

SFから学ぶ現代科学 レジюме

講師：吉田伸夫

0. SFと現代科学

SFとは、元々は科学的小説(Scientific Fiction)の意味で使われ、ジュール・ヴェルヌ『月世界旅行』(1865)など、未来に実現可能となる技術を利用する作品が多かった。最近でも、アンディ・ウィアー『火星の人』(2011)のような科学的小説は少なくない。

20世紀に入ってから、イギリスを中心にH.G.ウェルズやオラフ・ステープルドンが科学を素材とする思索的な作品を発表、70年代のニューウェーブ(バラード、オールディス、エリソン、ディレーニーらの小説)、80年代のサイバーパンク(ギブスンの小説や映画『ブレードランナー』など)の流行を経て、SFが芸術創作の重要な地位を占めるに至る。

現在では、思弁的小説(Speculative Fiction)、あるいは、「科学を取っ掛かりとして新しい世界観を構想する作品」を総称して、SFと呼んでいる。現代SFでは、相対論・量子論などの「常識を超える科学的知見」を基にした作品も多く見られる。

【講師紹介】

吉田伸夫：理学博士(東大院、素粒子論)、サイエンスライター

著 書(本講座と関連する一部のみ)

「人類はどれほど奇跡なのか 現代物理学に基づく創世記」(技術評論社、2023)

「この世界の謎を解き明かす 高校物理再入門」(技術評論社、2020)

「量子で読み解く生命・宇宙・時間」(幻冬舎新書、2022)

「時間はどこから来て、なぜ流れるのか？」(講談社ブルーバックス、2020)

「宇宙に「終わり」はあるのか」(講談社ブルーバックス、2017)

「光の場、電子の海 量子場理論への道」(新潮選書、2008)

※時間に関する新著も来春刊行予定

このレジюмеは、以下のアドレスで閲覧できます。

<http://scitech.raindrop.jp/resume/resume.pdf>

※「https://」ではなく「http://」です。

※「安全な接続ではない」とのメッセージが出ることがあります。

(安全なつもりですが、「http://」を使う旧式のプロトコルのため)

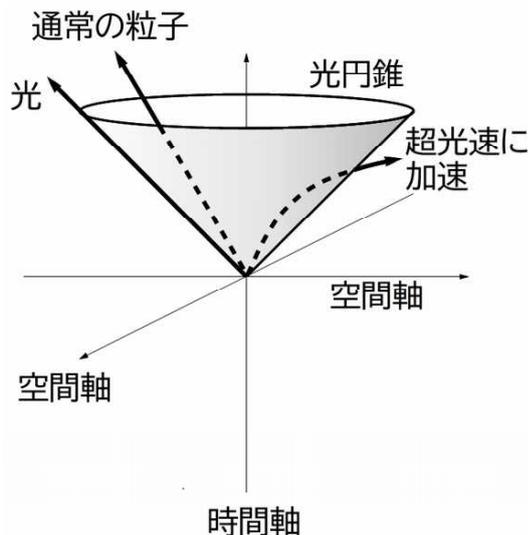
1 光速の壁を破る ワープ航法の真偽

【光円錐と粒子の軌跡】

○無重力の宇宙空間にフワフワ浮かんでいると、自分が止まっているか動いているか、判定できない。この性質を自然界の原理と見なすのが、「相対性理論」である。

○相対性理論によると、1次元の時間と3次元の空間は一体化して、4次元の「時空」を構成する。

○時間と空間の間には、幾何学的な性質に差異がある(ピタゴラスの定理における符号の違いなど)。このため、「光円錐」と呼ばれる時間と空間の境界面は、自由に行き来できない障害となる。光をはじめとするいくつかの物理現象は、この境界面に沿うようにして伝わるが、これが、自然界における最高速度となる。



→光速以上に加速することは不可能(SFでは、この限界を何とか超えようとする)

1-1 ワームホールを使ったワープ

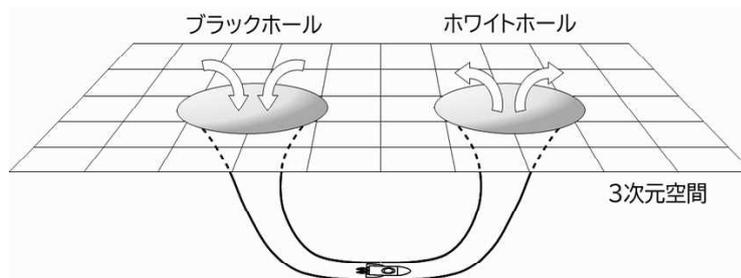
○一般相対論によれば、時空はゴムのように伸縮し変形する実体。

○方程式の解として、離れた2点を短絡する通路(ワームホール)もあり得る。

・映画『インターステラー』(クリストファー・ノーラン監督、2014)

○現実には、宇宙船の移動に利用するのは困難。

- ・新規に作るのは技術的に不可能
- ・天文学的観測では近傍に存在しない
- ・負のエネルギーがないと維持できない
- ・内部を通過する際に物質が破壊される



1-2 別次元への迂回

○時空の次元数が4次元より大きいという理論は、カルーツァ=クライン理論、超ひも理論、ブレーン理論などいくつもある。

○別次元を利用して超光速航行するSF作品は多い。

・『宇宙戦艦ヤマト』『超時空要塞マクロス』

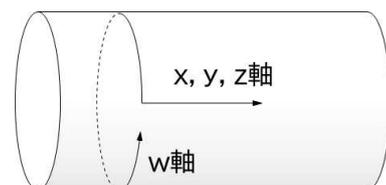
※映像では出発点で消滅した後、到達点に現れる

※亜空間、超空間、××空間など呼び方はさまざま

○現実に利用するのは困難。

- ・多くの理論で余剰次元は原子サイズ以下
- ・ブレーン理論では物質が侵入できない(原子サイズではないが相互作用が限られる)

【小さく丸まった余剰次元】



1-3 ワープ可能な物理法則に変更

○20世紀半ばまでのSF作品では、相対論による制約はしばしば無視された。

- ・E.E.スミス『宇宙のスカイラーク』(1915～)
※特殊なエネルギー源を使ったら超光速達成
- ・テレビドラマ『スタートレック』(1966～)
※シリーズ後半では「亜空間」を利用

○物理法則の異なる世界を仮定

- ・G.イーガン『クロックワーク・ロケット』(2011)
※時空がミンコフスキー的でない世界(右図)
※イーガンの幾何学では因果律が成り立たない

[参考] C.プリースト『逆転世界』(1974)

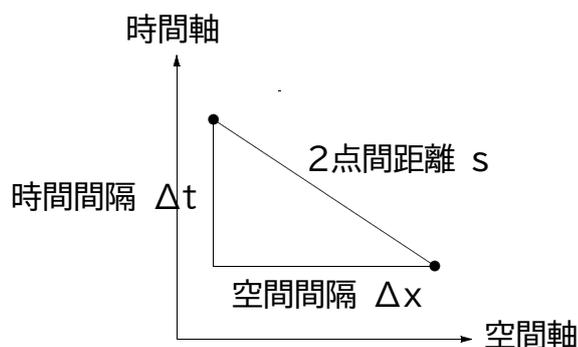
- ※空間がユークリッド的でない世界

【ミンコフスキ幾何学】

$$s^2 = \Delta x^2 - \Delta t^2$$

【イーガンの幾何学】

$$s^2 = \Delta x^2 + \Delta t^2$$



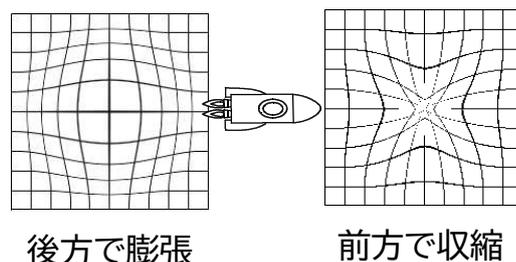
1-4 アルクビエレ・ドライブ

○宇宙空間はエネルギーによって膨張・収縮する。宇宙船の後方で膨張、前方で収縮を起こせば超光速で移動できる可能性あり。いくつかのバージョンが提案されている。

○実用化はきわめて難しい。

- ・通常の理論では莫大なエネルギーが必要
- ・エネルギーが少なくて済む理論は未確定
※超ひも理論が応用できるという説も

【アルクビエレ・ドライブ】



1-5 何のためのワープか

○多くのSFにおいて、ワープは叙述にリアリティを与えるためのガジェット。

○地球とは異なる環境を実体験する

- ・レム『ソラリス』(1961) / ストルガツキー兄弟『神様はつらい』(1964)

○エイリアンとの遭遇・交流

- ・神林長平『戦闘妖精・雪風』(1984)

- ※短時間で行き来する便法として超空間通路

○物理学者はなぜSF的な議論をするか。

- ・理論の適用限界を考察するのに便利だから
- ・SF好きの物理学者は多いが…

2 時間SFの冒険 タイムパラドクス

○時間移動を描いたSFは多い。移動手段としては、タイムマシン(H.G.ウェルズ『タイムマシン』)のほか、不意に別の時代に飛ばされるタイムスリップ(ディ・キャンプ『闇よ落ちるなかれ』)、過去の自分に意識だけ飛ばすタイムリープ(ヴォネガット『スローターハウス 5』)など。時間SFとしては他に、同じ歴史が何度も繰り返されるループもの(北村薫『ターン』)、未来の光景を直接見る未来視(映画『マイノリティ・リポート』)がある。

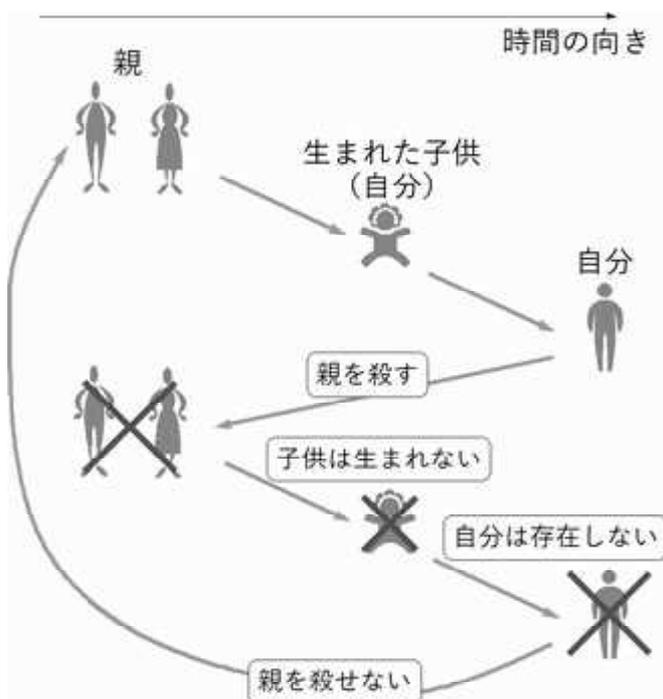
○ただし、過去に戻れるとすると、一種のパラドクスが生じる。

※パラドクスとは、前提から論理的に推論を進めていくと、前提と矛盾する帰結が導かれること。良い結果を得ようと過去を改変し、逆に悪化することをパラドクスと呼ぶ作品もある(アンダースン & ビースン『臨界のパラドクス』)

○以前は、「過去に戻る」ことは原理的に不可能だと考えられていた。しかし、1988年にゾンが、ワームホールを使うと物理学に反することなく過去に戻れるという論文を発表し、ホーキングら多くの物理学者の間で議論となった。

2-1 親殺しのパラドクス

○親殺しのパラドクス(図):生まれる前の時代に時間を遡って、将来自分の親になる人を殺すとどうなるか? 自分は生まれないので、そもそも殺すことができない! 結果が原因を変えてしまう。
○オリジナルはフランスのSF小説(未訳)。映画『バック・トゥ・ザ・フューチャー』など、多くのSF作品で取り上げられた。



2-2 情報のパラドクス

○自動車事故に遭った人が、意識だけ過去に戻って自動車事故を避ける。しかし、なぜ起きなかった出来事の記憶があるのか?

○筒井康隆の短編SF「時をかける少女」で描かれたケース(他にも多数あり)。この小説は、思春期の不安をテーマにしたものなので、作中でパラドクスは問題にされない。

2-3 万物理論のパラドクス

○未来を訪れた科学者が、博物館前の碑に「万物理論の方程式」が彫り込まれているのを見て書き写し、過去に戻って自分が発見したかのように偽って発表。物理学を進歩させたことが顕彰され、博物館前の碑に彫り込まれた。しかし、誰が発見したのか?

○情報のパラドクスの変形版で、原因がないのに結果が生じるパラドクス。

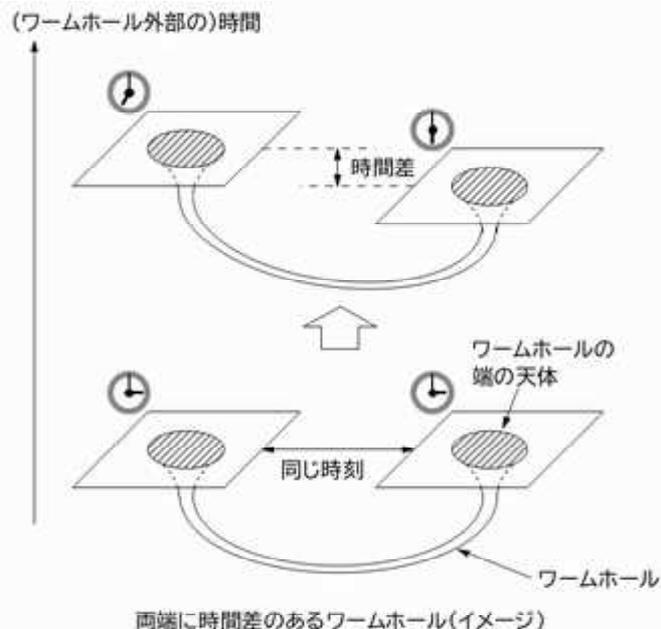
2-4 ワームホールを使ったタイムマシン

○ソーンは、ワームホールの両端（ブラックホールのような天体）でウラシマ効果などにより時間差を生じさせれば、過去に戻る事が可能だと論じた。ワームホールの存在は議論の前提とされ、両端の天体は通常の物体と同じように扱えると仮定された。

○ワームホールを作り出すことは技術的に不可能であり、また、太陽系周辺に巨大なワームホールは存在しない。原子より小さなワームホールにエネルギーを注入して巨大化できる可能性があるものの、必要なエネルギーは恒星何個分にも相当するため、現実には難しい。

○ワームホールは不安定で、ふつうは一瞬で壊れる。負のエネルギーを持つ物質を支持材として用いれば壊れないという見方もあるが、そうした物質が存在する証拠はない。ワームホール内部では、急激に重力が変化するため、足に加わる重力と頭に加わる重力が大きく異なって身体が引きちぎられる。

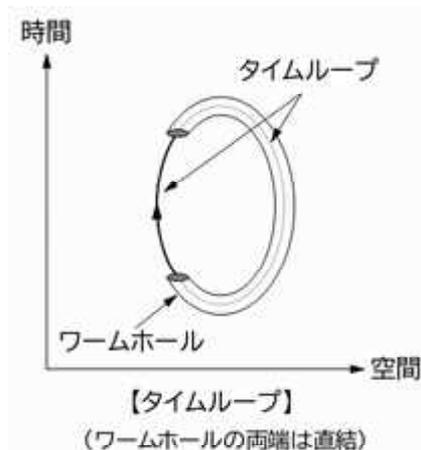
○タイムマシンとしては使えなさそうだが、物理学の根幹に関わる問題なので、物理学者が興味を持っている。



2-5 反論と現状

○ソーンの主張に対して、ホーキングが反論（『時間順序保護仮説』）。光速を超えずに過去の自分まで移動することができるならば、量子論の法則が破綻する。

○ホーキングは厳密な計算を遂行していない。何が正しいか（ワームホールは原理的に存在できない、存在できるが過去には戻れない、過去に戻れるワームホールの近くに生命は存在できない）は現在なお不明。



2-6 分岐する世界

○量子論の計算では、世界がどのように変化するかを完全に決定できない。これを、いくつもの可能な世界が並列的に存在すると解釈する学者も（少数ながら）いる。量子論の多世界解釈については、次回の講義で解説する予定。

○量子コンピュータの分野で知られるドイッチュは、ワームホールを使って過去に戻ると、量子論によって世界が分岐すると主張した。ただし、同意する物理学者は少ない。

○時間遡行と多世界解釈を組み合わせた物語は、近年のサブカル作品に多い（ゲーム／アニメ『Steins;Gate』）

3 量子論の迷宮 多世界？観測者？

○「量子論」と呼ばれる物理学理論は、常識と相容れないように見える主張がある。

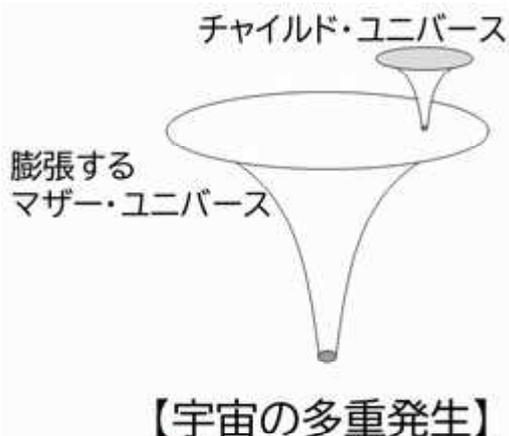
【例】波動と粒子の二重性：光は波であると同時に粒子である（現在では、場の理論に基づいて、「波でありながら時に粒子的な振る舞いをする」と解釈されることが多い）。

○量子論のアイデアを取り入れたSFは数多い。ただし、物理学的に正当な内容のものは少なく、大部分は、読者を楽ませるために量子論を引用するだけ。

コニー・ウィリス「混沌ホテル」（量子論の解釈を巡る学者たちのバカ騒ぎを描く）など

3-1. パラレルワールド(並行世界)

○われわれが生きる宇宙以外にも別の宇宙が存在するという考えは、古くからあった。ユニバース(単一の世界)ではなくマルチバース(複数の世界)というアイデア。



○科学的な異世界の理論

(1)宇宙論的パラレルワールド：ビッグバン以前に宇宙空間が急激に膨張する過程で、空間の一部がチャイルド・ユニバースを生み出す。理論的な可能性はあるものの、異なるユニバース間の連絡は不可能なので、現実への影響はない(アメコミでは異なる設定に)。

(2)素粒子論的パラレルワールド：身の回りにある物質と相互作用しない素粒子(タキオンなど)が存在し、現実とは別の「触れない世界」を構成している。支持する物理学者は少ないが、否定されてはいない。

(3)量子論的パラレルワールド：量子論の多世界解釈に基づく仮説(次項以降で説明)。

3-2. シュレディンガーの猫

○ニュートン力学では、コイントスで表が出るか裏が出るかは、最初の状態を厳密に与えれば決定される。しかし、量子論では、(例えば)放射性崩壊が起きるかどうかは、確率的にしか予測できない。

○シュレディンガーは、量子力学では、放射性崩壊をトリガーとする毒ガス発生装置を使ったとき、猫が生きている状態と死んでいる状態が同時に実現されると論じた(だから量子力学は改良すべきだという主張)。



⇒(1)生きた猫と死んだ猫が並存する？ (2)何らかのきっかけでどちらかの状態に確定する？ (3)実は放射性崩壊の瞬間から1つの状態に確定していた？

3-3. 量子状態の分岐

- (1) 多世界解釈：一部の物理学者が支持
 - ・ジェイムズ・ホーガン『量子宇宙干渉機』
- (2) 観測理論（人間の観測がきっかけで1つに確定）
 - ：ごく一部の物理学者と多くの作家が支持、素粒子実験など人間を必要としない観測もある
 - ・グレッグ・イーガン『宇宙消失』
- (3) 脱干渉理論（物理過程だけで1つに確定）：多くの物理学者が支持、細部は未完成
- (番外) 世界はメチャクチャ
 - ・U.K.ル＝グィン「シュレディンガーの猫」

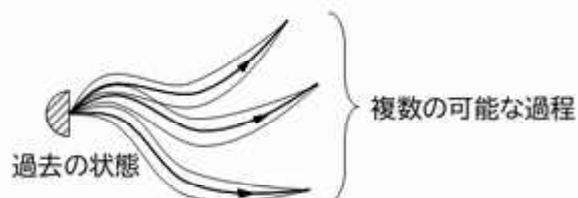
【ニュートン力学】



【量子論】（過去と未来が変化に関与）



【量子論】（多世界解釈）



3-4. 過去改変の可能性

- 多世界解釈を利用すると、（前回紹介した）親殺しのタイムパラドクスを回避できる（デヴィッド・ドイッチュの説、一般的ではない）
 - ・ワームホールを通して過去に戻ると、そのことがきっかけとなって別の歴史が分岐。
 - ・過去に戻って親を殺しても、それは自分が生まれたのとは異なる歴史での出来事なので、矛盾はない（とドイッチュは主張）。
- 近年の日本で数多く発表されている過去改変ものでは、新たに分岐した歴史だけが残って自分がやってきた未来は消滅するという（物理学的にはあり得ない）設定が多い。
 - ・ゲーム/アニメ『STEINS;GATE』
 - ・アニメ『時をかける少女』（細田守監督、2006）

3-5. さまざまな量子技術

○ 量子テレポーテーション

- ・物体を遠方に送信する技術ではなく、あらかじめ目的地に送っておいた物体が、離れた物体と同一の量子状態であることを確認する技術
 - ※SFでは物体の送信に利用されることも（マイケル・クライトン『タイムライン』）。
- ・盗聴が即座に検知できる通信装置を作ることができる（超光速通信ではない）

○ 量子コンピュータ

- ・量子論的な重ね合わせ状態を利用した量子コンピュータが開発中。従来のデジタル・コンピュータではなく、連続的に変化する量子現象を直接利用した、一種のアナログ・コンピュータ（日本のアニメにはよく登場。『機動戦士ガンダム00』など）。
- ・適切なアルゴリズムが開発できれば、従来型コンピュータよりも圧倒的に高速。しかし、量子現象の制御がきわめて難しく、計算間違いが頻発する。実用化できるにしても、おそらく数十年先。

4 宇宙と生命の深い関係 光が秩序を生む

○宇宙はビッグバンという“大爆発”から始まり、エントロピー増大の法則によってさらなる無秩序に向かうはずなのに、なぜ複雑な構造を持つ生命が誕生し進化できたのか？

→ビッグバンは爆発ではなく穏やかなエネルギー放出だった

→巨大なエネルギー流がある場合は局所的にエントロピーが減少することがある

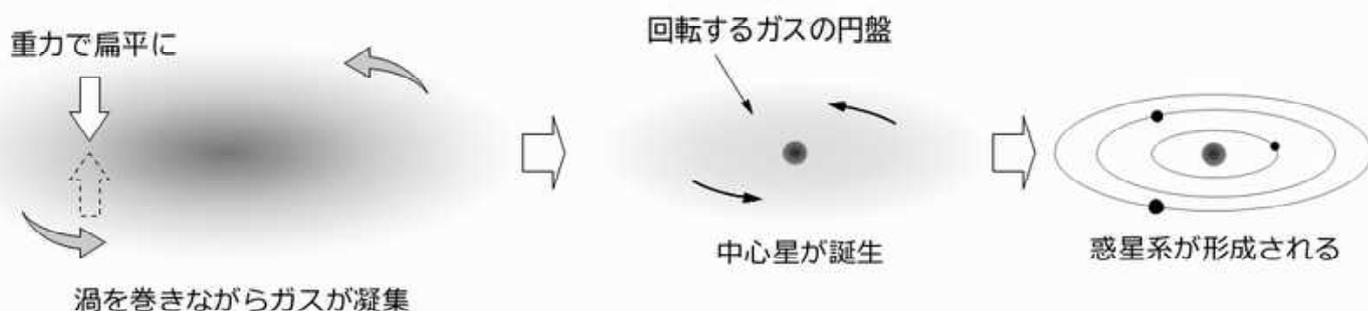
4-1. 生命が誕生する場所

○安定した軌道で恒星を周回する惑星の中で、液体の水が存在するもの。恒星からの光は生命進化に必須。火山とプレートテクトニクスの存在も望ましい。

※生命の発生や進化を扱うSFの多くは非科学的(銀河スケールに広がった生命体を登場させたヴァン・ヴォークト『宇宙船ビーグル号』など)。

○惑星の総数はきわめて多数。恒星は天の川銀河だけで2000億個以上あり、大半が惑星を持つと考えられる(ただし、高温の恒星は寿命が短く、赤色矮星は光量が不十分で生命進化は難しい)。観測可能な領域に存在する銀河は数十億個で、全宇宙での総数は不明。

・ビッグバンが穏やかだったため、エネルギーがほぼ均一に広がり、至る所で物質が小さく渦巻ながら凝集。中心部で凝集して核融合を始めたのが恒星で、周囲の円盤内部で生まれたのが惑星。円盤の回転がスムーズだと、惑星は安定した円軌道に落ち着く。



○水は平凡な物質で、太陽系内部に大量に存在するが、液体の水を有する天体は限られる。

・太陽系の場合、水星・金星の水は蒸発して失われ、木星・天王星・海王星では氷結して惑星のコアとなった。火星や月の水は、重力が小さいせいで散逸。

・地球の水は、メインベルトの小惑星が飛来して持ち込んだという説が有力。他にも、土星の衛星・エンケラドスには、氷結した地表の下に液体の水がありそう。

4-2. エントロピーの制約

○エントロピー増大の法則：きわめて多数の原子から構成された物質では、個々の原子が持つエネルギーの分布が偏りのない“均された”分布に向かう

・エントロピーは「秩序ある差異」の指標。エントロピーが増大する代表的ケースは、熱が高温から低温へと流れる過程で、温度の差がなくなって一様な温度になる。

※エントロピーを正しく理解した作品：

・ピンチョン『エントロピー』(SFではなく純文学)

「天気は激しく変わっているのに、水銀柱は華氏37度を指したままだ」

「空は一面、深まりゆく均一な灰色」

・テッド・チャン『息吹』(気圧の差が変化を生み出す世界の終焉を描く)

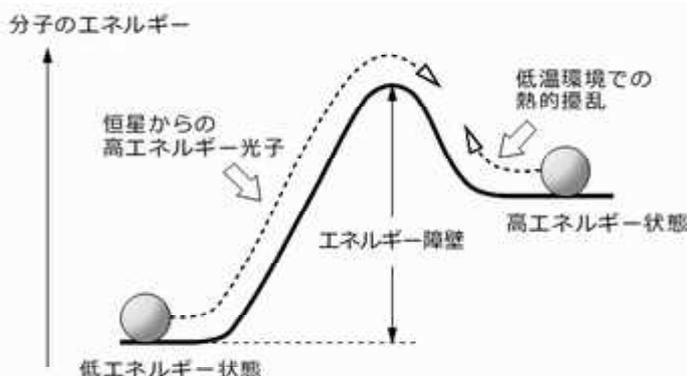
○高温から低温への巨大な熱エネルギー流がある場合、局所的にエントロピーが減少しても、熱力学の法則には反しない。

・水は物理法則によって高所から低所へと流れるが、巨大な滝があると、滝壺付近で水滴が上に跳ね上がり、局所的には物理法則が破れるように見える。

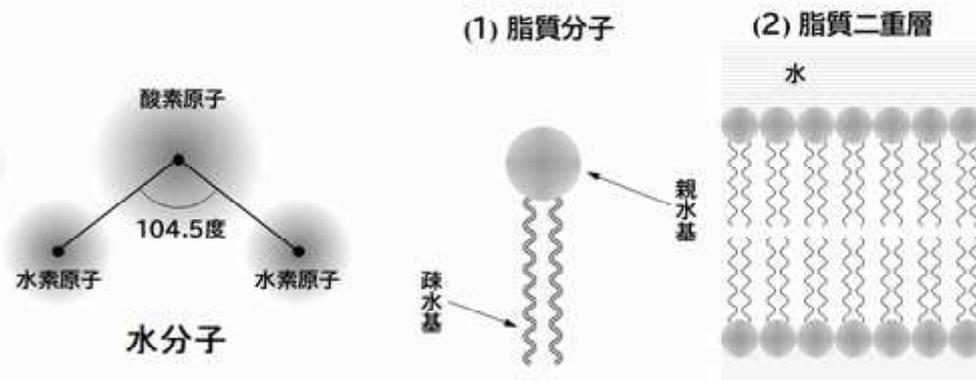
・恒星-惑星システムの場合、恒星から膨大な光が極寒の宇宙空間に放出されるのに伴って、惑星の海にごく一部の光が流れ込むと、そこでエントロピーが減少し得る。

4-3. 量子効果による秩序形成

○量子効果は、伝播する波動の内部にエネルギー量子(エネルギーの塊)を形成する。高温の恒星から飛来する光は、巨大なエネルギーの塊となり、海中に存在する分子に一気にエネルギーを与える。その結果、化学変化が生じてエネルギーを内部に蓄える分子が生成されるが、周囲の海水が冷たいため、熱分解が起きず分子が維持される。



○水の分子は、電気的にプラスとマイナスの部分が分離しているため、さまざまな化学変化を促進する。膜構造が自然に生じ、穴が開いても自己修復できるのは、水の特性による。



4-4. 確率の問題

○生命の誕生・進化は物理法則に反していない。だが、きわめて多数の母集団、原子スケールと天文学的スケールの格差、何億年という長い歳月がなければ、確率的に起こりえない。

・手塚治虫『火の鳥未来編』 人造生命による生態系復活は可能か→不可能

(手塚は医師免許を持ち医学博士だったので、科学的に正確な議論)

・文明を持つ知的生命が宇宙のどこかに発生する確率は、かなり高いだろう。ただし、数光年以内の近隣にいる可能性は小さい。

5 人ならざるものの知性 エイリアンとAI

○人間以外の知的生命体を登場させたSFは多い。娯楽性の強いSFでは、人間と似た思考パターンを示すタイプか、捕食・生殖などの本能に突き動かされるタイプが一般的だが、先鋭的なSF作家(スタニスワフ・レム、ストルガツキー兄弟、テッド・チャンら)は、地球人類と全く異なる知性の可能性を模索した。

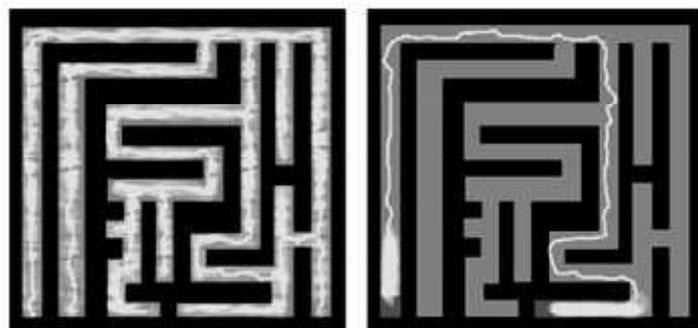
○AI(人工知能)の進歩に伴って、AIが人間を超える危険性についても議論されている。

5-1. 地球と異なる環境で知性は生まれるか？

○人間的知性の特徴

(1)神経細胞による信号伝達

← 神経を用いない知能：暗号を解く粘菌(変形菌)など植物全般



・脊椎動物の祖先はカンブリア紀に登場。巨大捕食者が現れたため、太い神経管で全身を協調させてダッシュで逃げる(cf.ムカデはダッシュできない)。

・富栄養化が進んだ海では、クラゲやナマコなどのゼラチン質の動物が生存に有利で、複雑な神経システムを持つ魚類は、酸素消費量が多すぎて自滅する。

※神経の存在しない知的生命を登場させたSFは数多い

レム『ソラリス』(惑星上の海全体が一個の知性体)

ステーブルドン『スターメイカー』(精神だけの知性)

他に流動体知性・微生物知性など

(2)視覚を偏重：ヒトを含む霊長類は突然変異で視覚優位に

← イヌなど多くの哺乳類は嗅覚優位であり、時間に“厚み”を感じるかもしれない

※映画『メッセージ』(原作テッド・チャン)では時間の広がりを知覚するエイリアン

(3)脳(脊髄末端の中樞神経系)で集中的に情報処理

← 分散型知能を持つ生物(タコなどが部分的な分散処理)

※共生で思考を分担する知性：オールディス『地球の長い午後』、岩明均『寄生獣』

(4)神経ネットワークの結合により学習記憶

← 学習記憶を(ほとんど)用いない生物(アメフラシ、チョウの幼虫)

※レム『砂漠の惑星』の集団的知性

(5)重力内部で動き回れるように最適化(反応時間が数百ミリ秒に)

← 植物は反応時間が日月単位(光合成のエネルギー量に限界があるため)

※アシモフ「もの言う石」では、きわめて動きの遅いケイ素生物が描かれる

○知性におけるアルゴリズムの利用

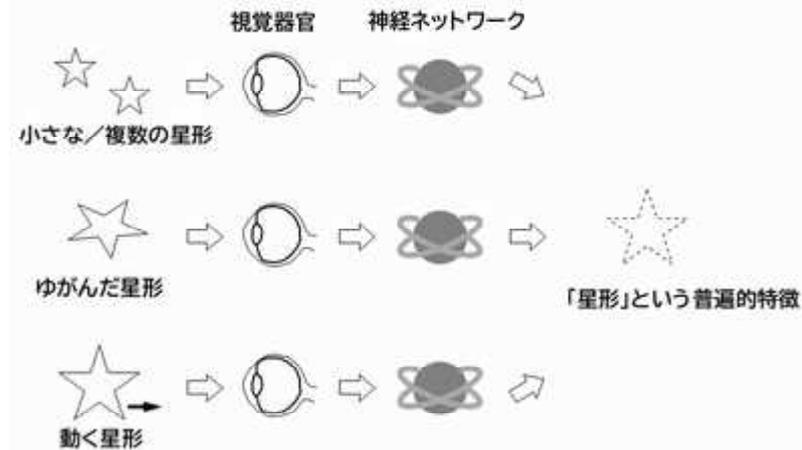
数個までなら直感で個数を認知できる

それ以上になると、アルゴリズムに基づいて「数を数える」ことが必要

5-2. AI(人工知能)の知性は人間を超えられるか？

○AI(Artificial Intelligence; 人工知能):自律的に知的な振る舞いをする人工物

- ・現在の第3次ブームでは、機械学習(特に深層学習)を行ったニューラルネットが主流。グーグルが2012年に猫の画像を認識できるAIを開発したのがブームのきっかけ。
- ・現在のニューラルネットは、神経システムの機能をソフトウェアでシミュレーションするもの。多次元的な入力を段階的に変換することで、特定のパターンを抽出する。



- ・人間は、前頭前野の指示でさまざまなシミュレーションを繰り返し、善後策を検討する。
- ・画像認識・自動運転などパターン抽出のみで何とかなることは、AIに任せられる

○シンギュラリティ:AIが人間の知能を超える「特異点」(人間の活躍する場がなくなるかも)

- ・シンギュラリティは到来するか、そのとき何が起きるかは、学者によって見解が異なる(吉田の予測では、シンギュラリティよりもAIを過度に信頼する人間が危機をもたらす)

※人間を超えたAIが登場するSF

AIが人間を支配:映画『ターミネーター』『マトリックス』

AIが人間の理解を超えた振る舞い:アニメ『地球外少年少女』

AIが人間以上に活躍:眉村卓『消滅の光輪』、カズオ・イシグロ『クララとお日さま』

○AIの限界:現時点ではパターンを抽出するだけで、論理的な思考はしていない

- ・常識がない:学習に用いたデータの範囲しか対応できない

【事例】自動運転車で車体の下に巻き込まれたケース(人間の消失に対応できない)

- ・モラルがない:AIに株の売買をやらせると、株価操作など違法すれすれの行為をする

※アニメ『サイコパス』では、犯行前に犯罪性向の高い人をAIで判定して検挙

○chatGPT(言語系生成AI)には何ができて何ができないか

- ・膨大な文献を学習して、スムーズな会話を実現。文献に頻繁に現れる表現をつなげているだけで、考えて会話している訳ではない。拡散型の検索には役に立つ。

- ・「知ったかぶり(ハルシネーション)」がきわめて多いので注意が必要

