動関数は収縮してしまう。

検出によって古典力学レベルの信号が生成されるため、ここで波動関数の振幅を二乗して、確率を得る必要がある。
乾板中の感光乳剤は、左か右のスリットを通るかどうかをすでに決めた光子（波動関数ではない）に出合うだろう。
それでも、光子到着の確率分布を得るためには、とりうる経路に対する確率を足し合わせることが必要である。
しかし、この足し合わせは、振幅ではなく確率を含んでいる。
確率はつねにゼロか正の値であり、決して負の値にはならない（負の振幅を二乗すると正になる）。
正の数と負の数が相殺しあうことがなくなるために干渉項は消え、確率点のパターンは散乱パターンの単純な足し合わせとなる。

光子検出器がスリットの後方に置かれていたとしてもちがいはない。
この場合、波動関数は光子検出器に遭遇するまでは重ね合わせとして存在するだろう。
そして波動関数は収縮し、振幅は確率に変換されるだろう。
しかし、ここでもスクリーン上のあらゆる点に到達する光子の確率を計算するためには、振幅でなく確率を足し合わせる必要があり、そうすると干渉効果はなくなってしまう。

【38】量子測定について、これまでに学んできたことを四点にまとめてみよう。われわれはたった二つの単純な実験から、量子力学の本質的な特徴のほとんどすべてを構築できたのである。

量子力学における波動関数は、空間上のある特定の点において粒子を検出する確率の平方根の一種であることがわかる。

しかし、波動関数はまた、その他のあらゆる量子系の特性、すなわち、エネルギー、運動量、回転角、そして偏光を記述するためにも用いることができる。

量子波動関数には、量子系について得ることのできるすべての情報が詰め込まれているのである。

そこで、量子測定について、これまでに学んできたことをまとめてみよう。

まず一つめに、量子系は、量子系に対して解放されたすべての確率を詰め込んだ波動関数によって記述されるが、測定が波動関数を収縮させ、量子力学における振幅を古典力学の確率に変換する。

二つめに、波動関数を収縮させるためには、量子系と相互作用するだけでは十分ではない。つまり、量子測定装置は、その系についてのいくつかの情報を取り出さなくてはならない。

三つめに、量子測定はあらゆるところで波動関数の瞬間的な収縮を起こす。つまり、それは局在的ではない。

最後に、否定的な検出結果を生む量子測定、つまりゼロ測定であっても、波動関数を収縮させる可能性がある。

われわれはたった二つの単純な実験から、量子力学の本質的な特徴のほとんどすべてを構築できたのである。

運動はどこに残されたのか？

【39】量子測定について理解したところで、生細胞内の基本的な粒子の運動について再び考えることにしよう。

量子測定について理解したところで、生細胞内の基本的な粒子の運動について再び考えることにしよう。

先に、乳酸デヒドロゲナーゼと基質の話をしたが、ここでは、触媒の陽子が量子の重ね合わせとして酵素にくっついた状態と乳酸に結合した状態の両方をとっているという、居心地の悪い状態のままだった。

物質は波と粒子の二重性をもつということを思い出せば、陽子は二つの山をもつ波であって、その山の一つが酵素のヒスチジン残基にかかっており、二つめの山が乳酸分子にかかっていると考えることができる。

酵素反応の過程において、これらの波の振幅は変化する。一つめの、ヒスチジン分子の上の初めは大きかった波は小さくなる一方で、乳酸分子の上の初めの小さかった波は大きくなる。

もし、この系が量子レベルのままであれば、これが起こりうることのすべてである。しかし、もし測定が行なわれれば、測定の過程では、陽子を記述する波動関数に質問をしなくてはならない。

波動関数は収縮して、陽子が乳酸もしくはヒスチジンのいずれかと結びつけられる確率、すなわち振幅の二乗を生成する。

【40】もし、測定後に陽子が乳酸分子とともに見いだされたとしても、陽子は実際にはそこに移動したのではない。陽子はある場所から別の場所に行くために、分割できないいちどの事象、つまり量子跳躍を行なっているのである。陽子は乳酸分子のところに現われるまさにその瞬間に、ヒスチジンに結合している原子から消えるのである。量子力学では、すべての運動は精細に見れば、ある場所から別の場所への連続的な跳躍となる。

もし、測定後に陽子が乳酸分子とともに見いだされたとしても、陽子は実際にはそこに移動したのではない。

または、少なくともわれわれが通常理解する移動のように、ある場所から別の場所へといくつかの中間の場所を通過して行ったわけではない。

そうではなく、陽子はある場所から別の場所に行くために、分割できないいちどの事象、つまり量子跳躍を行なっているのである。

要するに、陽子は乳酸分子のところに現われるまさにその瞬間に、ヒスチジンに結合している原子から消えるのである。

これも、アインシュタインのいう離れたところの幽霊のような作用である。量子力学では、すべての運動は精細に見れば、ある場所から別の場所への連続的な跳躍となる。

【41】しかし、この話のキーポイントは、乳酸デヒドロゲナーゼによって行なわれる酵素反応は、陽子がある場所から別の場所へ移動させるために、なんらかの量子測定を必要とするということである。基本的な粒子の運動は、生細胞が行なうすべての活動の基礎なのである。そして、この運動はある種の量子測定プロセスに依存している。

しかし、この話のキーポイントは、乳酸デヒドロゲナーゼによって行なわれる酵素反応は、陽子がある場所から別の場所へ移動させるために、なんらかの量子測定を必要とするということである。

この測定がなければ、陽子は永久にはっきりしない量子の重ね合わせ状態のままである。

すべての酵素反応は、単独の電子と陽子の運動を伴っており、同じように量子測定によって理解されなければならない。

突然変異を起こすような化学変化も、DNAの二重らせんの中にある電子と陽子の運動を伴っており、量子測定に依存しているはずである。

基本的な粒子の運動は、生細胞が行なうすべての活動の基礎なのである。

そして、この運動はある種の量子測定プロセスに依存している。

光とサングラス

【42】量子測定がもつ別の面は、サングラスを使った簡単な実験で誰でも証明できる。

量子測定がもつ別の面は、サングラスを使った簡単な実験で誰でも証明できる。その結果は驚くべきもので、量子測定に対する新しい見方を与え、量子力学が生命活動にどのように影響するのかを調べるときにとっても役に立つだろう。

【43】量子測定におけるわれわれの選択、つまり、スリットにおいて粒子を測定するかどうかを選択することが、その後の実在性、すなわち干渉パターンができるかどうかに影響するのである。

すでに、量子測定におけるわれわれの選択、つまりどの相補性を測定したいのかということが系の未来の挙動に影響を及ぼすということはわかった。これは、二重スリットの実験の本質である。

つまり、スリットにおいて粒子を測定するかどうかを選択することが、その後の実在性、すなわち干渉パターンができるかどうかに影響するのである。

量子測定がもつこの面についてのもっと微妙な例を見るには、サングラスに使われるような偏光レンズがいちばんわかりやすい。

古いサングラスをばらして三つの偏光レンズをつくれば、科学の世界で知られるもっとも簡単でもっとも奇妙な実験のひとつを行なうことができる。

【44】われわれが目にするたいていの光は、偏光しておらず、あらゆる方向に波打っている。偏光レンズは、望む方向に偏光した光線のみを透過する。その方向は、レンズの中の結晶の配列と同じ方向である。偏光レンズがまぶしい光を抑えるのは、通常、そうした光は窓あるいは水面から斜めに反射した光だからだ。

光線がこのページを通り抜けて自分に向かって飛んでくると考えてみよう。

もし、その光が偏光していれば、その波はページを通りながら、ある方向、たとえば垂直（↑）あるいは水平（↔）あるいはその中間の任意の角度に振動している。

便宜上、光の偏光角を、時計の文字盤の時刻で記述することにしよう。

たとえば、垂直方向に偏光した光のことは12時の方向あるいは6時の方向に偏光した光といい、水平方向に偏光した光のことは3時あるいは9時の方向に偏光した光ということにする。

われわれが目にするたいていの光は、偏光しておらず、あらゆる方向に波打っている。

偏光レンズは、望む方向に偏光した光線のみを透過する。

その方向は、レンズの中の結晶の配列と同じ方向である。

偏光レンズがまぶしい光を抑えるのは、通常、そうした光は窓あるいは水面から斜めに反射した光だからだ。

光の特性として、斜めの角度で反射した光は部分的に偏光されるため、偏光サングラスを通り抜けることができない。

【45】一つの偏光レンズを通して12時の方向に偏光した光は、同じ角度に向けられた二番目の偏光レンズによって、ほぼ100パーセント透過されることを簡単に観察することができる。逆に、二つの連続する偏光レンズを、その偏光軸が垂直、たとえば12時と3時方向になるように向けると、その一組のレンズは光をまったく透過させない。

偏光した光を得るためには、偏光レンズから出てきた光を使うのが便利だ。

一つの偏光レンズを通して12時の方向に偏光した光は、同じ角度に向けられた二番目の偏光レンズによって、ほぼ100パーセント透過されることを簡単に観察することができる。

逆に、二つの連続する偏光レンズを、その偏光軸が垂直、たとえば12時と3時方向になるように向けると、その一組のレンズは光をまったく透過させない。

サングラスを使って、このことを試してみるとよい。

比較的明るいもの、たとえば明るい光やテレビの画面などを見てみると、よりわかりやすい。

レンズに一、二、三と番号をつけよう。

まず、通り抜ける光量が最大となる、つまり、もっとも明るい像となるような、レンズ一に対するレンズ二の角度を探す。

こうすることによって、レンズ一およびレンズ二の結晶の偏光方向を合わせたことになる。たとえば、垂直の矢印のような記号をそれぞれのレンズにつけて、この偏光の角度がわかるようにしておこう。

この操作をレンズ一とレンズ三の組み合わせについても行ない、同様にレンズ三にも印をつける。

再び明るい像を見るためには、三つとも12時の方向に向けたレンズに光を通さなければならぬことを確かめて、すべてのレンズが同じ結晶配列をもっていることを確認してほしい。

レンズを置く順序によって、透過光の量が変化することはない。

【46】垂直方向の柵と水平方向の柵を組み合わせると、どの光波も透過しないのは、水平偏光のレンズは垂直方向に偏光した波を通さず、垂直偏光のレンズは水平方向に偏光した光を通さないからである。

さて、レンズ一とレンズ二を使って、二つのレンズの矢印を12時の方向に並べ、光の透過量が再び最大になるようにする。

そして、二番目のレンズをゆっくりと回転させる。

レンズを回転させるに従って像は暗くなる。

二番目のレンズが90度回転したとき、像は完全に消える。

このことは、光が垂直または水平に波打っていることを考えれば、完璧に理にかなっている。

偏光レンズは、波が通らなければならない一種の柵と考えることができる。
もし、その波が垂直方向の波であれば、それは簡単に垂直方向の柵を通過することができる。
もし、水平方向の波であれば、水平方向の柵は通るが、垂直方向の柵には完全に遮られてしまう。
垂直方向の柵と水平方向の柵を組み合わせると、どの光波も透過しないのは、水平偏光のレンズは垂直方向に偏光した波を通さず、垂直偏光のレンズは水平方向に偏光した光を通さないからである。

【47】最後に、三番目のレンズ三をレンズ一とレンズ二のあいだにはさみ、その矢印を1時の方向に回転させたとする。余分のレンズを挿入することで、なぜか光が三つすべてのレンズを通るようになるのである。

最後に、三番目のレンズ三をレンズ一とレンズ二のあいだにはさみ、その矢印を1時の方向に回転させたとする。
レンズ一とレンズ二の二つのレンズでは像は見えなかったが、レンズを三つにすることによって像が再び現われる。
余分のレンズを挿入することで、なぜか光が三つすべてのレンズを通るようになるのである。
なぜ実際には三つすべてのレンズを光が通るようになるのだろうか？

【48】偏光レンズを置く順番によって、光の透過量が変わることはないのである。

偏光レンズは、これまで考えていたように偏光した光を通すだけでなく、光の偏光角度を回転させることもできるのかもしれない。

しかし、もうひとつの簡単な実験で、このことに反証できる。

もういちど三つすべてのレンズを、光の透過量が最大となるように並べてみよう。
もし、それぞれのレンズが偏光角を回転させているならば、レンズの順番が問題となるだろう。
あるレンズの透過角度が、並んでいる次のレンズの捕捉角度と一致していなければならないからだ。
しかし、簡単に証明されるとおり、そんなことはない。
偏光レンズを置く順番によって、光の透過量が変わることはないのである。

【49】光子は偏光できるのだろうか？じつはできるのだ。12時と3時の方向に向けられた一組のレンズを通り抜ける光子が存在しないことから、この場合の光子透過の確率はゼロであるといえる。しかし、1時の方向に向けられた三番目のレンズを挿入すると、いくつかの光子を通すようになる。事実、約6パーセントの光子が、三つすべてのレンズを通過する。追加のレンズを挿入することで、光子の透過の確率をゼロから6パーセントに増やしたのだ。偏光の角度は、一個の光子にとっての真の特性なのである。

この現象は、光を光子の流れと考えると、さらにおかしなものになる。

光子は偏光できるのだろうか？

じつはできるのだ。

これまでのことから、もう、光子の偏光を証明するために必要な実験を察することができるだろう。

偏光レンズの実験を、一個ずつ光子を放出する弱い光源を用いて行ない、決まった偏光角で偏光レンズを通せばよい。

写真乾板あるいは光子検出器の列またはカエルを使って、透過した光子を検出する。

12時の方向に偏光した光子は、12時の方向に向けられたレンズによってほぼ100%透過されるが、3時の方向のレンズには完全に吸収される。

したがって、偏光の角度は、一個の光子にとっての真の特性なのである。

このこと自体が何だか奇妙に思える。

というのも、偏光に対するわれわれの概念の根底には、特定の方向にうねる波のイメージがあるからだ。

一個の光子の中で何が波打っているのだろうか？

一個の光子がどうやって偏光の角度の方向情報を運ぶのだろうか？

その角度を示しているものは何だろうか？

これらの疑問に完全に満足できるような解答は存在しない。

個数をかぞえることのできる光子を用いることによって、実数と量子力学の確率を関係づけられる。

12時と3時の方向に向けられた一組のレンズを通り抜ける光子が存在しないことから、この場合の光子透過の確率はゼロであるといえる。

しかし、1時の方向に向けられた三番目のレンズを挿入すると、いくつかの光子を通すようになる。

事実、約6パーセントの光子が、三つすべてのレンズを通過する。

追加のレンズを挿入することで、光子の透過の確率をゼロから6パーセントに増やしたのだ。

この現象は、光子のことを考えると、さらに奇妙に思える。

なぜ、二つのレンズでは阻止された光子が、レンズのあいだに三つ目のレンズを挿入することで、同じレンズを透過できるようになるのだろうか？

【50】 偏光の角度は、位置や運動量と同じように、光子の量子的な特性である。

サングラスを通った光を調べることは、実際には量子測定を行なっていたことになる。好ましい12時の方向に向けられた偏光レンズの固有状態は、[レンズによって透過される12時方向に偏光した光子]と[レンズによって吸収される3時方向に偏光した光子]である。これまでに見いだされたように、量子測定は量子系を、測定装置の固有状態の一つに適合させる。

この現象に対する鍵は、光子と偏光レンズとの相互作用が量子測定を構成していることを理解することである。

偏光の角度は、位置や運動量と同じように、光子の量子的な特性である。サングラスを通った光を調べることは、実際には量子測定を行っていたことになる。つまり、サングラスをかけている人は誰でも量子物理学者になれるのだ！

それぞれの偏光レンズは、光子の偏光の角度を決定し、量子測定を行なうことができる。

しかし、位置や運動量のように、値に幅がある性質とは異なり、偏光レンズは「光がレンズを通ることができるか？」

という質問にイエスかノーの解答を与えるのみである。

量子力学の言葉を借りると、レンズはただ二つの直交する固有状態（測定装置によって示される状態）しかもっていないということだ。

好ましい12時の方向に向けられた偏光レンズの固有状態は、[レンズによって透過される12時方向に偏光した光子]と[レンズによって吸収される3時方向に偏光した光子]である。

これまでに見いだされたように、量子測定は量子系を、測定装置の固有状態の一つに適合させる。

12時方向のレンズによって透過される光子は、それ以前の偏光角にかかわらず、すべて12時方向に偏光して現われる。

レンズに透過されない光子はすべて吸収されるため現われないが、もし回収することができれば、それは3時方向に偏光されている。

【51】状態ベクトルの決定的な特徴は、足し合わせると元のベクトルになるような別のベクトルの重ね合わせとして表わすことができることである。量子状態を他の状態の重ね合わせに分解することは、量子測定を新しく強力な方法で表わすことを可能にする。量子測定は、元の状態ベクトルを測定装置の固有状態に投影するのである。

偏光を調べる場合にとくに役に立つ、量子の波動関数を考える方法のひとつは、空間にある一本の矢印である。

このような形をした波動関数は状態ベクトルとして知られているが、状態ベクトルは、これまでに用いられた波動関数と多かれ少なかれ同じ役割を果たしている。

光子の状態ベクトルは、偏光方向を指す任意のある単位に等しい長さの矢印であると考えよう。

偏光していない光は、すべての方向を示す成分をもっている。

ある方向を指す一本の矢印は、偏光した光を表わす。

状態 Ψ [12時] は垂直方向の矢印、状態 Ψ [3時] は水平方向の矢印、状態 Ψ [1時] は垂直方向から30度回転した矢印である。

状態ベクトルの決定的な特徴は、足し合わせると元のベクトルになるような別のベクトルの重ね合わせとして表わすことができることである。

たとえば、状態 Ψ [12時] を二つの垂直関係にある状態の量子の重ね合わせ、たとえば、 Ψ [{11時} (+/-) {2時}] あるいは Ψ [{10時} (+/-) {1時}] と書くことができる。

各状態ベクトルの記述はまったく同等であり、状態 Ψ [12時] で表わされる状態と、 Ψ [{11時} (+/-) {2時}] で表わされる状態とは区別できない。両方の状態は同じである。

このように、量子状態を他の状態の重ね合わせに分解することは、量子測定を新しく強力な方法で表わすことを可能にする。

量子測定は、元の状態ベクトルを測定装置の固有状態に投影するのである。

【52】測定は、光子と測定装置の重ね合わせを収縮させて、次の固有状態の一つにする。つまり、 Ψ [{1時} (+/-) {10時}] \rightarrow Ψ [1時方向に偏光してレンズに透過される光子] または Ψ [10時方向に偏光してレンズに吸収される光子] のいずれかである。

1時の方向に向けられたレンズは、二つの直交する固有状態をもっている。つまり、1時（透過される）あるいは10時（吸収される）状態である。

状態ベクトル Ψ [12時] がレンズに向かうとき、それは Ψ [12時] \rightarrow Ψ [{1時} (+/-) {10時}] という固有状態の重ね合わせに投影され、それぞれの固有状態に対する元の状態の近さを考慮した重み付けがなされる。

測定は、光子と測定装置の重ね合わせを収縮させて、次の固有状態の一つにする。つまり、 Ψ [{1時} (+/-) {10時}] \rightarrow Ψ [1時方向に偏光してレンズに透過される光子] または Ψ [10時方向に偏光してレンズに吸収される光子] のいずれかである。

【53】測定の過程は、系の状態を、測定される固有状態に跳躍させる。この量子跳躍は、古典力学にはない量子力学の別の特徴であり、量子力学理論の創始者の中にはこれにおおいに悩んだ人もいた。

状態ベクトルを測定装置の固有状態に投影するものとしての測定は、量子測定に対する別の洞察を与える。

状態ベクトルは、けっして直接見ることはできない、隠されたものであると考えられる。できるのは、量子測定を行なって、その状態の影を測定装置に投影させることだけだ。異なる量子測定というのは、投影の角度が異なるということのようだ。つまり、それぞれの測定が測定装置に異なる影を投影するのだ。

しかし、状態ベクトルにはさらに奇妙な点がある。

つまり、状態ベクトルは形を変えるものでなくてはならないということだ。

というのは、いったん量子測定が行なわれると、状態ベクトルはその投影となるために跳躍するからだ。

測定の過程は、系の状態を、測定される固有状態に跳躍させる。
この量子跳躍は、古典力学にはない量子力学の別の特徴であり、量子力学理論の創始者の中にはこれにおおいに悩んだ人もいた。

エルヴィン・シュレーディンガーは「もし誰かがこの呪わしい量子跳躍と取り組み続けなければならないとすれば、私は原子論の研究を始めたことを申しわけなく思う」と語っている。
しかし、シュレーディンガーが嫌悪したにもかかわらず、量子跳躍は量子力学理論における基本的な特徴でありつづけている。

【54】別の重要な点は、量子測定は永遠ではないということだ。なぜなら、すぐに他の粒子と相互作用を行なうからである。

別の重要な点は、量子測定は永遠ではないということだ。
もし、量子系が測定されたあとに乱されないままにされれば、量子系は不明確なまま、その測定された状態でありつづけるかもしれない。
しかし現実には、長時間乱されないままであるということはない。
なぜなら、すぐに他の粒子と相互作用を行なうからである。
その量子状態は、すぐに量子の重ね合わせとして複数の可能な状態に分散され、再び別の量子測定によって一つの状態に引き戻される。
したがって、古典論の世界は、その実在性を維持するために冷酷な量子測定に依存しているのだ。

逆量子ゼノン効果と量子測定

【55】二つのレンズがたがいに垂直（たとえば12時と3時の方向）に置かれるときには、光子が透過する確率がゼロになることを覚えているだろう。しかし、1時の方向に向けた追加のレンズを最初の2枚のレンズのあいだに挿入すると、光子が透過する確率はゼロから6パーセントに増える。このように、斜めの量子測定（初期状態から少し変化する測定）は光子の偏光角度を回転させることができる。もっと多くのレンズを使って、このプロセスを続けることができる。四番目のレンズを2時の方向にして挿入すれば、偏光角度はさらに回転するだろう。2時の方向のレンズは、1時の方向のレンズから出てくる光子の状態ベクトルを固有状態に投影する。
これらの光子は最後の3時方向のレンズをもっと簡単に透過し、四つすべてのレンズを透過する確率は29パーセントに増えるだろう。これが、逆量子ゼノン効果の一例であり、ある決まった経路に沿って量子系の密集した測定を行なうことで、その系の挙動をその経路に沿って展開させるというものである。

われわれは、三つの偏向レンズの実験のときに、逆量子ゼノン効果の一面にすでに出合っている。

二つのレンズがたがいに垂直（たとえば12時と3時の方向）に置かれるときには、光子が透過する確率がゼロになることを覚えているだろう。

しかし、1時の方向に向けた追加のレンズを最初の2枚のレンズのあいだに挿入すると、光子が透過する確率はゼロから6パーセントに増える。

何が起こったかという、1時方向のレンズが状態ベクトルを固有状態に投影したのだ。もともと12時方向に偏光していた光子の一部だけが1時方向のレンズを透過するが、透過したすべての光子は1時の方向に偏光している。

この1時方向の光子の大部分は、3時方向のレンズを透過できる。元の12時方向の光子は透過できなかったのに、である。

このように、斜めの量子測定（初期状態から少し変化する測定）は光子の偏光角度を回転させることができる。

もっと多くのレンズを使って、このプロセスを続けることができる。四番目のレンズを2時の方向にして挿入すれば、偏光角度はさらに回転するだろう。

2時の方向のレンズは、1時の方向のレンズから出てくる光子の状態ベクトルを固有状態に投影する。

2時方向の偏光という固有状態になった光子だけがレンズを透過するが、これらの光子はすべて2時の方向に変更される。

これらの光子は最後の3時方向のレンズをもっと簡単に透過し、四つすべてのレンズを透過する確率は29パーセントに増えるだろう。

もっと多くのレンズを追加すれば、さらに多くの光が透過するようになる。15個の偏光レンズを1分、2分、4分、・・・、15分という偏光方向に向けて並べていけば、光子が透過する確率は90パーセント以上になる。無限に密集したレンズを並べれば、透過の確率は100パーセントになるだろう。

これが、逆量子ゼノン効果の一例であり、ある決まった経路に沿って量子系の密集した測定を行なうことで、その系の挙動をその経路に沿って展開させるというものである。

偏光レンズは、偏光角度の回転に沿って密集した測定を行なうことによって、この逆量子ゼノン効果を実現できる。

【56】逆量子ゼノン効果とは、量子系の挙動のあらゆる面を支配できる一般的な現象なのである。 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow F \rightarrow G \rightarrow H$ という経路、あるいはわれわれが選択するあらゆる経路にそって量子測定を行なうひと続きの顕微鏡によって、すべての過程を続けることができる。測定が十分に密であれば、逆量子ゼノン効果は原子を捕え、それを測定経路にそって引っ張るだろう。

しかし、逆量子ゼノン効果とは、量子系の挙動のあらゆる面を支配できる一般的な現象なのである。

任意の位置（A）にある原子について考えてみる。

もちろん、位置というのは、波動関数あるいは状態ベクトル、すなわち Ψ [{Aにある原子}] という式で表わすことのできる量子的特性である。

しかし、偏光角度と同様に、位置状態ベクトルは、足し合わせると元の状態になる直交した状態ベクトルの重ね合わせ、たとえば、 Ψ [{Aよりもやや左のBにある原子} （+ / -） {Aよりもやや右のCにある原子}] として表わすことができる。

これと等価の式は、 Ψ [{Aのやや北のXにある原子} （+ / -） {Aよりもやや南のYにある原子}] のようになる。

量子力学では、これらの一つ一つの表現が正確に同じ状態を記述する。

さて、測定装置、たとえば高倍率の電子顕微鏡をBの位置に置くとする。

電子顕微鏡は、位置Bにある、原子の位置不確定性の中にある原子を検出することになるため、このことは原子の状態ベクトルを顕微鏡の固有状態に投影する量子測定を構成する。この電子顕微鏡が検出する原子は、かならずBの位置にあるはずなので、この原子はAからBに量子跳躍したことになる。

別の電子顕微鏡をBの左側の位置Dに置いて、この過程を再現できる。

この測定は、位置Bにある原子をその固有状態に投影する。

検出される原子はDへと量子跳躍したのである。

A → B → C → D → E → F → G → H という経路、あるいはわれわれが選択するあらゆる経路にそって量子測定を行なうひと続きの顕微鏡によって、すべての過程を続けることができる。測定が十分に密であれば、逆量子ゼノン効果は原子を捕え、それを測定経路にそって引っ張るだろう。

【57】逆量子ゼノン効果を示すときに重要なポイントは、経路にそったそれぞれの測定は量子測定の性質上古典的な信号を生成するかもしれないが、測定の結果生じるもの、つまり測定された粒子や状態は量子レベルでありつづけなければならないということだ。量子系を古典的レベルに不可逆的に増幅することは、逆量子ゼノン効果に対する経路の終わりを表わしている。

逆量子ゼノン効果を示すときに重要なポイントは、経路にそったそれぞれの測定は量子測定の性質上古典的な信号を生成するかもしれないが、測定の結果生じるもの、つまり測定された粒子や状態は量子レベルでありつづけなければならないということだ。

そうしなければ、経路にそった次の測定は、その測定された状態を分解して新しい重ね合わせになることはできない。

もし、そうではなくて、測定から生じた状態が、おそらくある種の増幅作用によって古典的な状態に変換されたとすれば、逆量子ゼノン効果はその状態を変えることができない。

逆量子ゼノン効果は量子系にのみはたらくのだ。
古典的な系を状態の重ね合わせに分解することはできない。
量子系を古典的レベルに不可逆的に増幅することは、逆量子ゼノン効果に対する経路の終わりを表わしている。

デコヒーレンス

【58】特定の状態を決定するためには外部環境をもつことが必要であり、この環境を参照することによってのみ、定まった一つの偏光方向あるいは一つの位置の一つのエネルギー状態のような古典的概念が実在のものとなる。これは、あらゆる測定装置がもつ側面のひとつなのである。測定装置は、量子系が外部環境に位置決定されるのを可能にすることによって、位置や運動量などの古典的概念を正当化する。

閉じた箱の中に一個の光子があるとしよう。
もし、この光子の偏光状態について何の知識もなければ、光子はあらゆる偏光角度で、すなわち、「→」「↘」「↗」「↑」またはその中間のあらゆる角度で見いだされるだろう。

量子力学では、この光子の状態を、これらすべての可能な状態の重ね合わせからなる波動関数で記述する。
つまり、 $\Psi [\{ \rightarrow \} (+/-) \{ \searrow \} (+/-) \{ \nearrow \} (+/-) \{ \uparrow \}]$ となる。

古典的な考え方では、「でも実際、光子はどの状態にいるのだろうか？」という疑問が起こるかもしれない。
しかし、もし孤立した光子についてのみ考えているのなら、古典的にもこれらの状態はすべて同じである。

もし、外部の基準となる方向が存在しないなら、「→」「↘」「↗」「↑」を区別することはできない。
すべて同じ状態である。
特定の方向を定めることができる基準点のある環境に光子を置くことによって、初めて「→」の状態を「↘」の状態と区別できるようになる。
この位置決定が行われなければ、光子が偏光方向をもつということは意味をなさない。

同様に、位置の概念は、粒子を空間上に位置決定したときにのみ意味をもつものである。
外部に基準点がない空っぽの空間では、位置はその意味を失う。

同じ考えは、エネルギーや運動量、あるいは時間などの概念にも適用される。
つまり、それらは外部で位置決定された基準点および（または）外部の時計を参照することによって初めて決定できる。

したがって、特定の状態を決定するためには外部環境をもつことが必要であり、この環境を参照することによってのみ、定まった一つの偏光方向あるいは一つの位置の一つのエネルギー状態のような古典的概念が実在のものとなる。

これは、あらゆる測定装置がもつ側面のひとつなのである。

測定装置は、量子系が外部環境に位置決定されるのを可能にすることによって、位置や運動量などの古典的概念を正当化する。

外部環境がなければ、量子波動関数があらゆる系の唯一の正当な記述となる。

【59】 粒子の位置を実在のものにするために位置決定を行なっているのは誰なのだろうか？ 量子系と環境あるいは測定装置とのあいだには、なんらかの物質あるいはエネルギーの交換があるはずなのだ。

しかし、粒子の位置を実在のものにするために位置決定を行なっているのは誰なのだろうか？

位置が定められない空っぽの無限の空間に、原子などの粒子があるところを想像してみる。

その粒子は空間内のすべての可能な位置の重ね合わせとして存在するといえる。

外部からの物体が原子のそばに置かれる。

そうすると、その物体を参照して原子の位置を決めることができる。

それでも粒子は、すべての可能な位置の重ね合わせでありつづけるだろうか？

これらの物体は原子の位置を測定できるだろうか？

しかし、この問題を次のように眺めると、量子測定の本質的な特徴が明らかになる。

つまり、つまり、量子系と環境あるいは測定装置とのあいだには、なんらかの物質あるいはエネルギーの交換があるはずなのだ。

【60】 岩が原子のことを知るためには、原子と岩とのあいだで物質かエネルギーのなんらかの交換がなければならない。岩が原子の位置を測定するためには、原子がとりうるいくつかの位置を岩が区別できなければならない。量子測定が行なわれるためには、環境（岩）に量子系（原子）のなんらかの記録が必ず存在しなければならないということだ。その系についての情報が環境に漏れ出さなくてはならないのである。

もし、岩が単に原子の隣にあるだけなら、岩と原子はどうやっておたがいの存在を知ることができるのだろうか？

岩が原子のことを知るためには、原子と岩とのあいだで物質かエネルギーのなんらかの交換がなければならない。

岩が原子の位置を測定するためには、原子がとりうるいくつかの位置を岩が区別できなければならない。

もしかすると、ある位置から原子が岩をめがけて光子を放出すると、その岩がたまたま突き出た岩棚の上でぐらついていて、光子が運ぶわずかな運動量によって岩が落ちるかもしれない。

大事なものは、量子測定が行なわれるためには、環境（岩）に量子系（原子）のなんらかの記録が必ず存在しなければならないということだ。
その系についての情報が環境に漏れ出さなくてはならないのである。

【61】標準的なコペンハーゲン解釈では、二つの粒子はEPRペアとして知られるものに絡まるといわれる。この粒子は独立した実在性をもたないが、一つの波動関数によって記述され、その中には両方の粒子のすべての可能な状態が含まれる（たとえば、 Ψ {1単位の運動量をもつ P_1 と9単位の運動量をもつ P_2 } (+/-) {2単位の運動量をもつ P_1 と8単位の運動量をもつ P_2 } (+/-) {3単位の運動量をもつ P_1 と7単位の運動量をもつ P_2 } …）。

EPR（アインシュタイン、ポドルスキー、ローゼンの頭文字をとったもの）論文で、アインシュタインは、二つの量子系が相互作用するという思考実験を記述している。
たとえば、任意の単位で10の運動量をもつ一個の粒子が、二個の粒子 P_1 と P_2 に崩壊する
としよう。

すると、二個の粒子は反対方向に飛び去る。

系全体の運動量は衝突前にわかっているので、運動量保存の法則から、衝突後の二個の粒子の合計運動量もわかる。

なぜなら、同じ10単位の等しいはずだからだ。

だが、その運動量が二個の粒子のあいだで、どのように分配されたかはわからない。

標準的なコペンハーゲン解釈では、二つの粒子はEPRペアとして知られるものに絡まるといわれる。

この粒子は独立した実在性をもたないが、一つの波動関数によって記述され、その中には両方の粒子のすべての可能な状態が含まれる（たとえば、 Ψ {1単位の運動量をもつ P_1 と9単位の運動量をもつ P_2 } (+/-) {2単位の運動量をもつ P_1 と8単位の運動量をもつ P_2 } (+/-) {3単位の運動量をもつ P_1 と7単位の運動量をもつ P_2 } …）。

【62】原子と岩と猫と人のあいだのどこかに、量子の絡み合いが古典的に分離された状態になる遷移点があるはずだ。その点はどこだろうか？

原子のそばに置かれた物体が、岩ではなく、電子のような別の基本的な粒子であればどうだろうか。

新しい粒子はEPRペアとして、元の粒子のすべての可能な位置と絡み合うことができる。
測定は起こりえない。

岩は粒子の位置を測定できるかもしれないが、ただ一つの電子には測定はできないだろう。
では、二つか三つの電子、あるいは100万個、10億個、あるいは1兆個の原子の中の1兆個の電子ならどうだろうか？

明らかに、平均的な人間あるいは猫の原子の数（およそ10の30乗個の原子）に近づいている。

原子と岩と猫と人のあいだのどこかに、量子の絡み合いが古典的に分離された状態になる遷移点があるはずだ。
その点はどこだろうか？

【63】単色レーザー光の決定的な特徴は、光波の山と谷が、どの段階でもすべて一致しているのである。この種のコヒーレント（可干渉性）な光だけが、干渉パターンの特徴であるくっきりとした明暗の帯を生じるのである。もし代わりに、多色光つまりいろいろな波長な光の混合からなる光を用いれば、光波はすぐに歩調を乱してインコヒーレント（非干渉性）になる。

この問いに答えるために、二重スリット実験に戻ることにしよう。
スリットスクリーンに光を通すと、干渉パターンが見えた。

しかし、じつは干渉パターンを得るにはかなりの精巧さが必要である。
実験では光源にレーザーを使用したか、それは同位相の単色光（ある一つの周波数あるいは色の光）を放出するからである。

単色レーザー光の決定的な特徴は、波がすべて同じ波長をもち、同じ位相で放出されていることである。
つまり、光波の山と谷が、どの段階でもすべて一致しているのである。

この種のコヒーレント（可干渉性）な光だけが、干渉パターンの特徴であるくっきりとした明暗の帯を生じるのである。

もし代わりに、多色光つまりいろいろな波長な光の混合からなる光を用いれば、光波はすぐに歩調を乱してインコヒーレント（非干渉性）になる。
波がスクリーンに到達するとき、山と谷は混合してばらばらの時間に到着する。
インコヒーレントな山と谷とのほぼランダムな足し引きによって、すべての量子の重ね合わせの {右 (+) / 左 (-)} 項が打ち消される。
単純な [右] + [左] の散乱パターンだけが残り、干渉帯はなくなる。

【64】電子を揺さぶるために、電子に向かって光子を放出する。ある電子は衝撃によって運動量を得るだろうし、別の電子は運動量を失うだろう。最終的な結果として、電子ビームに対するコヒーレンスは失われ（デコヒーレンスという）、干渉パターンは破壊される。しかし、これはまさに電子を検出する方法ではないだろうか？

電子と光子の両方に標準的な量子力学の原理を適用することによって、デコヒーレンスさえあれば不可逆的に干渉がなくなることが示される。実際には、いま電子は古典的な世界に生きている。環境（光子）が量子系を実質的に測定したのである。

光がコヒーレントであることを乱すもうひとつの方法は、光子を少しだけ揺さぶることである。

この議論は、電子の干渉パターンを生むために、スリットに電子を発射する話に切り替えればより明確になるだろう。

光子と同じように、干渉効果によってそれぞれの電子が両方のスリットを量子の重ね合わせとして伝播できることが示される。
電子は量子の世界に生きているのである。

次に、電子を揺さぶるために、電子に向かって光子を放出する。
ある電子は衝撃によって運動量を得るだろうし、別の電子は運動量を失うだろう。

最終的な結果として、電子ビームに対するコヒーレンスは失われ(デコヒーレンスという)、干渉パターンは破壊される。
しかし、これはまさに電子を検出する方法ではないだろうか？

飛行中の電子を捕らえるために用いられる検出器は、電子に光子を発射してその偏向を検出する。

われわれは、量子測定 of 証拠として干渉がなくなることを認めてきた。
つまり、波動関数の収縮である。

だが、少なくともこの状況では、この状況では、この現象を説明するために波動関数の収縮という仮説を使う必要はないことが明らかになる。

電子と光子の両方に標準的な量子力学の原理を適用することによって、デコヒーレンスさえあれば不可逆的に干渉がなくなることが示される。

干渉効果を失うことによって、われわれは電子が両方のスリットを通った形跡も失ってしまった。

実際には、いま電子は古典的な世界に生きている。

環境（光子）が量子系を実質的に測定したのである。

【65】測定のもの、環境は量子事象についての消すことのできない、ある記録を保持しなければならない。その記録は、光子に乗って空間に運ばれたかもしれないし、あるいは量子系自身の中にある無数の粒子のあいだに分散されたかもしれない。
しかし、デコヒーレンスが量子測定を起こすには、なんらかの情報が環境に漏れ出す必要がある。

デコヒーレンスに対する鍵は、量子系と複雑な環境が相互作用で関係しあうことである。
測定のもの、環境は量子事象についての消すことのできない、ある記録を保持しなければならない。
その記録は、光子に乗って空間に運ばれたかもしれないし、あるいは量子系自身の中にある無数の粒子のあいだに分散されたかもしれない。

しかし、デコヒーレンスが量子測定を起こすには、なんらかの情報が環境に漏れ出す必要がある。

【66】デコヒーレンスは、なぜ大きな物体の量子の重ね合わせの証拠を見ることができないのか、を説明してくれる。大きな物体の原子や分子は無数の自由度をもち、おたがいや外部環境と相互作用を行なうので、すぐにデコヒーレンスになびいてしまうだろう。量子効果はデコヒーレンスによって除かれるのである。

デコヒーレンスは、なぜ大きな物体の量子の重ね合わせの証拠を見ることができないのか、を説明してくれる。

シュレーディンガーの猫と同じくらいの大きさの物体は、すぐにデコヒーレンスになびいてしまうだろう。

その物体の原子や分子は無数の自由度をもち、おたがいや外部環境と相互作用を行なう。猫が生きている状態と死んでいる状態の量子の重ね合わせは、すぐにデコヒーレンスによってめちゃくちゃにされるだろう。

デコヒーレンスはまた、熱力学プロセスがなぜけっして量子効果を示さないのかを説明してくれる。

インコヒーレントな動きによって動かされる蒸気エンジンと化学エンジンは無数の自由度をもっている。

原子や分子の衝撃や揺さぶりは干渉効果を破壊し、したがってデコヒーレンスをもたらす。

たいていの自然現象、たとえば天気や惑星の運動などもインコヒーレントな動きによって動かされており、同様にデコヒーレンスの犠牲となる。

上昇気流や高気圧やベルーソフ・ジャボチンスキー反応のような自己組織化構造ですら、分子レベルではインコヒーレントな動きによって動かされている。量子効果はデコヒーレンスによって除かれるのである。

量子細胞

【67】筋肉、酵素、呼吸など生物細胞の行なうあらゆる作用には、陽子と電子の運動が伴っており、これらの粒子の運動は、量子力学の奇妙な規則に支配されている。量子的世界と古典的世界とのあいだには境界線があるにちがいないのだ。その境界線は、電子や陽子のレベルよりは上にあるにちがいないのだが、細胞レベルよりは下である。とすれば、どこにあるのだろうか？

筋肉、酵素、呼吸など生物細胞の行なうあらゆる作用には、陽子と電子の運動が伴っており、これらの粒子の運動は、量子力学の奇妙な規則に支配されている。

だが、いくら量子的粒子からできているといっても、分かれ道の両方を同時に歩くことができる猫は見たことがない。

量子的世界と古典的世界とのあいだには境界線があるにちがいないのだ。
その境界線は、猫を構成している陽子と、猫自身のあいだとのどこかに存在する。

顕微鏡を覗いてみれば、猫を形づくる生細胞は古典的世界に生きていることが確信できるだろう。

筋肉細胞は同時に収縮と弛緩を行なうことはできない。

血液細胞は同時に二つの血管を流れることはできない。

その境界線は、電子や陽子のレベルよりは上にあるにちがいないのだが、細胞レベルよりは下である。

とすれば、どこにあるのだろうか？

生態系に存在する量子と古典論の境界を見つける助けとするために、まず無生物の世界に境界線を引くことを考えてみよう。

【68】生物は無生物とまったく同じ物質からできているのだから、生体系よりずっと研究がやさしい非生体系でどこに境界があるのかを知ることができれば、生細胞内のどこを見るべきかの指針となるにちがいない。

生物は無生物とまったく同じ物質からできているのだから、生体系よりずっと研究がやさしい非生体系でどこに境界があるのかを知ることができれば、生細胞内のどこを見るべきかの指針となるにちがいない。

まず、室温の箱の中に一個の陽子を閉じ込め、箱をゆっくりと冷やしていくことを想像してみよう。

室温では、暖かい陽子はかなりの量の熱（運動）エネルギーをもっており、箱の端から端まで瞬間的にすばやく移動し、壁で跳ね返って箱と運動エネルギーを交換する。

箱が室温に保たれているかぎり、陽子の衝突によって同量のエネルギーが交換され、陽子は同量の熱エネルギーを保つだろう。

しかし、箱が冷却されると、箱の壁のもつ熱エネルギーは小さくなるため、跳ね回る陽子は衝突するごとに少しずつ箱に運動エネルギーを奪われていく。

さらに箱を冷やすと、衝突のたびに陽子の動きが遅くなり、ついに摂氏零下273度（ケルビン温度における絶対零度）で陽子は止まってしまう。

ケルビン温度の絶対零度とは、熱による分子のランダムな運動がすべて止まる温度である。

絶対零度では、熱はもはや存在しない。

しかし、止まっているにもかかわらず、陽子は完全に静止しているわけではない。

【69】絶対零度においても陽子は単一の周波数（陽子のエネルギーから計算できる）で振動し、調和振動子として振る舞うのである。もうひとつの見方は、陽子が箱の中のあらゆる可能な位置の重ね合わせの中を浮遊する浮遊する粒子であるというものだ。粒子か波か？どちらの見方も等しく妥当なものである。

絶対零度においても陽子は内在性の振動をもっており、それは、陽子の基底準位エネルギーと、陽子が粒子と波の両面性をもつという性質によってもたらされる（ $E=h\nu$ の式を思い出してほしい）。

したがって、陽子は単一の周波数（陽子のエネルギーから計算できる）で振動し、調和振動子として振る舞うのである。

量子振動子としての陽子は一種の量子音叉であり、その波のパターンが箱全体を満たしていると考えることができる。

もうひとつの見方は、陽子が箱の中のあらゆる可能な位置の重ね合わせの中を浮遊する浮遊する粒子であるというものだ。

もし、箱の中に位置エネルギーの異なるいくつかの領域があれば（たぶん箱の中にはわずかな電荷の差が存在する）、その粒子はエネルギー状態の重ね合わせとしても存在するだろう。

粒子か波か？

どちらの見方も等しく妥当なものである。

【70】単純な量子系に温度依存性がないことは、生細胞を見る際に頭に入れておくべき重要なことである。量子跳躍、量子の重ね合わせ、不確定性、測定に影響される力学などの現象はすべて、たとえ高温であっても単純な量子系において、保たれている。ただ、それらの現象は検出がむずかしいだけなのだ。

この陽子を体温まで暖めると何が起こるだろうか？

量子の特性を失って箱の中の実際の位置を占めるようになるだろうか？

そんなことは絶対はない！

それぞれの粒子が量子的振る舞いをするのに低温である必要はない。

箱を暖めると陽子の熱エネルギーは増加するが、その波動関数は箱全体を満たしつつける。ただ、一連の不連続な量子跳躍において波動関数の波長が短くなり、より高いエネルギー（再び $E=h\nu$ より）に適応しているだけで、陽子（粒子として見られる）は量子の重ね合わせとして存在しつつけている。

このように、単純な量子系に温度依存性がないことは、生細胞を見る際に頭に入れておくべき重要なことである。

よく、量子効果は超低温に限られるといわれるが、これは位相に依存する現象、たとえば多数の粒子のあいだに起こる干渉のような現象についてのみ当てはまることだ。

量子跳躍、量子の重ね合わせ、不確定性、測定に影響される力学などの現象はすべて、たとえ高温であっても単純な量子系において、保たれている。ただ、それらの現象は検出がむずかしいだけなのだ。

【71】絶対零度の箱に二つ目の陽子を加えるとどうなるだろう？ 二つ目の陽子も一つ目と同様、位置とエネルギー状態の重ね合わせとして存在するだろう。それらの陽子はコヒーレントに（位相の合った状態で）一つの量子調和振動子として振動する。では、箱を暖めてみると何が起こるだろう？ 最初、二つの陽子は同位相で振動しつづけ、コヒーレントのままであるが、さらに大きな熱振動が起こると、それらはしだいに位相がずれて、デコヒーレントの状態になるだろう。

絶対零度の箱に二つ目の陽子を加えるとどうなるだろう？ 二つ目の陽子も一つ目と同様、位置とエネルギー状態の重ね合わせとして存在するだろう。すべての陽子は、同じ基底準位エネルギーをもっていて区別できないので、量子力学の法則によってそれらは異なる位相で振動することができず（異なる位相で振動すれば、それらは区別可能になるため）、したがって、それらの陽子はコヒーレントに（位相の合った状態で）一つの量子調和振動子として振動する。

では、箱を暖めてみると何が起こるだろう？ 最初、二つの陽子は同位相で振動しつづけ、コヒーレントのままであるが、さらに大きな熱振動が起こると、それらはしだいに位相がずれて、デコヒーレントの状態になるだろう。

陽子がデコヒーレントになるためには、箱はどれくらいの熱を得なければならないのだろうか？

【72】ロスアラモス国立研究所のズーレックは、単純な量子系に対するデコヒーレンス時間を見積もるために用いる方程式を導き出した。

ロスアラモス国立研究所のズーレックは、単純な量子系に対するデコヒーレンス時間を見積もるために用いる方程式を導き出した。

この方程式はいくつかの因数に依存する。最初の因数は、質量である。

騒がしい生徒が多い大人数のクラスを指導ことは、少人数のクラスを指導するよりもずっとむずかしい。コヒーレントな動きも同じで、多数の粒子よりも少数の粒子に対して維持するほうがはるかにやさしい。

したがって、質量が増えるとデコヒーレンス時間が減少する傾向がある。

二つ目の因数は、量子状態の変位である。

もし、粒子どうしの位置が遠く離れていれば、それらはより早くデコヒーレンスになる。

三つ目の因数は、温度である。

原子や分子が熱くなるに従って、それらのランダムな揺れが、たがいの位相の関係を壊しやすくなる。

すなわち、温度が上がるほどデコヒーレンス時間は短くなる。

四つめの因数は、その系の柔軟性である。

堅い系のほうが、はるかに長くコヒーレントな振動を維持する。

音叉がゴムではなく金属でできているのはそのためだ。

最後の因数、つまり量子系の柔軟性は生物系においても重要だと思われるが、不幸にもその評価がもっともむずかしい。

系の柔軟性は、系の異なった状態のあいだにあるエネルギー障壁に関係するあらゆる種類の因数に依存する。

生細胞の細胞質内にくっついた複雑な生体分子に対して、それらを見積もることはとてもむずかしい。

【73】それによれば、量子系における質量が10倍になれば、デコヒーレンス時間は100（10の二乗）分の1に減少する。したがって、量子コヒーレンス効果が大きな物体に現われなくても驚くには値しない。

この方程式は比較のおおざっぱであり、単純な系に対してもそのパラメーターの多くは見積もることしかできないが、世界中の研究所での実験に対して十分に通用するデコヒーレンス速度の予想を与えてきた。

原子レベルの距離だけ離れた陽子あるいは電子は、たとえ室温でもかなり長時間、コヒーレントのままであると予想される。

猫などの大きな物体のデコヒーレンス時間ははるかに短い、それはおもに質量が増加したせいである。

実際、ズーレックの方程式の分母には、質量の二乗が使われる。

量子系における質量が10倍になれば、デコヒーレンス時間は100（10の二乗）分の1に減少する。

質量が100万倍に増えれば、デコヒーレンス時間は1兆（10の12乗）分の1に減少する。

したがって、量子コヒーレンス効果が大きな物体に現われなくても驚くには値しない。

10の30乗個もの分子からなる猫に対するデコヒーレンス時間は、1ミリ秒の1兆分の1以下になるだろう。

【74】デコヒーレンス時間の見積もりによって、量子的世界と古典的世界とのあいだにおおまかな境界を引くことはできる。量子跳躍、不確定性、そして量子の重ね合わせさえもがこの境界を越えて持続するかもしれないが、その証拠を見つけることはむずかしい。生細胞を見るときに頭に入れておくべきもうひとつの重要な点は、デコヒーレンスは下のほうまでずっとそうなのではないということだ。猫の中の個々の電子や陽子はあらゆる温度で量子レベルの現象を示しつつづけているだろうということだ。

しかしながら、デコヒーレンスの見積もりにも限界はある。とりわけ、スーレックの方程式は、とても単純な系にしかうまく適用できない。

とくに、超伝導体などいくつかの複雑な物質は、比較的高温でも量子コヒーレンスを保てることが知られている。

だが、デコヒーレンス時間の見積もりによって、量子的世界と古典的世界とのあいだにおおまかな境界を引くことはできる。

ただし、この境界は、位相に依存する現象にのみ厳密に適用するものである。

量子跳躍、不確定性、そして量子の重ね合わせさえもがこの境界を越えて持続するかもしれないが、その証拠を見つけることはむずかしい。

生細胞を見るときに頭に入れておくべきもうひとつの重要な点は、デコヒーレンスは下のほうまでずっとそうなのではないということだ。

つまり、猫ぐらいの大きさの暖かい物体に量子レベルの現象を見ることはできないが、猫の中の個々の電子や陽子はあらゆる温度で量子レベルの現象を示しつつづけているだろうということだ。

もし、猫の中のある一対の陽子を調べることができたなら、空箱の中の一対の陽子と同じ干渉現象を見ることができよう。

干渉項が消滅するのは、大きな物体のバルク（かたまり）全体を考えたときだけである。

したがって、量子効果はこの世の大きな物体から消えたわけではない。ただ見つけるのがむずかしくなっただけなのだ。

【75】電子技術者が量子レベルの現象を扱わねばならなくなったのはここ最近のことだが、天然のナノスケール素子である細胞は、何十億年も前からこれらの現象に直面してきたのである。

電子技術者と同じように、細胞も量子レベルの効果を扱うことを学び、そして自身の目的のために量子力学を利用する必要があったのだ。

量子効果はもちろん、生物学的現象に限られるものではない。

電子技術者は、次世代コンピュータのためのナノスケールのマイクロエレクトロニクス素子をつくる時に、量子レベルの効果（とくに量子的干渉）を取り扱わなければならない。

しかし、生細胞はすでにこのようなレベルで動いているのである。電子や陽子を輸送するミトコンドリアは直径1ミクロン（1メートルの100万分の1）以下であり、大半の作用が行なわれる細胞膜の幅は約40ナノメートル（1メートルの10億分の40）しかない。

DNAの二重らせんの断面の大きさはたった2ナノメートル（摂氏600度ぐらいの高温で量子効果を示すC₆₀フラーレン分子とほぼ同じ大きさ）であり、大きなタンパク質のサブユニットでさえ通常はせいぜい20ナノメートル程度である。

これらの構造は、生細胞の電子的成分である。

電子技術者が量子レベルの現象を扱わねばならなくなったのはここ最近のことだが、天然のナノスケール素子である細胞は、何十億年も前からこれらの現象に直面してきたのである。

電子技術者と同じように、細胞も量子レベルの効果扱うことを学び、そして自身の目的のために量子力学を利用する必要があったのだ。

以下では、細胞がいかに量子レベルの現象を利用して方向性のある作用を行なっているかを探ることにする。

だが、まず最初に細胞における量子力学の限界を見いだしておく必要がある。

細胞の底への航海

【76】細菌細胞がもっとも単純なので、そこから始めるのがいちばん簡単だ。たいていの細菌は非常に小さく、長さが1000分の1ミリメートルぐらいなので、肉眼で見ることにはできない。

量子的世界と古典的世界との境界は、細胞レベルよりも下になければならない。その場所を見つけるためには、生きている細胞の中を見てもみる必要がある。

細菌細胞がもっとも単純なので、そこから始めるのがいちばん簡単だ。たいていの細菌は非常に小さく、長さが1000分の1ミリメートルぐらいなので、肉眼で見ることにはできない。

生きたままの細胞を観察するための技術はいろいろあるが、どれも量子レベルの事象を探るために必要とする解像度を与えてくれない。そこで、1966年の古い映画「ミクロの決死隊」の方法を拝借することにする。

われわれは、1ナノメートルの10分の1程度、つまり大腸菌細胞よりもはるかに小さなサイズまで縮んで、人間に飲み込まれたと想像してみよう。

映画の主人公と同じように、小さな潜水艦に乗り込んでミクロの旅をする。

魚雷の形をした大腸菌が、大腸の中を泳ぎ回っている。

大腸菌は細菌の後ろ側に付いた棒状のタンパク質の束（鞭毛）を一種の外付けモーターのように回転させることによって、大腸の中を自由に動き回ることができる。

われわれは速度を大腸菌に合わせて、ゆっくりとその表面に降りていく。

【77】細胞質の中には、細胞機能のさまざまな部品が漂っている。すなわち、タンパク質のリボンを大量生産するリボソームや、ある種のタンパク質を細胞膜を通して細胞外に出す輸送機構、細胞の回転する鞭毛に動力を与える回転エンジン、そして内膜の下につながっているのは陽子から動力を得てATPをつくるタービンエンジンである。

いよいよ細菌細胞の内部に入り込む。

最初に気づくのは、細胞の内部を移動するために潜水艦のエンジンをかなり激しく動かさなければならないということだ。

これは、細胞の内部、すなわち細胞質の中の水にあまり流動性がないためだ。

水の多くは巨大なタンパク質のかたまりにしっかりと結合している。

わずかな自由水も高度に組織化され、固体でもなければ完全な水でもない、いわばゼリー状になっている。

細胞質の中には、細胞機能のさまざまな部品が漂っている。

すなわち、タンパク質のリボンを大量生産するリボソームや、ある種のタンパク質を細胞膜を通して細胞外に出す輸送機構、細胞の回転する鞭毛に動力を与える回転エンジン、そして内膜の下につながっているのは陽子から動力を得てATPをつくるタービンエンジンである。

細胞の中心には、機能の中枢であるコイル状に巻かれたDNAがある。

細胞の単一染色体のほとんどは休止状態にあり、きっちりと巻かれてタンパク質に包まれている。

しかし、活性DNAのループは忙しそうに、リボソームに遺伝コードを運ぶメッセンジャーRNAの構築を指示している。

一つのDNAループが、内膜にくっついたタンパク質の輪を通して引っ張られている。

DNAループがタンパク質の輪に通されると、二重らせんが引き離され、古いDNA鎖を鋳型として新しい二本鎖DNAがつくられる。

【78】細胞内において量子と古典の境界を探するための最初の標的となるのは、細胞の多くのタンパク質のうちの一つ、 β -ガラクトシダーゼとよばれる酵素分子の一部をなす陽子である。この酵素の仕事は、二糖類の乳糖すなわちラクトースを加水分解、すなわち水と反応させて、構成単位であるグルコースとガラクトースにすることである。

細胞内において量子と古典の境界を探するための最初の標的となるのは、細胞の多くのタンパク質のうちのひとつ、 β -ガラクトシダーゼとよばれる酵素分子の一部をなす陽子である。

この酵素は細胞内の他のタンパク質と同じように見える。
すなわち、約1000個のアミノ酸でできたアミノ酸のひもが堅く結ばれた束になっている。

しかし、この酵素はいま不活性状態である。
この酵素の仕事は、二糖類の乳糖すなわちラクトースを加水分解、すなわち水と反応させて、構成単位であるグルコースとガラクトースにすることである。

しかし、この大腸菌の宿主である人間は、朝食以来牛乳を飲んでおらず、いまはもう夜中である。
明日の朝、朝食のシリアルとともに次のラクトースが到着するまで、この酵素はすることがない。

われわれが侵入した細胞は、しばらく何も食べずにいたので、栄養の蓄えを使い果たしてしまった。
そこで、細胞はエネルギーを節約するために、ラクトースが到達するまで一種の休眠状態（休止状態）に切り替わる。

【79】われわれの情報では、 β -ガラクトシダーゼ酵素のアミノ酸の一つの上に標的となる陽子が存在する。この陽子（水素原子の原子核）は、アミノ酸分子の酸素原子に共有結合によってくっついている。また、その近くには窒素原子が存在し、この窒素原子も酸素原子と同様に比較的多くの電子をもっていて、標的陽子を捕らえようとしている。もし、十分なエネルギーが与えられれば、標的陽子は酸素原子の電子の引きから逃れて窒素原子に飛び移るかもしれない。われわれの標的陽子が、測定されるまでは量子の重ね合わせ状態に存在するという、量子的な粒子であることはまったく明らかだ。

われわれの情報では、 β -ガラクトシダーゼ酵素のアミノ酸の一つの上に標的となる陽子が存在する。

この陽子（水素原子の原子核）は、アミノ酸分子の酸素原子に共有結合によってくっついている。
また、その近くには窒素原子が存在し、この窒素原子も酸素原子と同様に比較的多くの電子をもっていて、標的陽子を捕らえようとしている。

もし、十分なエネルギーが与えられれば、標的陽子は酸素原子の電子の引きから逃れて窒素原子に飛び移るかもしれない。

ここで、体温においては周囲の熱エネルギーによって50パーセントの確率で、一つの原子から別の原子へ飛び移るものと計算されるとしよう。

もし、その後しばらくして、なんらかの超強力電子顕微鏡を使って陽子の位置を定めたとすれば、それは、調べた回数約50パーセントでは酸素原子にくっついたままであり、残り50パーセントでは窒素原子にくっついていることが見いだされるだろう。

われわれの任務は、次の疑問の答を見いだすことだ。
この陽子は、量子的領域と古典的領域のどちらに住んでいるのか？
あるいは、この質問を言い換えて、この陽子の位置は実在のものだろうか？

われわれの標的陽子が、測定されるまでは量子の重ね合わせ状態に存在するという、量子的な粒子であることはまったく明らかだ。

粒子を記述する波動関数の収縮のために、観測者としてのわれわれの存在が必要となるコペンハーゲン解釈は避けて、標的陽子が複雑な環境と相互作用してデコヒーレンスをもたらすことによって観測者なしの測定を起こす証拠を探すことにする。

だが、細胞内の陽子のデコヒーレンスを起こすためには、どれぐらいのレベルの相互作用があれば十分だろうか？
標的陽子は量子と古典の境界の上下どちらにいるのだろうか？

量子の境界

【80】シュレーディンガーは、デコヒーレンスは生体組織の中でいくらか抑えられ、高温でも量子的法則に従うことができるという見解を示した。核磁気共鳴（NMR）の技術は、磁場の中で陽子を動かしてから弛緩させるというものだ。陽子が元の状態に戻るまでの時間が、陽子の柔軟性のおおまかな尺度となる。タンパク質やDNAのような生物分子内に埋め込まれている陽子は、測定するのはむずかしいが、弛緩時間がずっと長く、したがって、デコヒーレンス時間も長いと考えられる。

『生命とは何か』の中でシュレーディンガーは次のように述べている。
「生体組織とは、温度が絶対零度に近づき分子の不規則さがなくなるにつれて、すべての系が従う純粋に機械的な（熱力学と対照的な）動きに、その動きの一部が近づく巨視的な系であると考えられる」。

前に考察したように、絶対零度とは、デコヒーレンスが完全に抑えられて、すべての物質が量子の法則に従う温度である。

したがってデコヒーレンスは生体組織の中でいくらか抑えられ、高温でも量子的法則に従うことができるという見解を示した。

残念ながら、われわれはシュレーディンガーに頼って細胞内の量子と古典の境界を見つけないことはできない。
代わりに、見積もったデコヒーレンス時間を調べることが必要だ。

残念ながら、ズートレックの方程式を、生細胞内の陽子のデコヒーレンス時間を導出するために直接使うことはできない。
不明なことが多すぎるからだ。

だが、ズートレックの方程式を使うことで、重要と思われる因数に関するいくつかの指針を得ることができる。

明らかに、質量と温度は、量子コヒーレンスに対して逆に作用する。典型的なタンパク質は、一個の陽子の何千倍もの質量をもつので、そのデコヒーレンス時間はそれに応じて減少する。

一方、タンパク質内の変位距離は小さいため、これはコヒーレンスを保つ方向にはたらく。

また、生物系では高密度の静電力のために柔軟性もきわめて制限される。

細胞内の陽子の自由度の制限については、核磁気共鳴（NMR）とよばれる技術を使って、ある程度知ることができる。

この技術は、磁場の中で陽子を動かしてから弛緩させるというものだ。陽子が元の状態に戻るまでの時間が、陽子の柔軟性のおおまかな尺度となる。

細胞の中の陽子は、弛緩するまでに数ミリ秒から数十秒ほどを要する。このことから、細胞内マトリックスは、その化学的組成のみから予想されるよりも堅いことが示される。

そのうえ、陽子NMRは細胞内の水分子にくっついた大多数の陽子に対する弛緩時間しか測定しない。

タンパク質やDNAのような生物分子内に埋め込まれている陽子は、測定するのはむずかしいが弛緩時間がずっと長く、したがって、デコヒーレンス時間も長いと考えられる。

【81】生体系における量子コヒーレント現象に関してはいくつかの論文があり、デコヒーレント時間が長いことを示唆している。電子のトンネル現象（もちろん量子現象である）は、呼吸や光合成、そして多くの酵素メカニズムにおいて電子を輸送する役割を果たしていると広く考えられている。位相のコヒーレンスは電磁場のゆらぎの影響を受けやすいため、細胞の中のコヒーレントな振動がこの弱い力の場の標的になっている可能性はある。

生体系における量子コヒーレント現象に関してはいくつかの論文があり、デコヒーレント時間が長いことを示唆している。

カリフォルニア大学のS・ギダーは、鉄を運ぶフェリチンとよばれるタンパク質における量子磁気現象を検出した。

電子のトンネル現象（もちろん量子現象である）は、呼吸や光合成、そして多くの酵素メカニズムにおいて電子を輸送する役割を果たしていると広く考えられている。

弱い電磁場は生体系に驚くべき効果を与えることが示されてきた。それは、線虫の成長を促進するというものから、遺伝子の発現レベルを変えたり、あるいは細胞のアポトーシス（一種の細胞の自殺）を防ぐというものまでである。

従来からの電磁誘導効果のいくつかを用いて、このような弱い力の場がどうやって影響をもたらすかを説明することは非常にむずかしい。

しかし、位相のコヒーレンスは電磁場のゆらぎの影響を受けやすいため、細胞の中のコヒーレントな振動がこの弱い力の場の標的になっている可能性はある。

【82】デコヒーレンスを考えるための有用な方法は、量子系の状態に関する情報が複雑な環境に漏れることを基準にすることだ、とすでに記述した。二重スリット実験では、環境に漏れ出してデコヒーレンスを起こしたのは「どちらの経路？」という情報だった。今回の陽子に対する情報は「陽子はどちらに行ったか」ということになる。この陽子が移動すると、陽子の位置シフトとそれに伴う電場の再形成によって酵素の構造が変化するかもしれないが、その変化が小さすぎ、デコヒーレンスを起こすには不十分だろう。

デコヒーレンスを考えるための有用な方法は、量子系の状態に関する情報が複雑な環境に漏れることを基準にすることだ、とすでに記述した。

二重スリット実験では、環境に漏れ出してデコヒーレンスを起こしたのは「どちらの経路？」という情報だった。

今回の陽子に対する情報は「陽子はどちらに行ったか」ということになる。
酸素原子のところか、それとも窒素原子のところか？

まず最初に、われわれの標的陽子の位置がタンパク質やそのまわりの細胞に対して何の意味ももっていない場合を想像してみよう。
たぶん細胞の中には、このような状態の陽子がとてもたくさんあるだろう。

この陽子は、タンパク質分子の隅っこにあるアミノ酸鎖の中にあって、球状の分子構造の中に埋もれており、酵素の触媒活性には何の役割も果たさない。

この陽子が移動すると、陽子の位置シフトとそれに伴う電場の再形成によって酵素の構造が変化するかもしれないが、その変化が小さすぎ、デコヒーレンスを起こすには不十分だろう。

この陽子の位置は、外部環境と絡み合うことはない。
小さい潜水艦の操縦席から標的陽子を好きなだけ眺めていても、細胞環境中のその粒子の位置に関する情報は何も見つけられないだろう。
情報の漏れがなければデコヒーレンスは阻止され、陽子は量子の重ね合わせとして曖昧なままでありつづけるだろう。

【83】しかし、細胞内の多くの陽子の位置は、そんな取るに足りないものではないだろう。酵素は、自身の粒子すなわちアミノ酸にくっついていて電子や陽子を基質にぶつけることによって触媒作用を起こしているのだ。したがって、酵素の電子や陽子の正確な位置は、その酵素活性にとってきわめて重要である。われわれの標的陽子がβ-ガラクトシダーゼ酵素の461番目のアミノ酸であるグルタミンの酸素原子に結合していると想像してみよう。

もし、この陽子が近くの窒素原子のほうに行ってしまったとしたら、それを基質に発射することができないために酵素ははたらかない。この酵素は、基質となるラクトースがあるときには、自身の陽子の位置を測定することができるのだ。

しかし、細胞内の多くの陽子の位置は、そんな取るに足りないものではないだろう。酵素は、基質の電子や陽子を動かすことによって反応を触媒するタンパク質だということを出してほしい。酵素は、自身の粒子すなわちアミノ酸にくっついて電子や陽子を基質にぶつけることによって触媒作用を起こしているのだ。

したがって、酵素の電子や陽子の正確な位置は、その酵素活性にとってきわめて重要である。

そこで、われわれの標的陽子がβ-ガラクトシダーゼ酵素の461番目のアミノ酸であるグルタミンの酸素原子に結合していると想像してみよう。

この陽子は酵素活性にとってとくに重要である。というのも、ラクトース分子の中心にこの陽子を発射して、化学結合を不安定化することによってラクトースの分解が開始されるからである。

もし、この陽子が近くの窒素原子のほうに行ってしまったとしたら、それを基質に発射することができないために酵素ははたらかない。そこで、この酵素は、基質となるラクトースがあるときには、自身の陽子の位置を測定することができるのだ。

【84】しかし、どうやればラクトースの分解が見えるのだろうか？ さいわい、それは簡単である。生成物は複雑な代謝経路に入り込んでさらに分解され、電子は集められてATPをつくる呼吸鎖に供給される。生じたATPのエネルギーは、細胞によってさまざまなところで用いられる。そのどの可能性をとっても、細胞の内側あるいは外側の無数の粒子の位置とエネルギーを大きく変化させるものであるため、それは簡単に見いだせるだろう。もし、こうした古典レベルの事象のいずれかを目撃すれば、標的陽子は酸素原子にくっついていてと確定できるだろう。こうした事象がないこと場合には、陽子は窒素原子にくっついていていことがわかるであろう。

しかし、どうやればラクトースの分解が見えるのだろうか？

さいわい、それは簡単である。

なぜなら、ラクトースの分解は、グルコースとガラクトースが生成しても止まらないからである。

生成物は複雑な代謝経路に入り込んでさらに分解され、電子は集められてATPをつくる呼吸鎖に供給される。

生じたATPのエネルギーは、細胞によってさまざまなところで用いられる。

そのエネルギーは、細胞を休眠状態から起こすことができる。

また、細胞の鞭毛モーターを動かすためのエネルギーとして与えることもできる。

細胞分裂や新しいタンパク質の生合成にも、このエネルギーが使われる。

そのどの可能性をとっても、細胞の内側あるいは外側の無数の粒子の位置とエネルギーを大きく変化させるものであるため、それは簡単に見いだせるだろう。

もし、こうした古典レベルの事象のいずれかを目撃すれば、標的陽子は酸素原子にくっついていたと確定できるだろう。

同様に、こうした事象がないことは、標的陽子の位置のゼロ測定を構成するであろう。

つまり、この場合には、陽子は窒素原子にくっついていることがわかるであろう。

【85】生細胞はその内部で、自身の粒子の測定すなわち内部量子測定を行なう。

注目すべき重要な点は、われわれの標的陽子はラクトースが細胞内で利用できるときにのみ測定可能になるということだ。量子測定は、細胞の状態による条件付きなのである。

生細胞はその内部で、自身の粒子の測定すなわち内部量子測定を行なう。

注目すべき重要な点は、われわれの標的陽子はラクトースが細胞内で利用できるときにのみ測定可能になるということだ。

もしラクトースがなければ、この陽子の位置は細胞にとってどうでもよいことであり、粒子の位置に関する情報は周囲の細胞に漏れ出さない。

細胞をどんなにじっと眺めてみても、その陽子が酸素原子と窒素原子のどちらに付いているのかをみわけることができない。

こうした状況下ではデコヒーレンスは抑えられ、陽子は量子の重ね合わせのままでありつづける。

量子測定は、細胞の状態による条件付きなのである。

【86】他のタンパク質に対しては、細胞が内部量子測定を行ないうるかどうかに影響するのは、異なる基質あるいは温度、光、明るさ、あるいはその他あらゆる物理的パラメーターであるかもしれない。また、測定されるのは粒子の位置とは限らない。エネルギーや運動量、スピン、またはあらゆる量子特性に対する実際の値も同様に、量子測定に対する条件付きである。

もちろん、 β -ガラクトシダーゼ酵素の内部量子測定の標的としての役割は、何も特別なことではない。

平均的な細菌細胞は1000種類以上のタンパク質を生成することができ、それぞれのタンパク質は活性部位の中でバランスをとる基本的粒子をもち、細胞による量子測定を受けるのである。

われわれの標的酵素にとって、内部量子測定は、細胞内にラクトースが存在するという条件付きであった。

他のタンパク質に対しては、細胞が内部量子測定を行ないうるかどうかに影響するのは、異なる基質あるいは温度、光、明るさ、あるいはその他あらゆる物理的パラメーターであるかもしれない。

また、測定されるのは粒子の位置とは限らない。

エネルギーや運動量、スピン、またはあらゆる量子特性に対する実際の値も同様に、量子測定に対する条件付きである。

細胞内の粒子と環境の絡み合った鎖は、生細胞がその中で起こるあらゆる種類の量子事象に対して特異的な感度をもつことを確実にする。

【87】われわれの使命は、細胞内の量子領域と古典領域の境界を見つけることであった。発見したことは、細胞の中には固定された境界は存在せず、むしろ境界は細胞の状態と利用可能な資源に依存して、細胞機能の階層を上下に移動するということである。

われわれの使命は、細胞内の量子領域と古典領域の境界を見つけることであった。発見したことは、細胞の中には固定された境界は存在せず、むしろ境界は細胞の状態と利用可能な資源に依存して、細胞機能の階層を上下に移動するということである。

飢餓状態の活動していない細胞においては、ほとんどの基本的な粒子は重ね合わせと干渉の量子的世界に沈んでいるだろう。

しかし、細胞に栄養を与えると、その量子測定装置には決定的粒子に対する密集した測定を可能にする器質が備わり、粒子に強制的に実在の値をとらせて古典的世界に移らせる。したがって、量子と古典の境界は細胞の中心部に押し下げられ、そこでは環境との相互作用から遮断された定まっていない粒子のみが量子的存在でありつづける。

量子細胞

【88】生物学が基本的粒子のレベルに到達したいま、われわれは量子細胞と向き合わなければならない。この量子細胞は、量子的状態と古典的状态の動的モザイクとして表わされる。粒子はもはや独立した存在ではなく、内部量子測定の生成物として考える必要がある。量子力学はわれわれに、基本的粒子から目を上げて、それらを測定する環境を調べるよう指示している。

細胞内の力学に対する古典的な観点（この観点はまだ、たいていの生物学者が支持している）は、細胞内空間の独立した軌跡を進む古典的粒子のそれであった。

この観点のために、生化学者や遺伝学者は、細胞をより細かい部分にどんどん分解していく還元主義のプログラムを全面的に受け入れ、それによってますます高レベルの理解が得られると期待した。

しかしながら、生物学が基本的粒子のレベルに到達したいま、われわれは量子細胞と向き合わなければならない。

この量子細胞は、量子的状態と古典的状态の動的モザイクとして表わされる。

粒子はもはや独立した存在ではなく、内部量子測定の生成物として考える必要がある。

量子力学はわれわれに、基本的粒子から目を上げて、それらを測定する環境を調べるよう指示している。

なぜそれが重要なのだろうか？

量子測定はそれが測定する系に対する際立った効果をもつことを前に述べた。

量子的粒子の測定は無害ではありえず、必ず力学に影響を及ぼす。

物理学者は通常的に量子測定を行なうことに従事しており、彼らが行なう、彼らが測定したいと望む特性に関する選択は、研究対象の系の挙動に影響を及ぼす。

だが、いま扱っているのは、自身の状態を測定する独立した量子測定装置としての細胞であるため、細胞が測定を望むものに関して行なう選択は細胞内部の力学に影響を及ぼす。

【89】細胞の環境が量子測定装置を得ることによって、その細胞が測定できるという特性が決定される。それは結果的に、細胞の内部の力学に影響するであろう。このことは、（自らを方向づける）ある選択を表わしている。しかし、少なくとも単純な生体系においては、このような選択を行なう能力はいかなる意識的な決定にも関係しない。にもかかわらず、私はこの量子選択を行なえる能力こそが、意識ある存在としてのわれわれの意志感覚の基礎をなすものと信じている。

私は大腸菌細胞や個々の動物細胞が自分たちの行動に対するなんらかの意志をもっているなどと思っているわけではない。

細胞の環境が量子測定装置を得ることによって、その細胞が測定できるという特性が決定される。

それは結果的に、細胞の内部の力学に影響するであろう。

このことは、ある選択を表わしている。

というのも、この影響は、内部の粒子の量子状態を測定できない無生物には与えられないからである。

しかし、少なくとも単純な生体系においては、このような選択を行なう能力はいかなる意識的な決定にも関係しない。

にもかかわらず、私はこの量子選択を行なえる能力こそが、意識ある存在としてのわれわれの意志感覚の基礎をなすものと信じている。

われわれはまず、すべての生細胞に対する量子選択の重要性について調べなければならない。

【90】酵素による量子測定は、われわれのすべての細胞の中で毎日行なわれているのである。われわれの細胞内の粒子の挙動には何が起こるのだろうか？

量子測定が生細胞内の粒子の挙動に影響しうるやり方はたくさんある。

しかし、酵素による量子測定は、われわれのすべての細胞の中で毎日行なわれているのである。

われわれの細胞内の粒子の挙動には何が起こるのだろうか？

起こりうる量子事象の連鎖に基づいて実行されるかもしれないし、されないかもしれない単純な作用について考えてみよう。

それはもしかすると、周辺に食物があるという信号に応答して細胞の鞭毛を動かすモーターに点火するために必要な反応かもしれない。

鞭毛に点火するためには何千個ものATP分子が必要であり、一回のラクトース加水分解で得られる60個やそこらのATPではぜんぜん足りないと考えられる。

そこで、この作用を起こすためには、われわれの β -ガラクトシダーゼ酵素に100個ものラクトース分子を加水分解してもらわなければならない。

それぞれの加水分解反応において、この酵素の活性部位にあるわれわれの標的陽子は酸素原子にくっついていなければならない。

もし、陽子が窒素原子のところに飛んでいってしまえば、ラクトースは加水分解されない。

それぞれのラクトース分子が酵素に出合ったときに加水分解される確率は50パーセント（陽子が酸素原子に付いている確率）である。

もし十分な時間が与えられれば、細胞は最終的には十分なラクトースを加水分解して鞭毛を動かすだろうが、われわれはここにもうひとつドラマを付け加えよう。

つまり、食物を早く取りにいかねばライバルに奪われてしまう、と想像するのだ。

別の細菌がすでに食物に向かって進みはじめているため、われわれの細胞は何とかして100個のラクトース分子すべてを一気に加水分解し、すばやくスタートを切らなければ間に合わないかもしれない。

だが、100個のラクトース分子が途切れることなく一気に加水分解される確率は、2の100乗すなわち約10の30乗分の1である。

【91】ラクトース分子の加水分解のたびに、陽子の位置が潜在的に測定されているのである。しかし、たいていの場合、この酵素は量子測定から無傷で戻り、再び自由に量子の世界に入ることができる。だが、いったん十分量のラクトースが加水分解されて細胞の鞭毛を点火できるようになると、細胞の量子状態は必然的に古典的レベルに増幅される。

古典的に考えると、この細胞が必要な作用を行なって、ライバルよりも先に食物に到達することはほとんどありえないだろう。

しかし、ここで再び多次元の風景への放浪に戻ろう。
今回の風景は二つの次元しかもたず、それぞれ酸素のところにある陽子と、窒素のところにある陽子に対応する。

鞭毛モーターのすばやい点火を成功させるための経路は、この二次元の量子風景を通るただ一本のとても細い道（100の酸素のところにある陽子のステップ）を表わす。

このステップは量子測定を受けるかもしれない。
この場合には、 β -ガラクトシダーゼ酵素が測定を行ないうる。

ラクトース分子の加水分解のたびに、陽子の位置が潜在的に測定されているのである。

しかし、たいていの場合、この酵素は量子測定から無傷で戻り、再び自由に量子の世界に入ることができる。

だが、いったん十分量のラクトースが加水分解されて細胞の鞭毛を点火できるようになると、細胞の量子状態は必然的に古典的レベルに増幅される。

細胞は、もし正しい順序の量子事象が行われれば、鞭毛に点火し、（宿主の）腸内を移動して、酵素の量子状態を不可逆的に崩壊させる古典的レベルにする。

【92】細菌や実際にほとんどすべての生物は実在性のまさに端っこで生きており、そこではほんの一つあるいは一連の量子事象が生存の危機に大きな影響を与えることもある。たいていの生物にとって β -ガラクトシダーゼ酵素はそんなに決定的な酵素ではないが、生物が重大な作用をうまく行なうことができるかどうかの鍵を握る酵素や物質の状態は他にもたくさんある。このような作用は量子測定を受ける。細胞環境との相互作用をたくさん含む測定ほど密集した測定になる。細胞はこのようにして環境と強く相互作用する活動のほうに自身を向かわせ、方向性のある作用を行なうのだ。

こうして再び、古典的領域への不可逆的な増幅にいたる一連の量子測定が行なわれる。

ここでも、逆ゼノン効果によって、最終測定につながる経路の確率を高めることができる。

偏光レンズによる一連の密集した測定によって、偏光角度の変わる経路にそって検出器のほうに進む光の確率を上げることができたのとまったく同様に、細胞の鞭毛モーターの点火に向かう経路にそった一連の密集した酵素の測定によって、その経路にそって細胞を捕らえてその作用の確率を増加させることができる。

細胞の鞭毛の点火は、最後の増幅ステップすなわち逆量子ゼノン効果の終点を表わし、そこで量子系は古典状態に崩壊する。

この細胞は量子測定を推進力として前進し、先に食物にありつくかもしれない。

つまり、方向性のある作用を行なうのだ。

β -ガラクトシダーゼ酵素このシナリオは何だか不自然に見えるかもしれないが、原理的にはあながち不可能ではない。

細菌や実際にほとんどすべての生物は実在性のまさに端っこで生きており、そこではほんの**一つある**いは**一連の量子事象**が生存の危機に大きな影響を与えることもある。

たいていの生物にとって β -ガラクトシダーゼ酵素はそんなに決定的な酵素ではないが、生物が**重大な作用**をうまく行なうことができるかどうかの**鍵**を握る酵素や物質的状态は他にもたくさんある。

このような作用は量子測定を受ける。

細胞環境との相互作用をたくさん含む測定ほど密集した測定になる。

細胞はこのようにして環境と強く相互作用する活動のほうに自身を向かわせ、方向性のある作用を行なうのだ。

【93】量子測定によって生細胞内の量子事象の確率をどれくらい高めることができるかは、その測定ステップの密集性と、測定前のデコヒーレンスに対する量子の重ね合わせ状態の強さと、そのステップをどれだけ容易に直交状態に分解できるかに依存する。しかし、量子測定は、生体組織が外部世界と相互作用しやすくなるような方法をたしかに与えてくれる。細胞内部量子測定によって、生細胞には内部粒子の挙動に生命独特のやり方で影響を与える能力が与えられる。この影響は、生体組織がいかにして古典的決定論の束縛を逃れているか、を理解するために重要である。生体組織の振る舞いは内部の量子力学の上でバランスをとっており、量子測定がそこに決定的なひと突きを与えることでその組織に**一つの道か別の道**を知らせて選択させ、方向性のある作用を行なわせることができるのだ。

ここで強調しておくが、私はその作用が行なわれる確率が増加することを示唆しているの**であって**、必ずしもその作用を100パーセントの確率で起こさせる方法を述べているわけではない。

量子測定によって生細胞内の量子事象の確率をどれくらい高めることができるかは、その測定ステップの密集性と、測定前のデコヒーレンスに対する量子の重ね合わせ状態の強さと、そのステップをどれだけ容易に直交状態に分解できるかに依存する。

しかし、量子測定は、生体組織が外部世界と相互作用しやすくなるような方法をたしかに与えてくれる。

細胞内部量子測定によって、生細胞には内部粒子の挙動に生命独特のやり方で影響を与える能力が与えられる。

この影響は、生体組織がいかにして古典的決定論の束縛を逃れているか、を理解するために重要である。

生体組織の振る舞いは内部の量子力学の上でバランスをとっており、量子測定がそこに決定的なひと突きを与えることでその組織に一つの道か別の道を知らせて選択させ、方向性のある作用を行なわせることができるのだ。

生きているとは何か

【94】悪魔が情報を得るために支払わなければならない代償は、つねに悪魔が減少させたエントロピーの量を上まわる。熱力学第二法則には悪魔も及ばないのだ。

細胞が内部の量子状態を捕らえることのできる独特の量子測定装置であるという見方から、再びマックスウェルの悪魔の話に戻ることになる。

その悪魔の仕事は、気体分子で満たされた箱の二つの部屋をつなぐ仕掛け戸を動かすことであつた。

悪魔がいなければ、気体分子はどちらの部屋にも同じように分布する。

だが、もし悪魔が戸を開けて、一方向、たとえば左から右にだけ分子を通し、反対方向、つまり右から左に移動する分子を止めてしまえば、悪魔は箱の中の気体分子を分けて、この系のエントロピーを減少させることができる。

この話の落とし穴は、このような離れ業をするために悪魔は分子の運動を検出し測定しなければならず、その測定の代償として情報が得られる代わりにエントロピーも増加してしまうというものだ。

悪魔が情報を得るために支払わなければならない代償は、つねに悪魔が減少させたエントロピーの量を上まわる。

熱力学第二法則には悪魔も及ばないのだ。

【95】細胞は量子測定装置を組み立てて維持するために、代謝というエントロピーの代償を支払っているのだ。これらの装置を使えば、細胞はマックスウェルの悪魔と同じように、細胞内部の低エントロピー状態を捕らえ、熱力学第二法則のランダム化の影響に抵抗して細胞の完全性を維持することができる。

しかし、この悪魔の行動は、細胞内の量子測定の役割と多くの共通点をもっている。

悪魔が箱の中の低エントロピー状態を捕らえるのと同じように、細胞内の粒子の量子測定は低エントロピー状態を捕らえる。

これにも代償があり、代謝がその代償なのだ。

呼吸と発酵という細胞内でエネルギーを生成するための反応はエントロピーの増加を表わし、エントロピーの等式のバランスをとる。

われわれの細胞は、高エントロピーの代謝排泄物、たとえば二酸化炭素や水や熱などを排出する。

細胞は量子測定装置を組み立てて維持するために、こうやってエントロピーの代価を支払っているのだ。

これらの装置を使えば、細胞はマックスウェルの悪魔と同じように、細胞内部の低エントロピー状態を捕らえ、熱力学第二法則のランダム化の影響に抵抗して細胞の完全性を維持することができる。

【96】内部量子測定を行なうことによって低エントロピー状態を捕らえることができるという細胞の能力は、生きていくということを意味する基本であると私は信じている。

内部量子測定を行なうことによって低エントロピー状態を捕らえることができるという細胞の能力は、生きていくということを意味する基本であると私は信じている。

生命を定義する標準的な基準リストには自己複製を含んでいるが、そうだとすると、元気旺盛なラバのような動物が死のカテゴリーに分類されてしまう。

われわれの体内にある神経細胞など多くの細胞は分裂することができないが、これらも同様に生のカテゴリーから排除されてしまう。

われわれの脳はとくに死んでいることになる。

逆に、たとえばコンピュータウィルスや不幸の手紙のような自己複製する存在を、生のカテゴリーから排除することもむずかしくなる。

リストにある他の項目、たとえば代謝などもうまく定義されていない。

【97】インフルエンザウィルスのような生物学的なウィルスは中間的な存在だ。というのは、単独のウィルス粒子は内部量子測定を行なうことができないからだ。その染色体内に生じるあらゆる変化は、量子のままである。しかし、ウィルスが人間の細胞に感染すると、これらの変化は古典的領域に増幅されうる。だが、そのときでさえ、ウィルスにコードされる命令に従うことによって量子測定を行なうのは、宿主である人間の細胞である。ウィルスはそれ単独では、本当に生きていくと考えることはできない。

しかし、内部量子測定を生命の主要な基準にすれば、こうした問題は消える。ラバも神経細胞も、内部量子測定を完璧にやってのける。不幸の手紙や火やコンピュータウィルスなどは完全に問題外である。

インフルエンザウィルスのような生物学的なウィルスは中間的な存在だ。というのは、単独のウィルス粒子は内部量子測定を行なうことができないからだ。その染色体内に生じるあらゆる変化は、量子のままである。

しかし、ウィルスが人間の細胞に感染すると、これらの変化は古典的領域に増幅されうる。だが、そのときでさえ、ウィルスにコードされる命令に従うことによって量子測定を行なうのは、宿主である人間の細胞である。ウィルスはそれ単独では、本当に生きていると考えることはできない。

【98】内部量子測定はわれわれが死んだときに失われる。細胞が量子測定を行なう能力にとって重要なのは、生細胞の環境と基本粒子が絡み合った鎖である。すべての量子コヒーレンス現象と同様、この鎖はとてもあやういもので、細胞の構造的完全性に依存している。この鎖を切れれば、ランダムな熱力学運動が急速に入ってきて、量子コヒーレンスを壊してしまう。量子コヒーレンスを失った死んだ細胞は、量子測定を行なうことも、熱力学第二法則のランダム化の影響に抵抗することもできなくなる。

また、内部量子測定はわれわれが死んだときに失われる。

細胞が量子測定を行なう能力にとって重要なのは、生細胞の環境と基本粒子が絡み合った鎖である。

すべての量子コヒーレンス現象と同様、この鎖はとてもあやういもので、細胞の構造的完全性に依存している。

この鎖を切れれば、ランダムな熱力学運動が急速に入ってきて、量子コヒーレンスを壊してしまう。

量子コヒーレンスを失った死んだ細胞は、量子測定を行なうことも、熱力学第二法則のランダム化の影響に抵抗することもできなくなる。

代わりにそれは、完全に古典的な無生物の物体に変わるだろう。

死とは、細胞内の量子測定を不可逆的に失うことなのだ。

【99】生命とは、熱力学的崩壊に対抗してその系の状態を維持する低エントロピー状態を捕らえるために内部量子測定を用いる系である。

このように、生命と内部量子測定は並存している。一方がなくなれば、他方もなくなる。

したがって、内部量子測定は生命を定義するだろうか？
完全にそうとはいえない。

というのも、生命のあらゆる「定義」と同様に、内部量子測定自体は生命独自のものではないからだ。
ガイガー計数器や原子爆弾のような準安定の装置もまた、内部の量子事象を検出することができる。

量子測定は生命に必要なものだが、生命を定義するには十分でない。

生命の定義をより完全なものにするために、私は次のことを付け足したい。

生命とは、熱力学的崩壊に対抗してその系の状態を維持する低エントロピー状態を捕らえるために内部量子測定を用いる系である。

量子進化

【94】生物がその作用に方向性を与える能力に量子測定が伴っているとしても、量子測定の影響を識別することはむずかしい。量子測定はほとんどの場合、ある特定の作用の方向に対して、ほんのかすかな、時には決定的な刺激を与えているだけだからだ。もし、ある作用が細胞内の遺伝性の物質を変化させたとしたら、その変化は細胞内に固定される。これが量子進化の基本である。

生物がその作用に方向性を与える能力に量子測定が伴っているとしても、量子測定の影響を識別することはむずかしい。

なぜなら、量子測定はほとんどの場合、ある特定の作用の方向に対して、ほんのかすかな、時には決定的な刺激を与えているだけだからだ。

その影響をもっとはっきりさせるためには、このかすかな刺激、あるいは方向性のある作用をなんらかの方法で固定しなければならない。

もし、ある作用が細胞内の遺伝性の物質を変化させたとしたら、その変化は細胞内に固定される。

これが量子進化の基本である。

【95】われわれの標的は、先に出会ったのと同じ酵素β-ガラクトシダーゼだが、今回の酵素は具合が悪そうだ。このβ-ガラクトシダーゼのどこが悪いのかを調べるには、細胞の中心にあるDNAのところまで降りていって、この酵素をコードする遺伝子を調べる必要がある。

再び小型潜水艦に乗って、別の大腸菌細胞の中に潜ってみよう。

われわれの標的は、先に出会ったのと同じ酵素β-ガラクトシダーゼだが、今回の酵素は具合が悪そうだ。

先のβ-ガラクトシダーゼは忙しくラクトース分子を分解して細胞を動かしていたのに、この酵素はやる気がなさそうだ。

このβ-ガラクトシダーゼ分子の中に漂ってくるラクトース分子は、何も変化せずに再び出てくる。

しかし、この β -ガラクトシダーゼの外見は以前に見た分子と変わらない。
同じように絡まり合ったアミノ酸の糸である。

この β -ガラクトシダーゼのどこが悪いのかを調べるには、細胞の中心にあるDNAのところまで降りて行って、この酵素をコードする遺伝子を調べる必要がある。

【96】野生型の遺伝子（正常に機能する遺伝子）は461番目のコドン（特定のアミノ酸をコードする三つ組の塩基）がグルタミンをコードするCTTであるのに対し、われわれの調べた遺伝子はそのコドンの配列がTTTになっている。野生型のCTTというDNA配列はRNAポリメラーゼ（メッセンジャーRNAをつくる酵素）によって転写されてメッセンジャーRNAでは相補配列GAAになるのだが、それが今回はAAAと転写されてしまう。野生型の配列はリボソームにグルタミンのコドンとして読み取られるが、変化したAAAというメッセンジャーRNA配列はリボソームにリシンを挿入するように命じる。

この β -ガラクトシダーゼの遺伝子は、約3000塩基対の長いDNA鎖の中に存在し、正常に転写されて、遺伝子の命令をリボソームに伝える短いメッセンジャーRNA鎖になっている。
リボソームもそのメッセージを正常に読み取れるようで、それを正常なたんぱく質へと翻訳している。

しかし、この遺伝子のDNA配列（A、T、G、Cの配列）を調べてみると、まちがいが見つかった。

野生型の遺伝子（正常に機能する遺伝子）は461番目のコドン（特定のアミノ酸をコードする三つ組の塩基）がグルタミンをコードするCTTであるのに対し、われわれの調べた遺伝子はそのコドンの配列がTTTになっている。

野生型のCTTというDNA配列はRNAポリメラーゼ（メッセンジャーRNAをつくる酵素）によって転写されてメッセンジャーRNAでは相補配列GAAになるのだが、それが今回はAAAと転写されてしまう。

野生型の配列はリボソームにグルタミンのコドンとして読み取られるが、変化したAAAというメッセンジャーRNA配列はリボソームにリシンを挿入するように命じる。

【97】しかし、461番目に位置するグルタミンは、ラクトース分子の中心に陽子を発射してラクトースの加水分解をひき起こす重要なアミノ酸だ。そのグルタミンをリシンに置換すると、酵素は不活性化してしまう。つまり、リシンの陽子は、ラクトースに発射するための正しい位置にないのだ。したがって、この β -ガラクトシダーゼをもつ細胞はラクトースを栄養にすることができず、もしラクトース以外に食物がなければ飢えてしまう。

しかし、461番目に位置するグルタミンは、ラクトース分子の中心に陽子を発射してラクトースの加水分解をひき起こす重要なアミノ酸だ。

そのグルタミンをリシンに置換すると、酵素は不活性化してしまう。
つまり、リシンの陽子は、ラクトースに発射するための正しい位置にないのだ。

したがって、この β -ガラクトシダーゼをもつ細胞はラクトースを栄養にすることができず、もしラクトース以外に食物がなければ飢えてしまう。

しかし、そこから抜け出す方法はある。

次に述べるように、DNA複製の誤りの原因のひとつはDNA塩基の互変異性にある。

【98】DNAのコード陽子は、DNA分子内で量子トンネル現象を起こすことができる、いや起こす必要がある。このために、DNA塩基は互変異性の構造になり、コード陽子がある原子から別の原子へ通り抜けることによって、異なる化学構造が形成される。互変異性のDNA塩基は、正しくない塩基と対になることができ、つまり、AがTと、CがGと対になる代わりに、AはGと、TはCと、対になることができる。

量子力学に特有の特徴のひとつは、ほとんどの状況下で、粒子の正確な位置を知ることができないことだ。

その位置は不確定である（は以前ベルグの不確定性原理）。

この不確定性は、陽子がある場所から別の場所へ通り抜ける、量子トンネル現象とよばれる現象の基礎である。

実際には、量子粒子はどこにも通り抜けたりしない。

それは、単なる避けられないハイゼンベルグの位置の不確定性であり、つまり、粒子は通常予想できない場所に現われるのである。

DNAのコード陽子は、DNA分子内で量子トンネル現象を起こすことができる、いや起こす必要がある。

このために、DNA塩基は互変異性の構造になり、コード陽子がある原子から別の原子へ通り抜けることによって、異なる化学構造が形成される。

互変異性のDNA塩基は、正しくない塩基と対になることができ、つまり、AがTと、CがGと対になる代わりに、AはGと、TはCと、対になることができる。

【99】正しくない塩基T（チミン）に集中してみよう。しかし、もしこのコード塩基のチミンが珍しいエノール構造であったとすれば、このエノールチミンはアデニンの代わりにグアニン（G）と対になることができる。したがって、RNAポリメラーゼは、メッセージャーRNAにアデニンの代わりにグアニンを挿入するだろう。

そうすれば、正しいコドンGAAが得られてしまう。このメッセージャーRNAはリボソームに命令して、461番目に正しいグルタミンをもった β -ガラクトシダーゼをつくらせることができる。その結果、得られる酵素は活性をもつ。

そこで、正しくない塩基T（チミン）に集中してみよう。

ふつう、RNAポリメラーゼがメッセンジャーRNAをつくるときには、この位置に相補的なA（アデニン）塩基を挿入し、その結果、AAAコドンが形成されてリボソームにリシンを挿入するよう命令するために、不活性の酵素ができる。

しかし、もしこのコード塩基のチミンが珍しいエノール構造であったとすれば、このエノールチミンはアデニンの代わりにグアニン（G）と対になることができる。

したがって、RNAポリメラーゼは、メッセンジャーRNAにアデニンの代わりにグアニンを挿入するだろう。

そうすれば、正しいコドンGAAが得られてしまう。

このメッセンジャーRNAはリボソームに命令して、461番目に正しいグルタミンをもったβ-ガラクトシダーゼをつくらせることができる。

その結果、得られる酵素は活性をもつ。

【100】 このように、たとえDNA配列がまちがっていても、細胞は野生型の酵素を少量つくることができる。しかし、ここで再び古典的な話に戻らなければならない。陽子は量子力学的な存在であり、量子測定によって置かれるまでは空間中の定まった位置を持つことができない。もし、DNA分子の上に標的陽子がとりうる位置が二つあれば、その陽子は両方の位置に量子の重ね合わせとして存在するにちがいない。量子測定はいつ陽子の位置を固定するのだろうか？

このように、たとえDNA配列がまちがっていても、細胞は野生型の酵素を少量つくることができる。

そのためには、酵素をコードする遺伝子の陽子が互変異（量子トンネル）の位置（福永注：チミンの位置）に移動した状態で、メッセンジャーRNAの合成に用いられれば良いのだ。

しかし、ここで再び古典的な話に戻らなければならない。

陽子は量子力学的な存在であり、量子測定によって置かれるまでは空間中の定まった位置を持つことができない。

もし、DNA分子の上に標的陽子がとりうる位置が二つあれば、その陽子は両方の位置に量子の重ね合わせとして存在するにちがいない。

量子的存在の波動と粒子の二重性を思い出せば、この陽子は二つの原子的位置の上にある波動（関数）と考えることができる。

（福永注：上の二行の表現には、著者の理解が行き届いていない面があるかもしれない。粒子がどちらかの位置にあるのが粒子性、両方の位置にあるのが波動性、前者は1か0の状態、後者は1も0もの状態だとすれば、この状況は、粒子と波動が両立する量子コンピュータ素子だと理解することもできるだろう）。

量子測定はいつ陽子の位置を固定するのだろうか？

【101】陽子は二重らせん構造の中に埋め込まれているため、その陽子が互変異性の位置に移動するときの小さい動きは、周囲の粒子をほんの少し変化させるにすぎず、デコヒーレンスを起こすにはまったく不十分である。再びデコヒーレンスが答を与えてくれる。DNAの陽子が複雑な環境に結合するたびに、デコヒーレンスが起る。しかし、どうやって？

再びデコヒーレンスが答を与えてくれる。
DNAの陽子が複雑な環境に結合するたびに、デコヒーレンスが起る。
しかし、どうやって？

陽子は二重らせん構造の中に埋め込まれているため、その陽子が互変異性の位置に移動するときの小さい動きは、周囲の粒子をほんの少し変化させるにすぎず、デコヒーレンスを起こすにはまったく不十分である。

だが、別の方法がある。
DNA塩基が量子の重ね合わせとしてメッセンジャーRNAに転写される時、そのメッセンジャーRNAも同じような状態の重ね合わせとして存在する（これはそうむずかしいことではない。RNAのコード配列はDNAコードと同じ陽子でできているため、それらは同じように正常な位置状態と互変異性の位置状態との重ね合わせとして存在する）。

RNAがリボソームに到着するとき、コード情報の量子の重ね合わせは、タンパク質配列の重ね合わせ、すなわち {標的アミノ酸の位置にリシンがあるために不活性なタンパク質になる β -ガラクトシダーゼ} (+/-) {標的アミノ酸の位置にグルタミンがあるために活性な野生型タンパク質になる β -ガラクトシダーゼ} をコードする。

この重ね合わせにはタンパク質が含まれるが、その選択肢のアミノ酸配列（461番目の位置のリシンまたはグルタミン）は、少数の粒子の小規模な原子的変位しか伴わない。少なくとも、短期的にはデコヒーレンスが避けられて、DNAをコードする陽子の位置状態を活性および不活性酵素の重ね合わせに絡ませることができるともかもしれない。この酵素の重ね合わせは、次に細胞の周囲環境に絡まるだろう。

【102】この絡み合いはデコヒーレンスをもたらずだろうか？ それは、細胞内にラクトースがあるかどうかにかかっている。

この絡み合いはデコヒーレンスをもたらずだろうか？

それは、細胞内にラクトースがあるかどうかにかかっている。

もしラクトースがなければ、この酵素が不活性状態でも活性状態でも変わりはない。仕事がないので、どちらの酵素形態も同じように不活性であり、重ね合わせのままでありつづける。

この両方の状態の酵素をコードするDNA陽子も同様に、重ね合わせのままだろう。このような状況下では、コード陽子と環境との絡み合いは最小限にとどまるため、デコヒーレンスは抑制される。

【103】しかし、細胞にラクトースが入ってくると、環境がコード陽子に絡まりはじめる。そして、DNAの標的陽子の位置状態は、ラクトース分子の位置とエネルギーやATPや細胞の状態や周囲環境と絡まっていく。このような複雑な環境との結合は、非常に迅速なデコヒーレンスをもたらし、細胞に標的陽子の位置を測定させる。

しかし、細胞にラクトースが入ってくると、環境がコード陽子に絡まりはじめる。

ラクトースは野生型の酵素によって分解されるが、不活性の酵素では分解されない。

細胞は、酵素が活性であれば動きはじめるが、不活性であれば休止状態のまま。

そして、DNAの標的陽子の位置状態は、ラクトース分子の位置とエネルギーやATPや細胞の状態や周囲環境と絡まっていく。

このような複雑な環境との結合は、非常に迅速なデコヒーレンスをもたらし、細胞に標的陽子の位置を測定させる。

したがって、細胞が染色体内の標的陽子の位置状態を測定できるのは、細胞中にラクトースがあるという条件付きである。

【104】細胞がそのコード陽子の量子測定を行なう能力は、陽子の挙動に影響を与える。DNA塩基の中の陽子の挙動は、生命に必要な突然変異という、もうひとつの重要な生物現象にかかわっている。

量子測定は量子的粒子の挙動に影響する。

したがって、細胞がそのコード陽子の量子測定を行なう能力は、陽子の挙動に影響を与える。DNA塩基の中の陽子の挙動は、生命に必要な突然変異という、もうひとつの重要な生物現象にかかわっている。

だが、DNA塩基の中の陽子の挙動は、生命に必要なもうひとつの重要な生物現象にかかわっていることを思い出してほしい。

それは、突然変異である。

もし、陽子がふつうの窒素原子に付いた状態で標的DNA塩基が複製されれば、DNAポリメラーゼは相補のアデニンを挿入し、娘DNA分子は親とまったく同じ不活性酵素をコードするだろう。

つまり、変異は起こらない。

しかし、もし陽子が互変異性（エノール）窒素原子に付いた状態でDNA塩基が複製されれば、DNAポリメラーゼは娘DNA鎖に相補でない塩基すなわちグアニンを挿入し、突然変異を起こさせる。

それは、重ね合わせではなくどちらかの位置に存在するはずの陽子に対して、量子測定を行なう必要がある。

そして、その測定は適切な環境条件（ラクトースの存在）の下でしか行なうことができない。

このように、条件付きの量子測定は、進化のエンジンである変異にまたがっているのだ。

【105】 標的遺伝子が変異を起こす頻度は、陽子の挙動に明らかに依存する。すなわち、その陽子が互変異性の窒素のところまでどれだけの時間を過ごすかということだ。互変異の位置にある標的陽子に対して密集した一連の測定が行なわれれば、量子ゼノン効果によって陽子の挙動をその位置に凍結することができる。ラクトース存在下での測定は、陽子が互変異性の位置にとどまる可能性を高くすることによって、変異の起こる割合を高めるかもしれない。

標的遺伝子が変異を起こす頻度は、陽子の挙動に明らかに依存する。すなわち、その陽子が互変異性の窒素のところまでどれだけの時間を過ごすかということだ。

その時間が短ければ変異はめったに起こらなくなるし、その時間が長ければ長いほど変異は起こりやすくなる。

互変異の位置にある標的陽子に対して密集した一連の測定が行なわれれば、量子ゼノン効果によって陽子の挙動をその位置に凍結することができる。

しかし、これまでに見いだしたとおり、もしラクトースが存在すれば、細胞自身がコード陽子に密集した一連の測定を行なうことができる。

このラクトース存在下での測定は、陽子が互変異性の位置にとどまる可能性を高くすることによって、変異の起こる割合を高めるかもしれない。

適応変異

【106】 環境が突然変異の確率を高めるというのは、まさにジョン・ケアンズが発見した現象である。ジョン・ケアンズの最初の実験は、ラクトースを栄養源にできない大腸菌細胞をラクトースを含む培地と含まない培地で培養するというものだった。ケアンズは、飢餓状態の続く条件下では、大腸菌がラクトースを利用できるようにする変異の頻度が増加することを見つけた。ラクトースが存在することによって、細胞がラクトースを食べられるようにする突然変異がとくに促進されたように見えた。大腸菌は、自身の突然変異に方向性をもたせることができるように見えた。

環境が突然変異の確率を高めるというのは、まさにジョン・ケアンズが発見した現象である。

ケアンズは適応変異という不思議な現象を発見した。

適応変異は、それが細胞にとって有利なときに頻度が高くなるが、これは、突然変異は進化的変化の方向に関してつねにランダムに起こる、とする標準的な新ダーウィン進化論と完全に矛盾する。

ジョン・ケアズスの最初の実験は、ラクトースを栄養源にできない大腸菌細胞をラクトースを含む培地と含まない培地で培養するというものだった。

標準的な新ダーウィン進化論に従えば、突然変異は進化的変化の方向に関してつねにランダムに起こるので、どちらの培地の細胞も同じ割合で突然変異を起こすことが期待される。

しかし、ケアズスは、飢餓状態の続く条件下では、大腸菌がラクトースを利用できるようにする変異の頻度が増加することを見つけた。

ラクトースが存在することによって、細胞がラクトースを食べられるようにする突然変異がとくに促進されたように見えた。

大腸菌は、自身の突然変異に方向性をもたせることができるように見えた。

この実験にはまだ多くの議論がある。

現在の生物学の考え方には厳格な新ダーウィン進化論が深く染み込んでおり、ほとんどの生物学者はその定説にいかなる修正を加えることも頑なに拒むのだ。

ケアズスの観察が正しいことは疑いようがないが、多くの学者は適応変異の存在を持ち出さなくても、もっとありきたりの方法でケアズスの実験を説明できるはずだと考えている。

だが、ロチェスター大学のバリー・ホールをはじめとする他の人々も、さまざまな細菌の系で適応変異を見いだした。

ホールは細菌の実験で、生育しない大腸菌細胞の同じ遺伝子中の二つのDNA塩基に対する突然変異の割合を測定した。

どちらの変異も利益をもたらさないときには同じ割合で突然変異が起こったが、片方が選択的な利益をもたらすときにはその変異の割合が増加した。

【107】量子進化は、条件付きの量子測定によって必要とされるフィードバックループ、すなわちラクトース→タンパク質→メッセンジャーRNA→遺伝子という経路を提供し、それによって適応変異を起こすのかもしれない。ラクトースは細胞の量子測定装置の準備を整え、細胞が β -ガラクトシダーゼ酵素をコードする(かもしれない)DNA陽子の位置を測定できるようにする。細胞はDNA塩基の位置についての密集した一連の測定を行ない、それによって陽子の挙動をかき乱し、突然変異の割合を増加させるだろう。このようにして、量子測定は有益な突然変異を促進し、適応変異をもたらして進化をひき起こすのではないだろうか。

適応変異の問題点は、それを説明できるメカニズムが提供されていないことだ。

細胞とその周囲環境の相互作用は、 β -ガラクトシダーゼのようなタンパク質のレベルで行なわれている。

細胞内の情報は通常、DNAからRNAへ、そしてタンパク質へと流れている。

β -ガラクトシダーゼなどの酵素をコードするDNAに、細胞の環境の情報（ラクトースがあること）をフィードバックできる経路は見いだされていない。
遺伝子→メッセンジャーRNA→タンパク質→ラクトースという経路は一方通行だ。

最近の論文でホールは、「未知の手段による突然変異の選択的発生は、拒絶できない、そして拒絶すべきではない種類のモデルである」と述べている。

量子進化は、条件付きの量子測定によって必要とされるフィードバックループ、すなわちラクトース→タンパク質→メッセンジャーRNA→遺伝子という経路を提供し、それによって適応変異を起こすのかもしれない。

細胞がDNAの二重らせんの中の基本的粒子の位置を測定できる能力は、細胞の周囲環境の組成、この場合にはラクトースの存在によって決まる。

ラクトースは細胞の量子測定装置の準備を整え、細胞が β -ガラクトシダーゼ酵素をコードする（かもしれない）DNA陽子の位置を測定できるようにする。

細胞はDNA塩基の位置についての密集した一連の測定を行ない、それによって陽子の挙動をかき乱し、突然変異の割合を増加させるだろう。

このようにして、量子測定は有益な突然変異を促進し、適応変異をもたらして進化をひき起こすのではないだろうか。

【108】この本を書いているとき（1997年）、ベセスダの米国立小児保健・人間発達研究所（NICHD）のワシーリー・オグリッコが、適応変異は量子力学の測定効果によってひき起こされる、と主張する論文を発表したばかりだということを私は知った。それとほぼ同時に、オレゴン大学のアミット・ゴスワミとデニス・トッドが発表した論文も、適応変異の現象の背後にある量子力学の測定効果に関するもので、量子測定は意識的選択の現象の背後にもあるのではないかと論じていた。

科学者が経験するもっともスリリングな瞬間のひとつは、これまで説明できなかった現象を説明できる新しいエキサイティングな方法がひらめいたときだ。

そして、もっともがっかりする瞬間のひとつは、それを他人に出し抜かれたときだ。

この本を書いているとき（1997年）、ベセスダの米国立小児保健・人間発達研究所（NICHD）のワシーリー・オグリッコが、適応変異は量子力学の測定効果によってひき起こされる、と主張する論文を発表したばかりだということを私は知った。

それとほぼ同時に、オレゴン大学のアミット・ゴスワミとデニス・トッドが発表した論文も、適応変異の現象の背後にある量子力学の測定効果に関するもので、量子測定は意識的選択の現象の背後にもあるのではないかと論じていた。

なぜ私がもっと早く自分のアイデアを発表しなかったのか、と思うかもしれない。私はそうしようとしたのだ。

だが不運なことに、私と共同研究者のジム・アルカリリが1996年に送った論文は、推論的すぎるという理由で却下された。

科学雑誌の編集者は当然のことながら、理論上の話になるとめったなことでは感銘を受けてくれないのだ。

そのころまでに、私は生物学の他の面での量子力学の役割に関するもっと幅広い論点に興味をもちはじめていた。

このようなより一般的な主題について論じるには、本を媒体としたほうが適切であると思われたため、私は論文の代わりにこの本を書きはじめた。

ワシーリーから届いた電子メールのメッセージは、自己満足していた私に衝撃を与えた。彼は、私が生物学における量子効果について述べたインターネット上の掲示板を見て、自分の論文について知らせるために連絡してきたのだ。

私と同様に、ワシーリーも自分のアイデアを発表するまでにずいぶん苦勞していた。彼は1994年にバークレーで開かれた記号論大会で自分の研究を紹介し、私よりも不屈の精神をもっていたために、ついに1997年に論文発表という形で報われたのである。

ワシーリーの成功に刺激されてジムと私は再び論文に戻り、ついにアメリカの雑誌『バイオシステムズ』を説得して1999年これを発表することができた。

【109】あらゆるアイデアにはふさわしい時があり、21世紀には量子生物学の開花が見られると私は予想している。いまわれわれは新たな冒険の出発点におり、これからは量子力学を通じて物理的および生物学的な科学が合成されてくると私は信じている。

あらゆるアイデアにはふさわしい時があり、21世紀には量子生物学の開花が見られると私は予想している。

その発端は、シュレーディンガーの『生命とは何か』（1944年）にまで遡ることができるが、この薄い本は多くの科学者（ジェームズ・ワトソンなど）を刺激して生命の物理的な基礎について考えさせたものの、その含意をすべて認識できるようになったのは、還元主義の生物学が進行して細胞を基本的な粒子のレベルまで解剖したあとのことだった。

いまわれわれは新たな冒険の出発点におり、これからは量子力学を通じて物理的および生物学的な科学が合成されてくると私は信じている。

一方で、電子技術者が一個の原子や一個の電子を操作してナノテクノロジー（細胞スケールの電子工学）素子を構築しており、このレベルでは必然的にその原材料の量子的性質に直面することになる。

また、生物学者は、細胞が何十億年ものあいだナノテクノロジーを行なっていて、量子の領域とうまくやり、またこれを利用する方法を知っているにちがいない、という事実を認めはじめている。

こうした糸がより集まって、新たなミレニアムの新たな学問分野をつくり出すことを私は信じている。

これからは、電子素子をどんどん用いて細胞内のはたらきを探索したり、生細胞と機械的素子との電子インタフェースを構築したりするだろうし、それは医学や生物学、そして電子工学に革命を起こすだろう。

生物学的生命と人工生命とのあいだの境界線はすぐにあいまいになり、ついには消えてしまうことすらあるかもしれない。
