

科学史におけるパラダイムシフト から見た科学革命の構造

那須科学歴史館 田澤勇夫

2025年7月26,27日

- ① 地動説、および、光学の歴史に見るパラダイムシフト
- ② 電磁理論の歴史に見るパラダイムシフト
- ③ 特殊相対性理論から量子力学確立までの歴史に見るパラダイムシフト
- ④ 何故、科学史においてパラダイムシフトが生じるのか

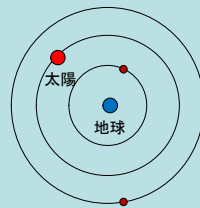
- **パラダイム**: 科学革命が生じていない通常の状態で広く受け入れられている概念
この状態ではパラダイムに基づいて研究を進め、知識・技術が蓄積される
- **パラダイムシフト**: 今までの概念(パラダイム)とは全く異なる概念が生まれること
既存の概念(既存パラダイム)では説明できない事象が発見されると、
それを説明するため新たな概念(新パラダイム)が形成され科学革命が生じる
- 次から次へと生じるパラダイムシフトにより科学が発展したことを、科学史は示している

① 地動説と光学の歴史に見るパラダイムシフト

科学史上、最初のパラダイムシフト: 地動説

天動説(パラダイム)

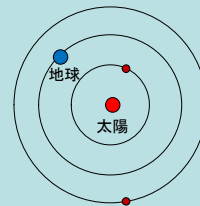
- 地球が宇宙の中心に静止しており、全ての天体が地球の周りを回っているという概念
- アリストテレスやプトレマイオスにより体系化され、特にプトレマイオスの「アルマゲスト」では数学的に詳細に記述されている。
- キリスト教の教義とも調和し、広く支持されていた。



↓ パラダイムシフト

地動説(新たなパラダイムの形成)

- コペルニクスは「天体の回転」(1543年)の出版により地動説を主張。
- ケプラーは「宇宙の神秘」(1596年)により地動説を主張し、「新天文学」(1609年)に第1, 2法則を、そして「宇宙の調和」(1619年)で第3法則を発表し、数学的基礎を築く。
- ガリレオは「天文対話」(1632年)で地動説を主張したが、カトリック教会から宗教裁判にかけられ、軟禁処分を受ける。



ニュートンの万有引力の法則(1665年)と遠隔作用の概念

ケプラーの法則(観測データに基づく現象論的法則＝実験式)(1609/1619年)

第1法則: 惑星は太陽を焦点とした楕円軌道を描く

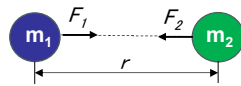
第2法則: 惑星と太陽とを結ぶ線分が単位時間に掃く面積(面積速度)は一定

第3法則: 惑星の公転周期の2乗は、軌道長半径の3乗に比例



ニュートンの万有引力の法則の導入(1665年)

質点 m_1, m_2 が距離 r だけ隔てておかれている場合、その間に働く力 F_1, F_2 は



$$F_1 = F_2 = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$



遠隔作用の概念の導入 (新たなパラダイムの形成)

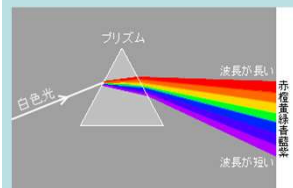
ニュートンは質点間に力の作用を媒介するものは何もなく、一瞬にして作用すると考えた

※ 万有引力の法則はケプラーの法則から導き出されるため、フックもその法則を思いついたとも言われている。

ニュートンによる光のスペクトル発見 (1666年)

太陽光線がガラスのプリズムを通ると、屈折率の差によって赤から紫に至るたくさんの成分に分けられることを発見 <光の分散> 分散させた光をレンズとプリズムで再合成すると白色光に戻る実験にも成功。

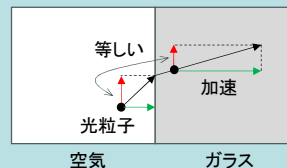
白色光は均一な光ではなくて多くの異なった色の光線から成っており、各光線の屈折率がみな違うために、プリズムを通った白色光は細長い色帯になると。彼はこの色帯を“スペクトル”と名づけた。



ニュートンの 光の粒子説 (1669年)

光は多くの種類の微粒子からできているという“光の微粒子説”を唱えた。

光の屈折現象を説明するのに、光粒子が空気中からガラスへ突入するとき、境界で面垂直方向の力を受け加速され、進行方向が曲げられるからであるとした。

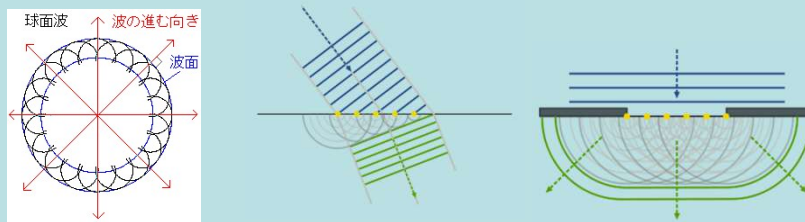


※ ニュートンの論敵フックは光は波だと考え、最初にエーテルの存在を唱えた。

ホイヘンスの光の波動説(1678年)

ホイヘンスは、水の波などの古典的な波から類推、
光をエーテルという物質からなる媒質の中を伝播する振動であるとした。
さらに光の波は球面の波頭をもち、その波頭はまた個々の振動している
微粒子の小さな球面波で構成されているとして理論を構築。
この理論により光が直進すること、また反射、屈折などの現象を説明できた。
この理論は百年以上も無視されましたが、十九世紀になってヤングやフレネルが、
ホイヘンスの理論を光の干渉や偏光の説明に利用し、波動説は世に出た。

当時、縦波と横波の区別は明確でなかった。ホイヘンスは、時として
光を水面波(横波)の広がりのような特徴があると考え、
媒質(エーテル)の振動を音波のような縦波であると類推していた



ヤングの干渉実験(1805年)

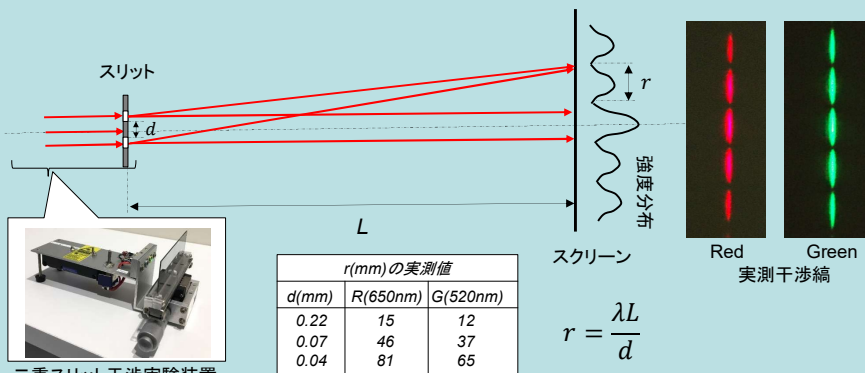


Thomas Young,
1773-1829

光源からの光を平行な2つのスリットを通すと
スクリーン上に干渉縞を生じることを示した。

干渉現象は光が波動であることを示す現象であるが、ヤングはそのことを明確
に強く主張しなかった。また、ホイヘンスと同様に横波ではなく縦波と考えた。
その理由は、当時、一般的に波は縦波と考えたことに起因している。

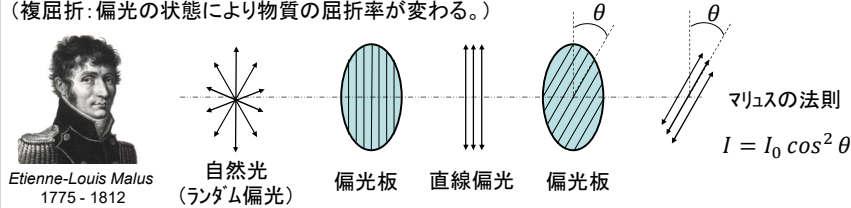
ヤングは光は波と考えたのであるが、光の粒子説を否定する状況に至らず



マリユスの偏光の発見と光の粒子説による説明(1808年)

偏光の発見、マリユスの法則

マリユスは複屈折の研究において反射光が偏る現象(偏光)を発見し、「マリユスの法則」を導く。
(複屈折:偏光の状態により物質の屈折率が変わる。)



光の粒子説

偏光の現象がもし光が波であるとするならば横波である(ホイヘンスとヤングは縦波と考えていた)

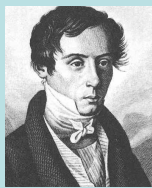
横波が媒質を高速で伝わるには、媒質は非常に硬いものである

地球が公転によるエーテルの影響が観測されない

よって、光は波ではなく粒子である

1810年、マリユスの粒子説に対しフランス科学アカデミーは賞を与えた

フレネルの光の横波・波動説(1818年)



Augustin Jean Fresnel
1788-1827

フレネルはフランスの物理学者でヤングとは独立に光の波動説を唱え、光の回折や複屈折現象など、光学に関する理論的研究を行った。

ホイヘンスやヤングらの「光の波動説」では光は音波と同様、縦波であると考えられていた。

フレネルは、偏光の振る舞いから、光の波動説を実証し、横波であるという結論を得た。(エーテルの存在による問題は脇において)

フレネルは、光の干渉や回折現象を横波として数学的に説明することが出来た
(パラダイムシフト)

しかし ↓

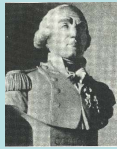
光以前の古典的波の媒質は物質により構成されるため、
そこからの類推では幾つかの矛盾が生じる(エーテルの問題)

「光は横波」という新たなパラダイムの確立には、マクスウェルの電磁理論と
アインシュタインの特殊相対性理論によるエーテルの否定という
更なる、パラダイムシフトが必要であった。

② 電磁理論に見るパラダイムシフト

クーロンの法則(1785年)

点電荷 q_1, q_2 が距離 r だけ隔てておかれている場合、その間に働く力 F_1, F_2 は



$$F_1 = F_2 = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

- クーロンは電荷間の静電力を明確化することで、万有引力に似た法則を発見。
- その作用が電荷の極性に依存するという万有引力と異なる新しい概念を導入。



パラダイムシフトにつながる概念

しかし



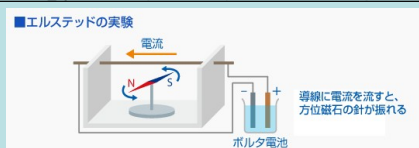
電荷間に力を媒介するものは何もなく一瞬にして作用するという
ニュートンの概念(遠隔作用)の枠内で解釈され
パラダイムシフトにつながる近接作用(電場)という新たなパラダイム形成には
ファラデーとマックスウェルの登場が必要であった。

エルステッドの電流の磁気作用の発見(1820年)



Hans Christian Oersted
1777-1851

1820年、エルステッドが学生にボルタの電池を使った実験を行っている時、
偶然に電線近くに置いてあった磁石の針金が動いた。



電気と磁気の相互作用を発見したエルステッドの論文は欧州の学会に大きな反響を呼ぶ。



無通電時、コンパスのN極は北を指す。



通電(電流3A)時、コンパスのN極は北から大きくずれる



電気により磁気が発生し、全く別の物理現象と思われていた電気と磁気が結びついた



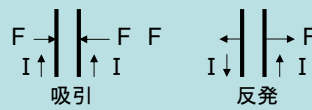
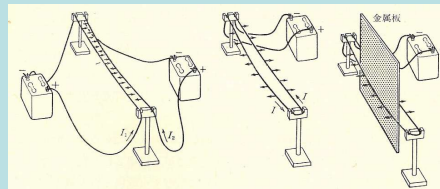
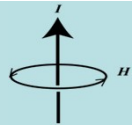
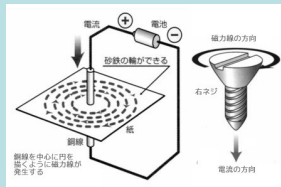
パラダイムシフトにつながる発見

アンペールの法則(1820年)



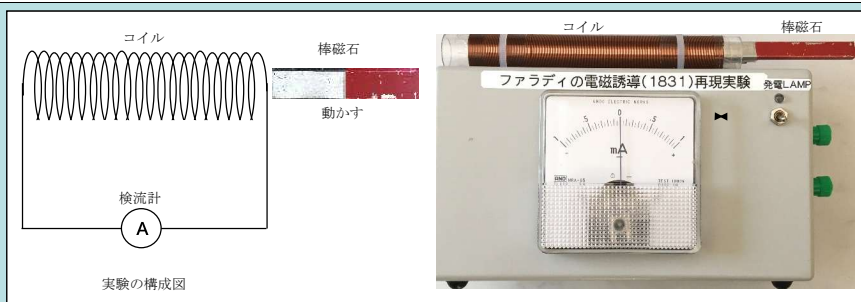
Andre-Marie Ampere
1775-1836

- 同じくエルステッド論文を読んだアンペールは**電流により生じる磁場**が電流方向の直角面に右回りでできることを発見
- 平行した導体に同じ向きの電流を流すと、導体は引き合い
反対方向に流すと排斥しあうことを発見



アンペールが発見した現象は万有引力とは異なりパラダイムシフトにつながるが、
電流や磁場の相互作用を定量的に捉え解析的な立場を貫いて数学的な形式化を重視し
クーロン同様に既存のパラダイム(ニュートン力学)の拡張にとどめた

最終的なファラディの電磁誘導実験(1831年10月)



↓
コイルの中に磁石を差し込むと検流計の針が振れた。

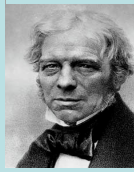
↓
磁石の動きを止めると針は振れなくなった。

↓
磁石を逆に動かすと針も逆に動いた。

↓
瞬時だけ電流が流れる現象(電磁誘導)を独特の状態(電氣的緊張状態)にあると推論

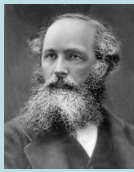
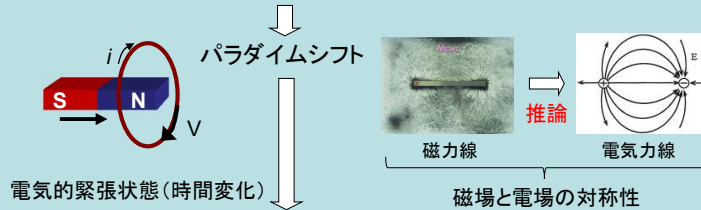
↓
パラダイムシフトにつながる大発見

ファラデーとマクスウェルの交友から電磁波の予言へ



Michael Faraday
1791 - 1867

- ファラデーは“実験から物事の真理を追究する”という立場をとった。
- 電磁誘導を発見し、電氣的緊張状態が存在すると推論。
- 力線により空間中を次から次へと力が伝わる電磁場の概念に到達。
この概念(近接作用)はニュートンの万有引力の概念(遠隔作用)とは異なる。
- 電気と磁気の現象において対称性が成立すると推論した。



James Clerk Maxwell
1831 - 1879

ファラデーとマクスウェルは親交があり、ファラデー65歳、マクスウェル25歳から文通が始まり、マクスウェルはファラデーの《電磁》場の概念を学ぶことができた。
文通はファラデーが亡くなる(76歳)6年前まで続いた。

マクスウェルは、ファラデーの場とその対称性の概念を
数学を用いることにより電磁理論は確立した。

電磁波の存在を予言(パラダイムシフト)

電磁理論の対称性と変位電流

$$\operatorname{div} E = \frac{q}{\epsilon_0} \quad \dots (1) \quad \text{クーロンの法則 (ガウスの定理)}$$

$$\operatorname{div} H = 0 \quad \dots (2) \quad \text{単磁荷は存在せず}$$

$$\operatorname{rot} E = -\mu \frac{\partial H}{\partial t} \quad \dots (3) \quad \text{ファラデーの電磁誘導}$$

$$\operatorname{rot} H = i \quad \dots (4) \quad \text{アンペアの法則}$$

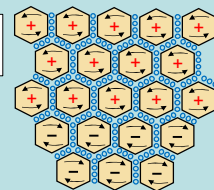
フラディーが考えた電気と磁気(電場・磁場)の対称性が壊れている

アンペアの法則は不完全

$$\operatorname{rot} H = i + \epsilon \frac{\partial E}{\partial t} \quad \leftarrow \text{変位電流}$$

マクスウェルによるファラデーの概念のモデル化・変位電流の導入

ファラデーの力線(電磁場)と電氣的緊張状態の概念に基づきマクスウェルは論文「物理的力線について」において、セルとビーズモデルを導入



セルとビーズによるモデル

真空中のビーズ(荷電粒子)の電気変位 $\frac{\partial E}{\partial t}$ により
変位電流 $i_d = \varepsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t}$ が存在すると仮定

次に、マクスウェルは論文「電磁場の力学的理論」において、エーテル中に変位電流が流れると考えた

$$\begin{aligned} \operatorname{div} E &= \frac{q}{\varepsilon_0} & \operatorname{rot} E &= -\mu \frac{\partial H}{\partial t} & (\text{ファラデーの法則}) \\ \operatorname{div} H &= 0 & \operatorname{rot} H &= i + \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} & (\text{変位電流によるアンペアの法則の修正}) \end{aligned}$$

電磁場の対称性が成立

電磁波の方程式導入

(電磁波の速度)=(光の速度)

光は電磁波であると推論 $\Rightarrow$ 光と電磁波の融合(パラダイムシフト)

変位電流の導入(2) 電荷の保存則と電流の連続則を前提とする論理体系から

変位電流の存在を前提とすると電荷の保存則・電流の連続則を導くことが出来るが、逆に、電荷の保存則・電流の連続則の存在を前提とする。
電流の連続則により、電線の任意の箇所を取り囲む閉曲面から湧き出ていく電流の総和はゼロであるので、

$$\operatorname{div} i = 0$$

その閉曲面内に電荷 q が存在する場合は

$$\operatorname{div} i = -\frac{\partial q}{\partial t}$$

が成立する。これを電荷の保存則という。

また、

$$\operatorname{div} E = \frac{q}{\varepsilon}$$

であるので

$$\operatorname{div} \left(i + \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} \right) = 0$$

が成立する。電荷 q が存在する閉曲面についても電流の連続則が成立するモデルでは
上式第2項も電流を表すことになり、

$$i_d = \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t}$$

も電流を表し、これを変位電流と言う。よって、アンペアの法則の電流項を次のように変更する。

$$\operatorname{curl} H = i + i_d = i + \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t}$$

変位電流の導入(3) ファラディの電場と磁場の対称性の概念から

電場と磁場との間には対称性が成立し、電場と磁場は波のように振動しているという
ファラディのモデルが成立するとすれば、

電荷 q 、電流 i が存在しない空間の電磁場をアンペアの法則の修正項が存在しない場合
電磁場は次の式となる。

$$\begin{aligned} \operatorname{div} E &= 0 & \operatorname{rot} E &= -\mu \frac{\partial H}{\partial t} \\ \operatorname{div} H &= 0 & \operatorname{rot} H &= 0 \end{aligned}$$

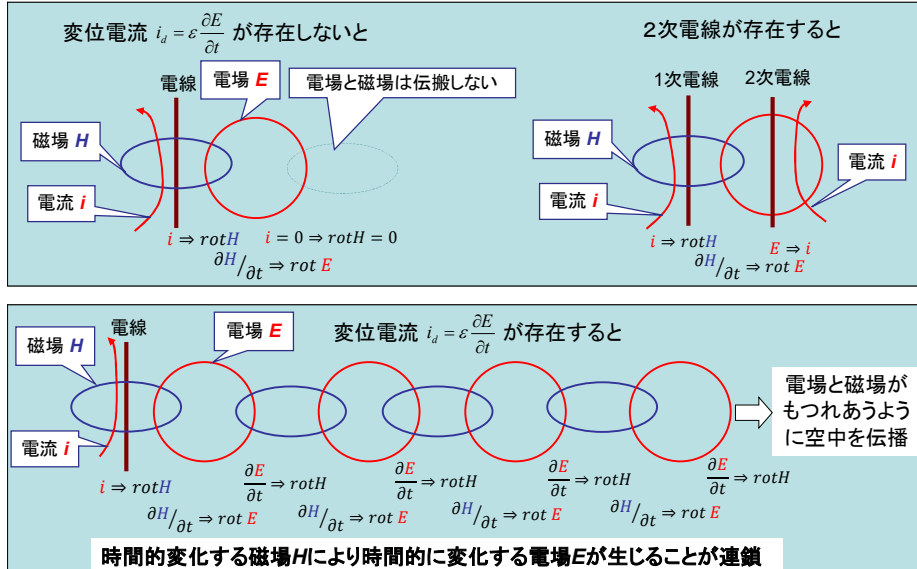
しかし、これらの4つの式では電場と磁場の対称性が成立しておらず、
ファラディの電場と磁場の対称性が成立するために次のように修正する。

$$\begin{aligned} \operatorname{div} E &= 0 & \operatorname{rot} E &= -\mu \frac{\partial H}{\partial t} \\ \operatorname{div} H &= 0 & \operatorname{rot} H &= \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} \end{aligned}$$

よって、電荷 q 、電流 i が存在する場合における電磁場は次の式となる。

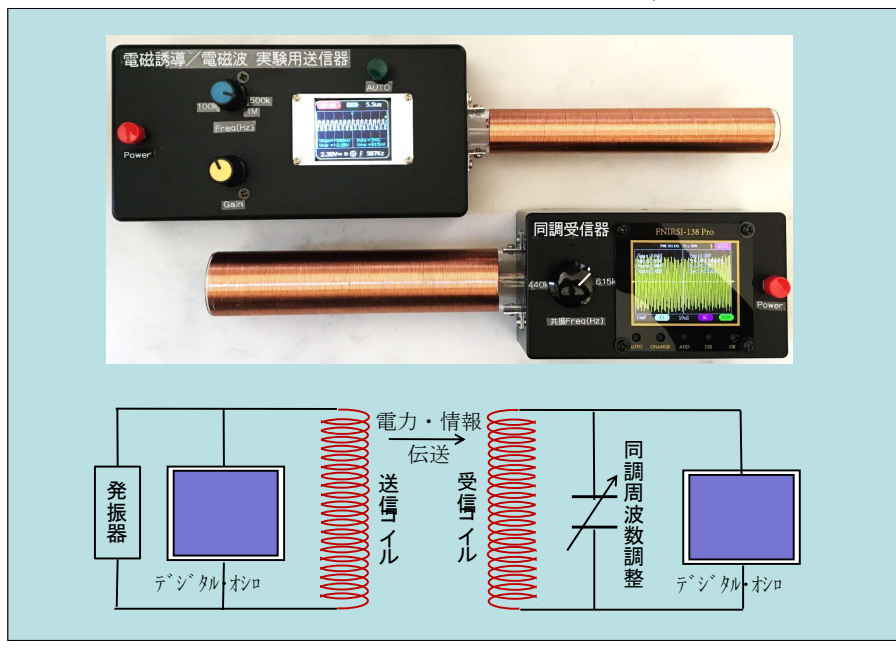
$$\begin{aligned} \operatorname{div} E &= \frac{q}{\varepsilon_0} & \operatorname{rot} E &= -\mu \frac{\partial H}{\partial t} \\ \operatorname{div} H &= 0 & \operatorname{rot} H &= i + \varepsilon \frac{\partial E}{\partial t} \end{aligned}$$

電磁波は変位電流により電場と磁場がもつれ合うように空中を伝播



電磁波は波を伝える仕組みが古典波とは全く異なる(パラダイムシフト)

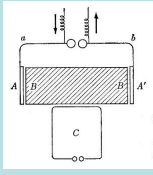
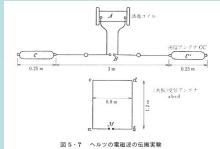
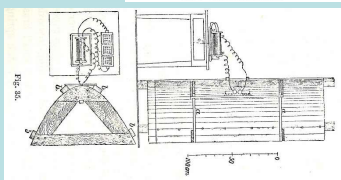
電磁誘導・電磁波通信の可視化実験装置



ヘルツによる電磁波発見の実験（1888年）



H. R. Hertz
1847–1894

1879年、恩師ヘルムホルツより電磁波証明の懸賞問題への取組を勧められたが、ヘルツはなかなか良い成果を得られないでいた。

ところが、導線ループに取付けた火花ギャップを用いて磁場の強さを測定した際、磁気誘導で考えられるより離れた距離にループを置いても火花放電することに気付く。

↓

ループアンテナ

また、その時に用いた誘導コイルが高電圧発生装置が電磁波発生装置になることも気付く。

↓

連続電磁波発生

その上、コイルのインダクタンスと先端の板C,C'のコンデンサによる共振周波数が放射されていることにも気づく。

↓

同調

更に、電磁波は光と同じなので反射鏡を置けば、一方に電磁波を放射できると考えた。

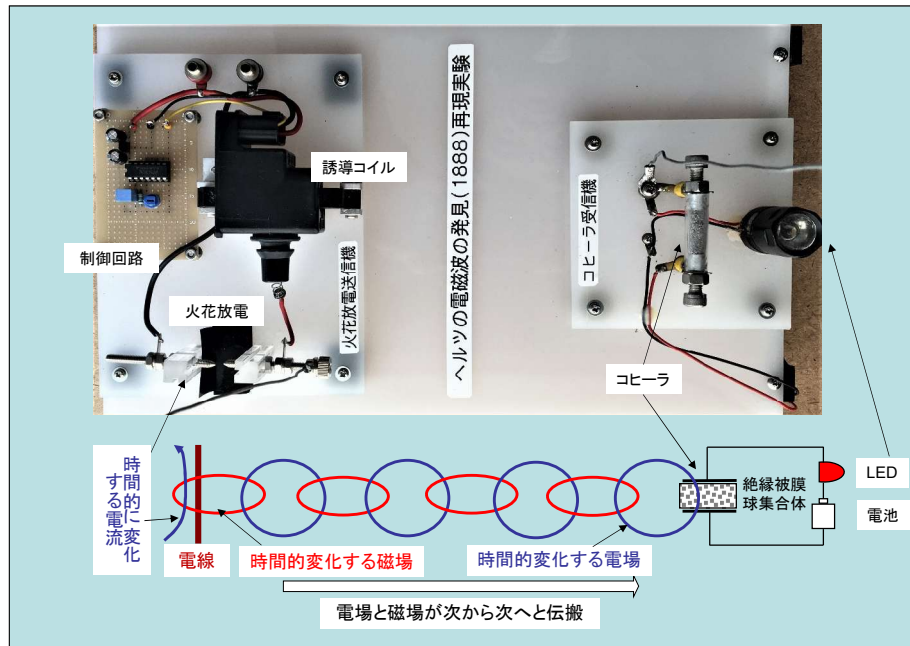
↓

指向性アンテナ（パラボラなど）

↓

電磁波の発見に伴い、光が電磁波の一種であることも裏付けることが出来た
(新たなパラダイムの形成)

ヘルツの電磁波実証再現実験装置



波(媒質)の概念のパラダイムシフト

電磁波以前の古典波の媒質は物質
物質とはエネルギー、質量を持つ局所性実在

横波: 波の進行方向に対して媒質の振動方向が垂直
水面波(媒質は水)、弦の振動(媒質は樹脂など弾性体)
縦波: 波の進行方向に対して媒質の振動方向が水平
音波(媒質は空気)、ばねの振動(媒質は鉄などの弾性体)



最初、光/電磁波の媒質の概念はエーテルという不明の物質

- マクスウェルはエーテルの中の変位電流の存在から電磁波を導入
- ファラデーはエーテルの存在には否定的
- 1887年、マイケルソン・モーリーによる光速測定実験で、エーテルの存在を否定



電磁波を伝播するのは磁場と電場の絡み合い
電磁場はエネルギーを持つが質量を持たない非局所性実在



波(媒質)の概念のパラダイムシフト



1916年 アインシュタインが重力波を予言

重力波の伝播方向に対して垂直に時空の歪みが振動。媒質は時空であり、重力波は横波

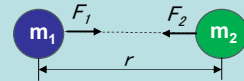
1926年 ボルンの存在確率を示す波

波動関数が示す波とは実在を示さず、その二乗が存在確率を示すだけ

異なる概念の対立(遠隔作用 近接作用)に見るパラダイムシフト



ニュートンの万有引力



ニュートンは質点間に力の作用を媒介するものは何もなく、一瞬にして作用するという遠隔作用の考え方であった。

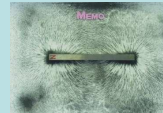
空間真空にはなにもない
空間真空は物理的に存在しエネルギーを持つ



パラダイムシフト

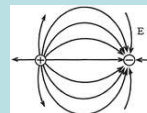


ファラデーの電磁場の概念



磁力線

対称性
推論



電磁力線

磁力線は磁力が働いている様子を示し、同様に電磁力線が存在し、これらの力線によりファラデーは電磁場の概念を確立した。

空間は場として物理的に存在しエネルギーを持つ



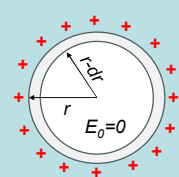
局所的な電荷と非局所的な電場(および空間全体のエネルギー)は物理現象を異なる視点から解釈するためのツール



実在とは何かという問題が生じる

何処に実在(エネルギー)があるのか?

半径 r の帯電球体に対し、外部からエネルギーを加え半径を dr だけ縮める



外部からのエネルギーは
 $dW = \frac{Q^2}{8\pi\epsilon} dr$

帯電球体のエネルギーが dW だけ増加

dr の空間で生じた電場のエネルギー
 $dU = \int_r^{r-dr} \frac{1}{2} \epsilon E^2 dr = \frac{Q^2}{8\pi\epsilon} dr = dW$

外部からのエネルギー dW は電場(空間)に蓄えられた

外部からのエネルギー dW は電場(空間)に蓄えられたとも荷電球体に蓄えられたとも考えられる

同様に、質点を高く持ち上げると、ニュートン力学的には質点の持つ位置エネルギーが増加したと考えられるし、アインシュタイン的には重力場のエネルギーが増加したとも考えられる。

実在=エネルギーであるが、実在の在り方は見方(科学理論)で変わる

特異点(科学理論適応外=理論の不完全性)の存在

電荷の半径をゼロにすると電荷のエネルギーは無限大になり、また、電荷からの距離がゼロの点の電場のエネルギーは無限大になる。これを特異点と呼ぶ。

③ 特殊相対性理論から量子力学確立までの 歴史に見るパラダイムシフト

マイケルソン・モーレーの光速測定(1887年)

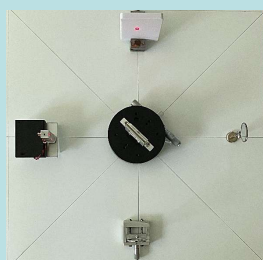
水面を波が伝わるには水という物質による媒質、音が伝わるためには空気という物質による媒質が必要

真空中でも光を伝える物質による媒質(エーテル)の存在を予想(既存パラダイムの延長上)

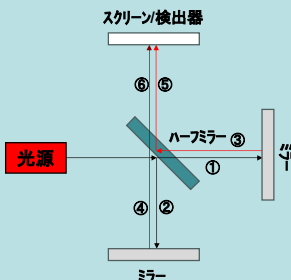
エーテルは、風の向きや強さは季節や時刻と共に変化するはず
光はエーテルに乗って伝播するから、順風の時に速く、逆風の時に遅く伝わるはず

異なる方向について光の速さを調べることで、地球のエーテルに対する相対運動を知ることができるはず

マイケルソン・モーレーの光速測定の結果、どの方向から光の速度は一定(既存パラダイムからは説明不能)



マイケルソン・モーレー再現実験
(那須科学歴史館製)



マイケルソンはエーテルの流れを検出するに十分な精度を得られる実験方法を考案。光源から出た光線はハーフミラーを通り、二つの互いに垂直な光線に分割される。①②それぞれの光線は、しばらく進んだ後に鏡で反射され、中央に戻ってくる。③④再びハーフミラーにより検出器に向かう光線⑤⑥は検出器上に重ね合わせると、それぞれの光線が光源を出てから検出器に到達するまでに費した時間に応じて干渉が起こる。光速の変化や距離の変化により、光線が費した時間が僅かでも変化すると、干渉縞の位置が動くはずである。

ローレンツ変換、ローレンツ収縮(1899年)

電磁理論に速度Vで相対運動している場合にニュートン力学(ガリレイ変換) $x = x' + Vt$ を用いると

$\begin{aligned} \text{div} E &= \frac{\rho}{\epsilon_0} \\ \text{div} H &= 0 \\ \text{rot} E &= -\mu \frac{\partial H}{\partial t} \\ \text{rot} H &= i + \epsilon \frac{\partial E}{\partial t} \end{aligned}$	$\begin{aligned} \text{div} E &= \frac{\rho}{\epsilon_0} \\ \text{div} H &= 0 \\ \text{rot} E &= -\mu \frac{\partial H}{\partial t} + \text{rot}(V * \mu H) \\ \text{rot} H &= i + \epsilon \frac{\partial E}{\partial t} - \text{rot}(V * \epsilon E) \end{aligned}$
--	---

$V \rightarrow x$

物理法則の相対性(「物理法則はあらゆる慣性系間で同一である」と矛盾

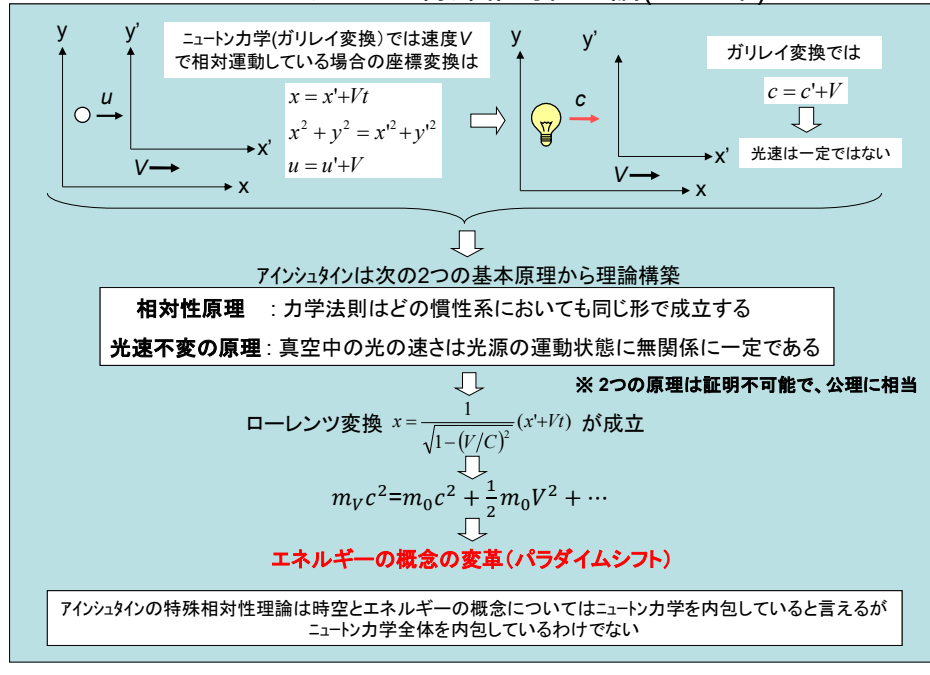
実験結果とも矛盾

ガリレイ変換に代わりローレンツ変換 $x = \frac{1}{\sqrt{1-(V/C)^2}}(x' + Vt)$ を用いると物理法則の相対性が成立

速度により、「2点間の距離(物体の長さ)は縮む」というローレンツ収縮が生じる

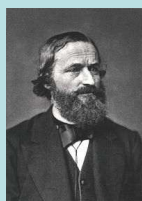
時空の概念に新たなパラダイム(シフト)が必要であったが
この時点では既存のパラダイムの延長上で考えた

アインシュタインの特殊相対性理論(1905年)



アインシュタインの光量子仮説(光の粒子性)までの道のり

キリヒホッフの放射法則の発見(1859年)



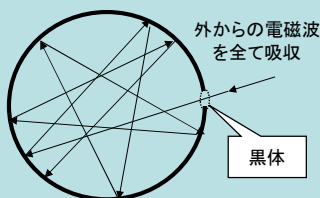
G. R. Kirchhoff
1824-1887

1847年に電気回路の基本法則を発見したキリヒホッフは、溶鉱炉の研究から1859年に黒体放射を発見し、放射に関する法則を見出した。

物体の電磁波の吸収率と放射率の比は温度と波長のみで決まり、一定である。

↓ 熱力学により

吸収率と放射率は等しい。



大きな球形空洞表面の極小孔より入った電磁波は空洞内部で反射を繰り返し、外に出ることはない。これを黒体放射(空洞放射)と言う。

黒体放射

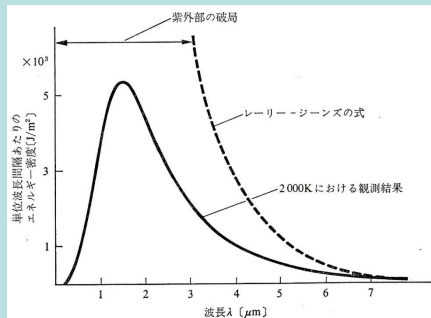
吸収率1 ⇒ 空洞に入射する電磁波を全て吸収

放射率1 ⇒ 空洞の温度に対応した電磁波のみ放射

この空洞を黒体と言う。

レーリー・ジーンズの式(1900年)

分子運動論と電磁気学から導かれる、温度から放射される電磁波のスペクトル強度分布について、レーリー卿が1900年に最初に発表した。その後、1905年にジェームズ・ジーンズが係数に誤りがあることを指摘したことで、レーリー・ジーンズの式と呼ばれる。



温度 T の物体から放射される波長 λ のエネルギー密度は

$$u_{\lambda} = \frac{8\pi kT}{\lambda^4} d\lambda$$

であり、波長が

$\lambda \rightarrow 0$ では、

エネルギーは

$u_{\lambda} \rightarrow \infty$ となり、

実験事実と矛盾する。

レーリー・ジーンズの理論においては、次のことを前提に構築されていた。

- ・ 空洞内に存在する電磁波の定常波の波長分布を幾何学的に求める。
- ・ 熱力学とニュートン力学からなる分子運動論により、定常波のエネルギーを求める。



ニュートン力学も熱力学も、そして電磁波理論も間違っている可能性が生じた。

プランクのエネルギー量子化仮説(1900年)



M. Planck,
1858-1947

小さい波長領域でも**実験と良く合う**次の式をプランクは導入した。

$$u_{\lambda} = \frac{8\pi}{\lambda^4} kT \Rightarrow u_{\lambda} = \frac{8\pi hc}{\lambda^4} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

実験式であって理論式でない

レーリー・ジーンズの理論が破綻した原因は、空洞の中に存在する電磁波の周波数 ν が増えるとその量も増えることによる。

プランクは周波数 ν の波はエネルギー $h\nu$ の不連続な間隔でしかとることが出来ないと仮定した。



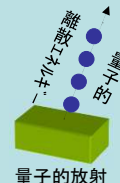
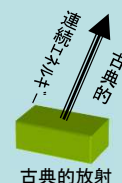
エネルギーの量子化について、プランクは数学的便宜上の仮定とみなし、

古典論(既存のパラダイム)とは異なり

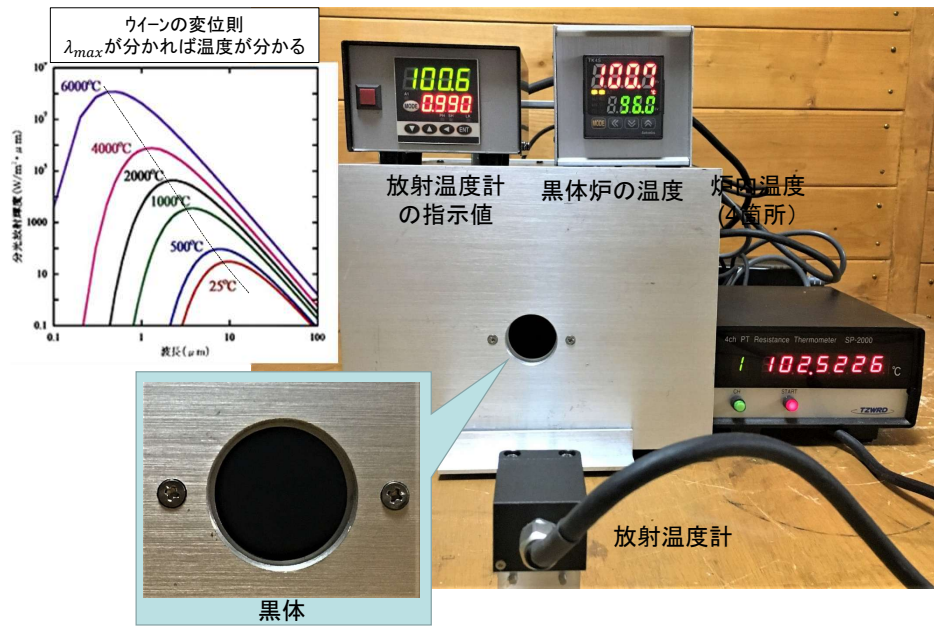
自然界の本質的な特徴を示しているとは考えていなかった。



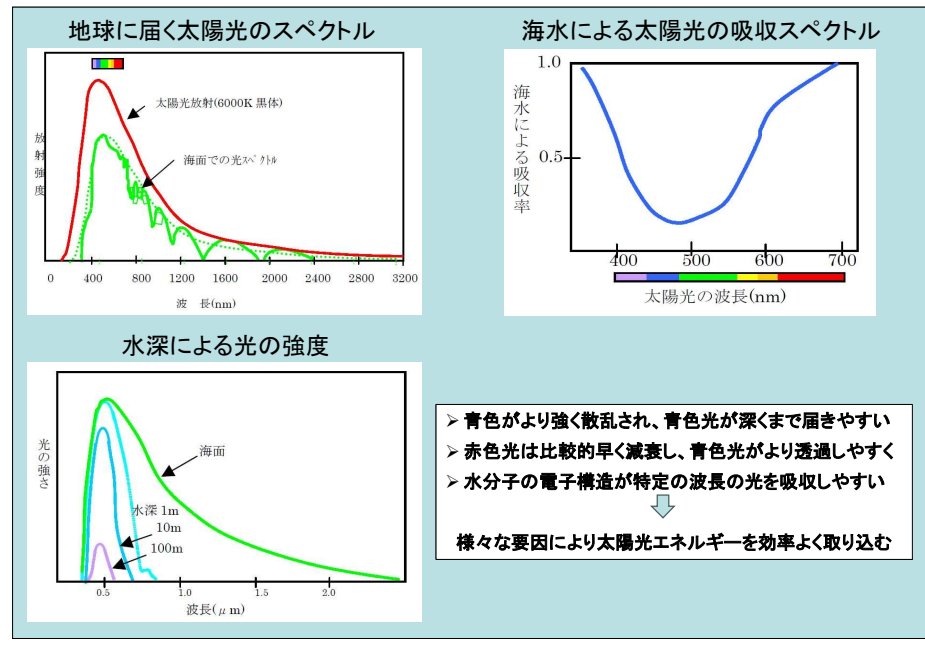
既存のパラダイムに固守したとはいえ、量子力学というパラダイムシフトの形成に重要な役割を果たしたことは、マックスウェルのエーテルの分極による変位電流の導入、アインシュタインの隠れた変数への考えと共通する点がある



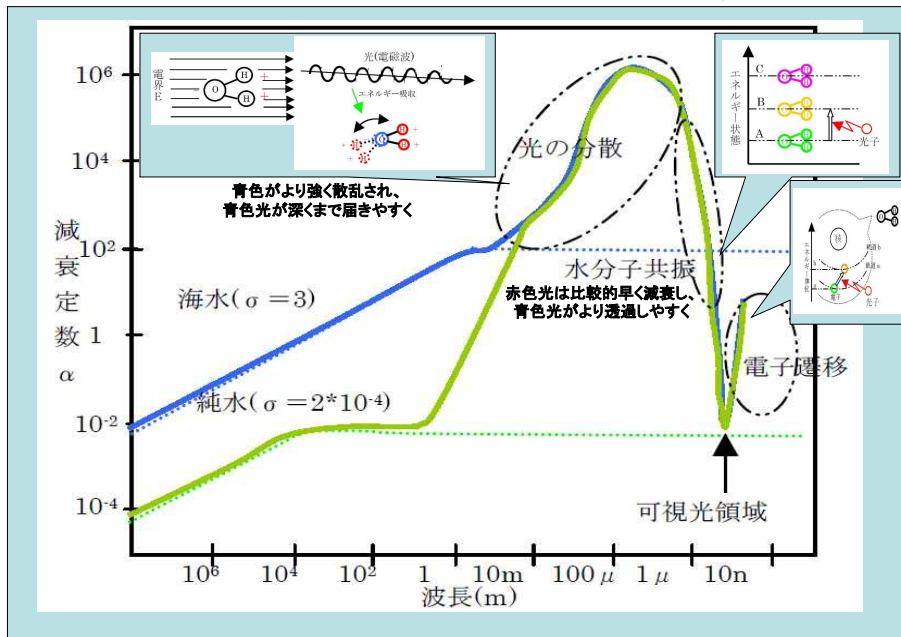
具体的な黒体炉(放射温度計の校正基準器)



海水は太陽の熱放射を効率良く吸収



海水による太陽の熱放射の吸収メカニズムは複雑



海水による太陽の熱放射の吸収と生命の誕生、そして不完全性定理

様々な要因により、海水は太陽光エネルギーを効率よく取り込む



太陽光のスペクトルと海水の吸収特性の一致が、
生命の誕生と進化にとって重要な役割を果たす



何故、そうなって生命が誕生したことは
宇宙の誕生、エントロピー最小の初期状態などと共に不明な事

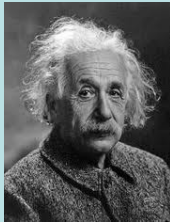


- コズミック・チューニング: 宇宙の物理法則が偶然ではなく、
生命の発展に適した形で調整されている(?)
- ゲーデルの不完全性定理: **どんな整合性のある論理体系にも、
それ自身の枠組み内では証明できない真実が存在する**

- (非)ユークリッド幾何学、ブール代数の公理
- 特殊相対性理論での光速一定、相対性
- 量子もつれ、量子ゆらぎ

アインシュタインの光量子仮説(1905年)

1905年、光電効果の実験事実に基づき、アインシュタインはプランクの仮説を実体化して光量子仮説を提案した。(エネルギー塊⇒粒子)



Albert Einstein
1879- 1955



光電管
WE 3A(1926)

光電効果

金属に光を照射すると電子が放出される現象

- ・ 光を照射すると**時間遅れなく**電子を放出。
- ・ いくら強い光を当てても**周波数が一定以上**でないと電子が放出されない。



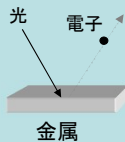
- 電磁波理論では、電磁波のエネルギーの吸収から電子放出までにある一定以上の時間がかかる。
- 電磁波のエネルギーは周波数でなく振幅に対応している。



光の二重性: 波動性と粒子性の存在
古典論(既存パラダイム)とは矛盾する



パラダイムシフト



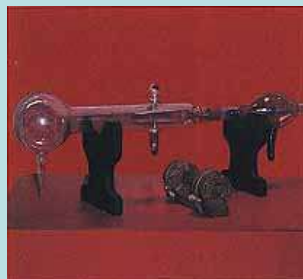
電子の粒子性と波動性の歴史

J. J. トムソンの電子の発見(1897年)

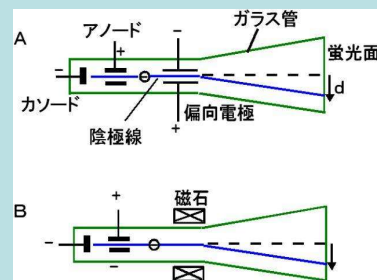


J. J. Thomson,
1856-1940

1855年、ブリュッケーとガイスラーによって作られた真空放電管(ガイスラー管)により、1859年、ブリュッケーが陰極線を発見。1897年、J. J. トムソンが偏向電極と一部のガラス面に蛍光物質を塗った真空放電管による実験Aにより、陰極線は電荷と質量を持つ粒子(電子)であることを発見した。



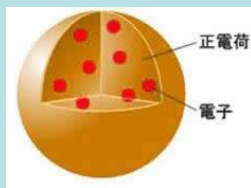
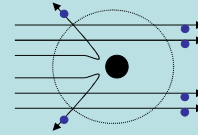
トムソンの実験装置



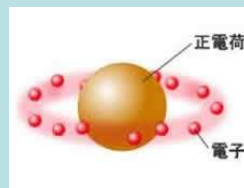
ラザフォードの実験(原子模型)(1911年)

1904年、最初の原子構造モデルとしてトムソンの模型と長岡半太郎の模型が現れた。

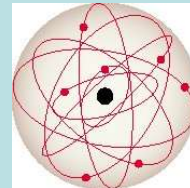
1911年、ラザフォードは金箔にα線を照射し、大部分は透過するが、一部が大きな角度で散乱されることを発見した。ここから原子の内部に正電荷の原子核が存在することが明らかになった。



トムソン模型



長岡半太郎模型



ラザフォード模型

ボーアの量子条件による原子モデル(1913年)

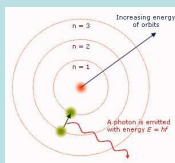


Niels Bohr
1885-1962

ラザフォードの原子模型の場合、既存の理論で考えると、原子核をまわる電子は電磁波を放出、つまり、エネルギーを減少させながら回転するので、電子は原子核に吸い込まれてしまう。

マックスウェルの電磁理論では説明不可

そこで、1913年、ボーアはラザフォードの原子模型に量子論の考えを導入し、水素原子のスペクトルを説明するのに成功した。



原子核をまわる電子
(ミクロの状態)

ボーアの仮定1-量子条件

電子は限られた軌道のみが許され、その軌道においては安定しており、電磁波は放射されない。

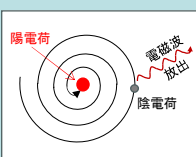
$$mvr = n \frac{h}{2\pi} \quad n = 1, 2, 3 \dots$$

ボーアの仮定2-周波数条件

1つの安定軌道から他の安定軌道に移るときにのみ電磁波を放射・吸収し、その周波数は次の式に従う。 $hf = W_i - W_f$



量子条件は電磁理論では説明不可(パラダイムシフト)



陽電荷をまわる陰電荷
(マクロの状態)

マクロの状態において、陽電荷をまわる陰電荷は電磁波を放出しながら回転し、最終的には陰電荷は陽電荷に吸い込まれる。

この現象はマックスウェルの電磁理論で説明できるが、前期量子論は当然として量子力学によっても説明できない。



量子力学というミクロ現象の理論はマクロ現象を内包していない。

※ 量子電磁力学に拡張したことにより説明可能となった。

ド・ブロイの物質波(1924年)



ド・ブロイは、光が波であるとともに粒子であるなら、粒子である電子も波としての側面を持ち、この実在的な波を物質波とした。

↳ パラダイムシフト

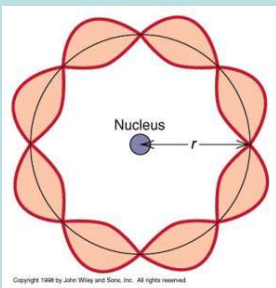
粒子性と波動性を結び付けるプランク-アインシュタインの関係から

$$2\pi r = n\lambda = nh/mv$$

この関係は電子についても成立すると仮定すると、物質波が定在波となり存在する条件は

$$mvr = n(h/2\pi)$$

となり、 $E = h\nu$ $p = h/\lambda$
よって、ボア-の量子条件と一致する。



↓
シュレーディンガーの波動方程式やボルの確率解釈により実在的な波としては否定された。

マクスウェルが電磁波を予言する過程で、エーテルの存在を前提とし、その分極として変位電流の概念に到達したが、その後、エーテルの存在が否定された事と類似している。

電子顕微鏡や中性子回折に関連する実験物理学では、ド・ブロイ波長が重要な実用的指標であるため、実在する波と勘違いすることは要注意。

ハイゼンベルクの行列力学(1925年)



W. Heisenberg
1901-1976

ハイゼンベルクは“実際に目にするのは原子から出る光だけで、そのスペクトル強度と振動数の関係が分かれば良く、

「電子や軌道など、実際に観測できないものを理論の中に持ち込むのは誤り」だと考え(実在論の否定)、スペクトル強度と振動数の関係から行列力学を作り上げた。⇒ 哲学的には主観的観念論の立場

微視状態では粒子の運動量 p と位置 x を古典力学のように定まった状態と考えるのではなく軌道間の遷移成分 X_{mn} からなる行列と考える。

$$X = \begin{pmatrix} X_{11} & X_{12} & X_{13} & \dots \\ X_{21} & X_{22} & X_{23} & \dots \\ X_{31} & X_{32} & X_{33} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix}$$

粒子の運動量 p と位置 x が行列であるとする

$$px \neq xp \quad px - xp = -i\hbar \Rightarrow \Delta x \Delta p \geq \hbar/4\pi$$

$$p = i\sqrt{\frac{\hbar}{2}} \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 & \dots \\ 1 & 0 & -\sqrt{2} & 0 & \dots \\ 0 & \sqrt{2} & 0 & -\sqrt{3} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix} \quad x = \sqrt{\frac{\hbar}{2}} \frac{1}{\lambda} \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & \dots \\ 1 & 0 & \sqrt{2} & 0 & \dots \\ 0 & \sqrt{2} & 0 & \sqrt{3} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix}$$

シュレーディンガー波動方程式(1926年)



Schrödinger,
1887 - 1961

シュレーディンガーはド・ブロイの物質波を波動関数 ψ で表し、その動きは波動方程式に従うことを示した。

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + V(x)\psi$$

シュレーディンガーは波動関数 ψ が実在する波を示すものと考えたが、それは電子の存在確率を示す関数であると考えられている。

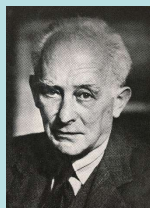


ヒルベルトとシュレーディンガーは行列力学と波動力学が数学上、形式的に同等であることを示し、ここで量子力学が完成した。



但し、現象的には行列力学と波動力学は同等とは言えず、行列力学で説明できる現象には限界があるため、物理現象の解析には波動力学を用いることが多い。

ボルの存在確率(1926年)



Max Born
1882-1970

ボルンは、波動関数 ψ によって与えられる

$$|\psi(x)|^2$$

は存在確率を表すと考えた。但し

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(x)|^2 dx = \int_{-\infty}^{\infty} \psi(x)^* \psi(x) dx = 1$$

ボルンは電子が原子核から散乱された際、その電子は粒子として観測され、どこで観測されるかを示す確率と波動関数が関連することに気付いた。

(粒子一元論)

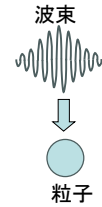


シュレーディンガーの波動方程式の波動関数 ψ は電磁波のような実在する波を表すものではないと考えた。

波動一元論と粒子一元論

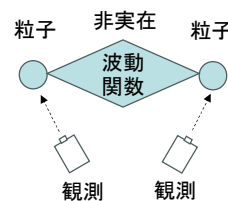
シュレーディンガーの波動一元論

シュレーディンガーは波動関数 ψ が実在する波を表わすと考え、粒子はその波からなる波束であると考えた。よって、 $|\psi(x)|^2$ は物質密度を表し、1個の電子でも空間に分布していると考えた。しかし、1個の電子が2つの電子に分かれることもあり得ることになり事実と反する。

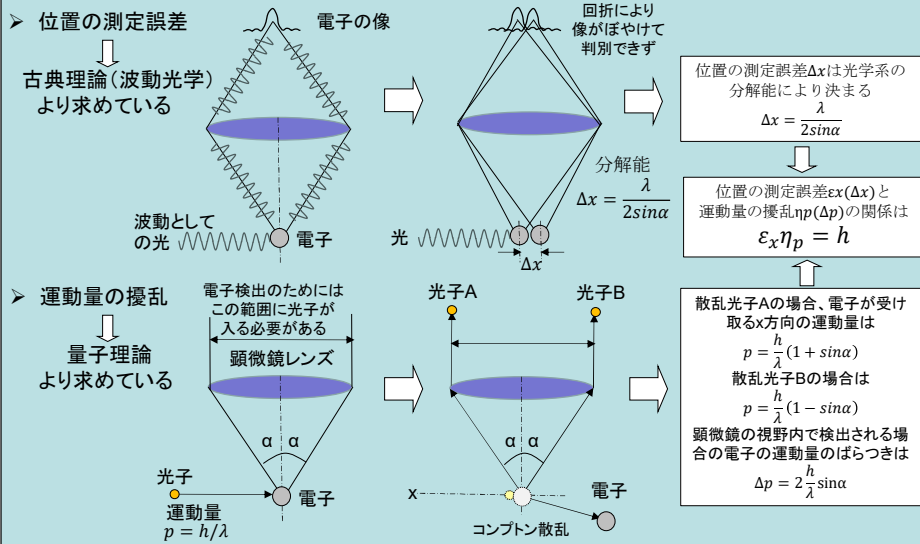


ボルの粒子一元論

ボルンは対象が観測される場合は必ず粒子として観測され、観測と観測の間は波動方程式に従い、存在確率に対応する波動関数 ψ の重ね合わせの状態にあるとした。この結果、観測により波動関数が崩壊するという厄介な問題が生じた。



不確定性理論(ハイゼンベルクの思考実験)(1927年)

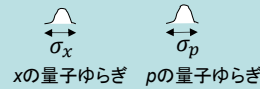


この思考実験には古典理論(波動光学)と量子理論を混用している矛盾がある。
(位置測定で顕微鏡視野のある位置を指定し、運動量の擾乱では顕微鏡視野内のばらつきを考えている)

ケナードの不確定性理論(1927年)

測定とは関係なく、量子ゆらぎという量子が持つ本質的不確定性を、ケナードは示す。

$$\sigma_x \sigma_p \geq h/4\pi$$



1930年、ハイゼンベルグは波動関数より、ケナードと同じ不等式を導き出すがその時点においても、量子ゆらぎと測定に伴う不確定性を混同していた。

小澤の不確定性原理(2003年)

2001年、小澤は $\sigma_x \eta_p \geq h/4\pi$ を導き出し、2003年に次の不等式を導き出した。

$$\frac{\varepsilon_x \eta_p}{\eta_p \text{により影響された}\sigma_x \text{と}\eta_p \text{との効果}} + \frac{\varepsilon_x \sigma_p}{\varepsilon_x \text{により影響された}\sigma_p \text{と}\varepsilon_x \text{との効果}} + \frac{\sigma_x \eta_p}{\eta_p \text{により影響された}\sigma_x \text{と}\eta_p \text{との効果}} \geq h/4\pi$$

測定誤差 ε_x がゼロでも、 $\eta_p \rightarrow \infty$ とはならず
ハイゼンベルグの不確定性原理成立せず



量子力学の発展には、量子系の本質的不確定性の量子ゆらぎと量子系に対する古典系の干渉による測定誤差を明確に区別する必要がある。

温度(マクロ系)測定における不確定さ

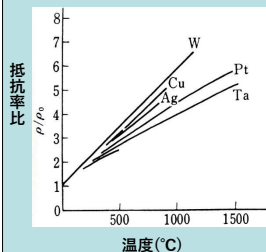


- 温度センサの電流によりジュール熱が生じ、センサ温度が周辺温度より上昇
- XにセンサSが熱接触し、XとS間で熱移動⇒熱平衡に達する必要がある
- 測定による不確かさではない、より本質的な不確かさ、つまり、温度ゆらぎが存在する。温度ゆらぎは温度という物理概念が成立しないことにより生じる

温度測定における科学理論の限界

最新の抵抗と温度の関係(国際温度目盛ITS-90、実験式)は次式で示される。

$$R = R_{0.01} \left(W_r(T_{90}) + a(W_r(T_{90}) - 1) + b(W_r(T_{90}) - 1)^2 + c(W_r(T_{90}) - 1)^3 + f \left(W_r(T_{90}) - R_{660.323}/R_{0.01} \right)^2 \right)$$

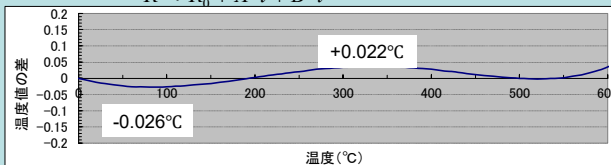


金属抵抗の温度特性

$$W_r(T_{90}) = D_0 + \sum_{i=1}^9 D_i \left(\frac{T_{90}/K - 754.15}{481} \right)^i$$

しかし、物性論での理論式は次式となり、その差は大きい。

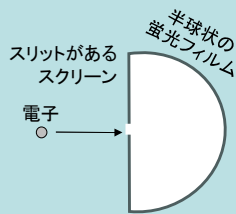
$$R \approx R_0 + A \cdot t + B \cdot t^2$$



- マクロ系においても測定による不確定性、ゆらぎは存在する。
- 物性論(量子力学)でも明確に説明できない現象は存在する。

電子による回折の思考実験(1927年10月 第5回ソルヴェイ会議)

アインシュタインはスリットのあるスクリーンと半球状の蛍光フィルムからなる系のスリットに1個の電子を通過させる思考実験を提案。



① アインシュタインのアンサンブル解釈

各電子は軌道が確定しているが初期条件が異なる電子の集団により回折縞が生じる。(常に局所性)

② コペンハーゲン学派の解釈

電子はスリットから確率波として一様に広がって伝播し、フィルム上のある一点に収縮する。(非局所性から瞬時に局所性へ)

アインシュタインは波動関数の瞬時に収縮することに対して、特殊相対論に反する「奇妙な遠隔作用」として反対し、波動関数の補助的な変数(隠れ変数)を導入する必要があると主張。

1個の電子による干渉が立証されたため、アンサンブル解釈は一応、否定された。

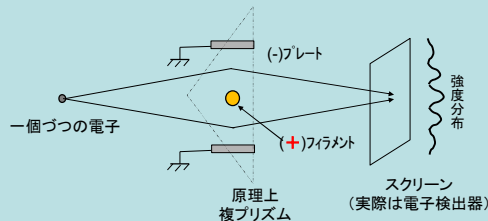
- 異なる時間に送出した電子同士が独立であると仮定するとアンサンブル解釈は否定される。
 - 異なる時間に送出した電子がもつれの状態にあると仮定するとアンサンブル解釈は肯定される。
 - そのためにはもつれの概念が時間スケールまで拡張する必要がある。
- 更に、時空の概念の修正が必要。

1個の電子の回折現象を量子もつれを用いて説明

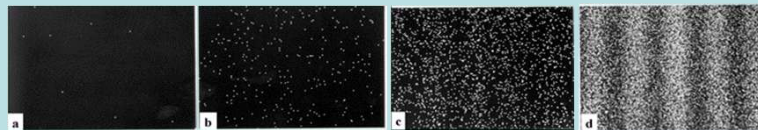
- 電子がスリットを波源として、幾つかの波動関数の重ね合わせの状態にある波がスクリーンに向かう。
- 1つの波動関数に対応するスクリーン上の1点で粒子として検出。これを波動関数の収縮と言う。
- 重ね合わせの状態にある波動関数は量子もつれの状態にあり、波動関数の1つが粒子として検出されると、量子もつれにより他の波動関数は瞬時に消える。これを波動関数の収縮と呼んでいる。

※ 量子もつれと波動関数の収縮の関係は、現時点では仮説の段階です。

HITACHIによる電子1個毎による干渉実験(1989年)



- 細い針金上の正電極のフィラメントを中央に配置し、その両側に接地されている平行な2枚のプレートを設置することにより電子複プリズムを形成する。
- 電子複プリズムは光における2重スリットと同じ機能を持つ。
- 電子を1個ずつ複プリズムに向かって送出すると、初めはばらばらの点の模様であったが状所に干渉縞が見えだし、その波形が鮮明になる。

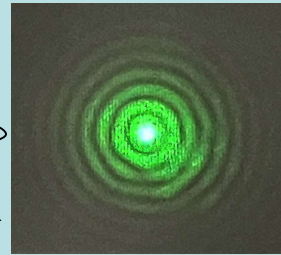
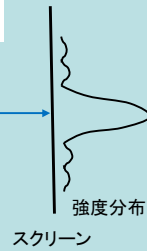


電子を1個ずつ送出していくと次第に干渉波形(d)が見えてくる

この現象は、1個の電子が干渉をおこなっているとも、統計的結果(アインシュタインのアンサンブル解釈)とも解釈できるが、電子のスリット通過を観測した場合には干渉が生じないことにより、1個毎の電子の干渉を阻害していると考えられる。但し、観測によりアンサンブル現象を壊したとの解釈の余地も残る。

光と電子による回折像の実験

本実験はレーザー光をピンホールに照射するより波動の回折現象を体感することを目的とし、ピンホールの大きさに反比例して回折像の強弱の間隔が変わることを知る事が出来ます。

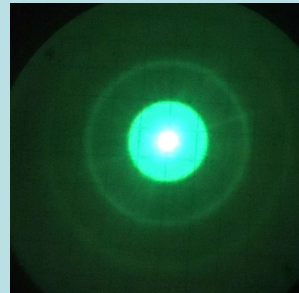


実測の回折像(520nm)

電子は波動の性格を持つため、ピンホールと同じ特性を有する対象に電子を照射することにより回折像を得ることが出来ます。



CRTを用いた電子による回折像の実験装置



観測された電子の回折像と思われる映像

④ 何故、科学史においてパラダイムシフトが生じるのか (科学革命の構造とは？)

実在の本質は非決定論

三体問題⇨3つの質点すら軌道を予測できない

三体問題(例えば、太陽-地球-火星)は変数18に対し関数10、
よって、解を得られない。



最も単純な系を除いて
マクロ系も決定論では表せない



ミクロ系だけでなくマクロ系も本質は非決定論に従う

制限三体問題

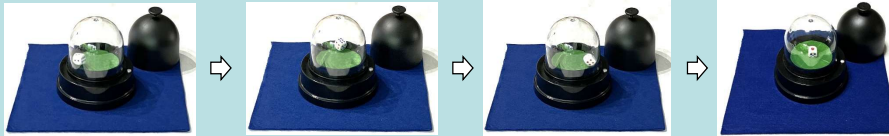
太陽・地球・月のような制限三体は近似解が得られる。制限三体問題の条件は
・ 1つの質量が無視できるぐらい小さい。
・ 楕円でなく円軌道とみなすことが出来る。

サイコロ・ゲームと波(状態の重ね合わせ)、そして複雑系情報

サイコロ・ゲームは複雑(超マクロ)系であり、ニュートン力学的決定論は成立しない。

本質的に確率論的であり、サイコロの状態は確率関数の重ね合わせで示することができる。

$$\psi = \psi_1 + \psi_2 + \psi_3 + \psi_4 + \psi_5 + \psi_6$$



蓋をしないとサイコロの動きは見えるが、最終的な出目の値を予測できない。
蓋をすることによりサイコロの動きは見えなくなるが、サイコロの状態は変わらない。

量子系と異なり観測の影響を受けない

サイコロ・ゲームにおける波とは、サイコロの実在そのものを示しているのではなく、サイコロという実在からの複雑系情報を示している。



蓋をすることにより、サイコロが停止してもサイコロの出目が分からない。
蓋を取ることに初めて出目が分かる。

蓋を取ることに複雑系情報(波)が収縮する



サイコロ・ゲームから科学哲学へ

1. マクロ的決定論の思い込みとミクロへの適用

ニュートン力学以来、マクロ系における決定論的な因果律が「自然の理(ことわり)」のごとく受け止められてきたため、その枠組みをミクロにも適用するのは自然な発想。

しかし、量子論は「ミクロこそが非決定的である」ことを示し、

また、マクロ的秩序は統計的多数性の結果として現れる近似的秩序である可能性がある。

この意味でマクロの決定論もまた、“実在”というより“有効理論”と言える。

2. 方程式が実在を示すべきという思い込み

数式や理論体系は本来「現象のパターンを記述する構文」に過ぎず、それ自体が“実在”と一致するという保証はない。虚数や複素数のような数理的存在も、便宜的記述なのか、ある深い実在を持つのかは立場によって分かれる。ここには記述と実体の混同(素朴実在論)という、科学哲学の古典的な問題が潜んでいる。

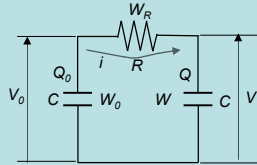
3. 測定の不確定性を“ミクロ特有”とみなす誤解

人間の知覚や機器による測定は、マクロであっても本質的に不確定性を伴い、複雑系における初期値依存性(カオス)も決定論的でありながら予測不可能性を内在する。つまり、測定と現象の分離が曖昧になる瞬間は、スケールを問わず存在するわけで、「ミクロゆえの不確定性」という見方は極めて限定的である。

4. 波の共通性は、重ね合わせ(干渉)でしかないことへの理解不足

電磁理論とコンデンサの充放電現象にみる科学理論の階層構造

抵抗によるコンデンサの充放電



$$R \frac{dQ}{dt} + \frac{Q}{C} = \frac{(Q_0 - Q)}{C}, \quad W_R = 2W = \frac{1}{2}W_0, \quad V = \frac{1}{2}V_0$$

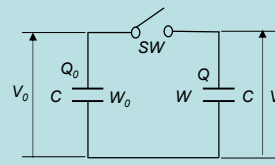
充放電後の2つのコンデンサの電気エネルギーは抵抗Rで散逸したエネルギーに等しい

最初、次の値で左側コンデンサは充電されている
 V_0 : 電圧、 Q_0 : 電荷、 W_0 : 電気エネルギー

充放電完了後、次の値で右側コンデンサは充電されている(左側も同じ)
 V : 電圧、 Q : 電荷、 W : 電気エネルギー

電気回路工学のオーム、キルヒホッフ法則などの法則、現象は電磁理論で説明出来るが、電磁理論は電気回路工学を完全に含有しているわけではない

理想コンデンサの充放電



$$\frac{Q}{C} = \frac{(Q_0 - Q)}{C}, \quad W = \frac{1}{2}W_0, \quad V = \frac{1}{2}V_0$$

抵抗Rが全くない場合の理想コンデンサの充放電においてもコンデンサの電気エネルギーの半分は散逸する

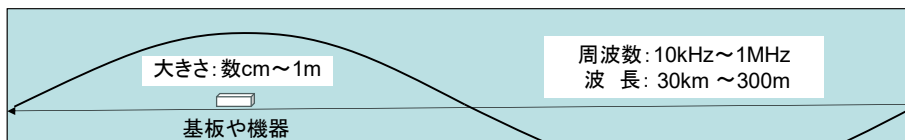
電気回路理論ではエネルギーの散逸を示しているがどのような形態でエネルギーが散逸するか不明

想定される原因としては
 ・電磁波の放出 ・コンデンサ間電磁結合によるエネルギー送出
 ・電荷の移動による熱エネルギー発生が考えられるが

電磁理論ではエネルギーの散逸を明確に説明できてない

電磁理論では多変数・複雑系であり、解を求められない

ノイズ現象に見る電磁理論の限界性



比較的低い周波数(1MHz以下)帯域のノイズ対策は理論的説明は困難で、経験からくるノウハウが重要

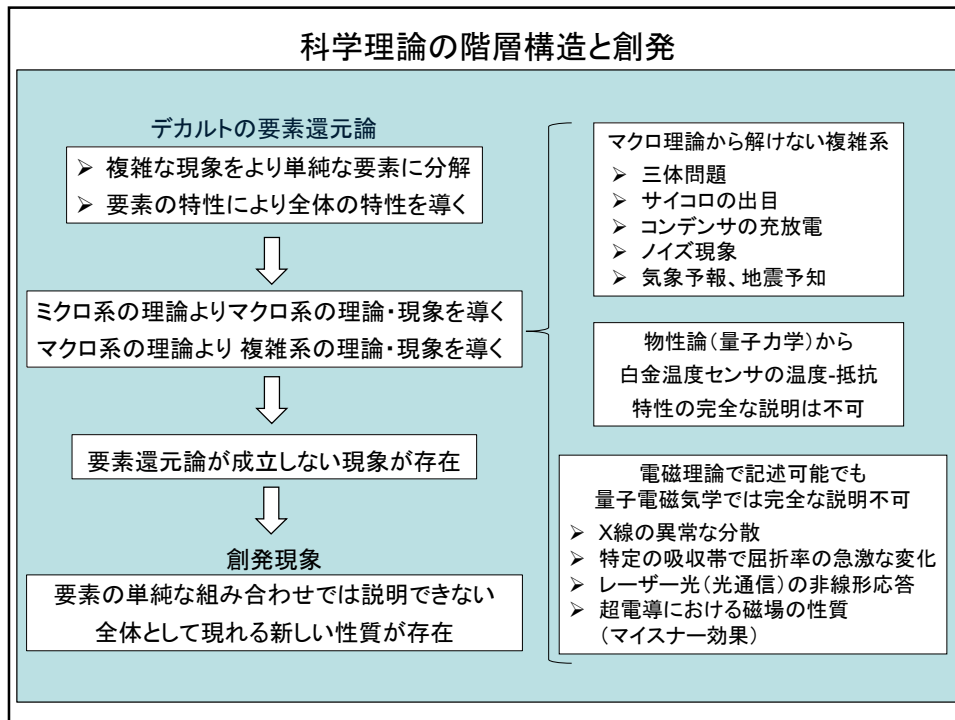
- 電磁理論は平均的場の状態を前提。位相の長さが問題になる局所的な場合は明確な解がない。
- 近接場・準静電界と遅延効果による問題と非線形性と境界条件の複雑化

解がないということは、電磁理論が理論体系として完全でも、限界性がある

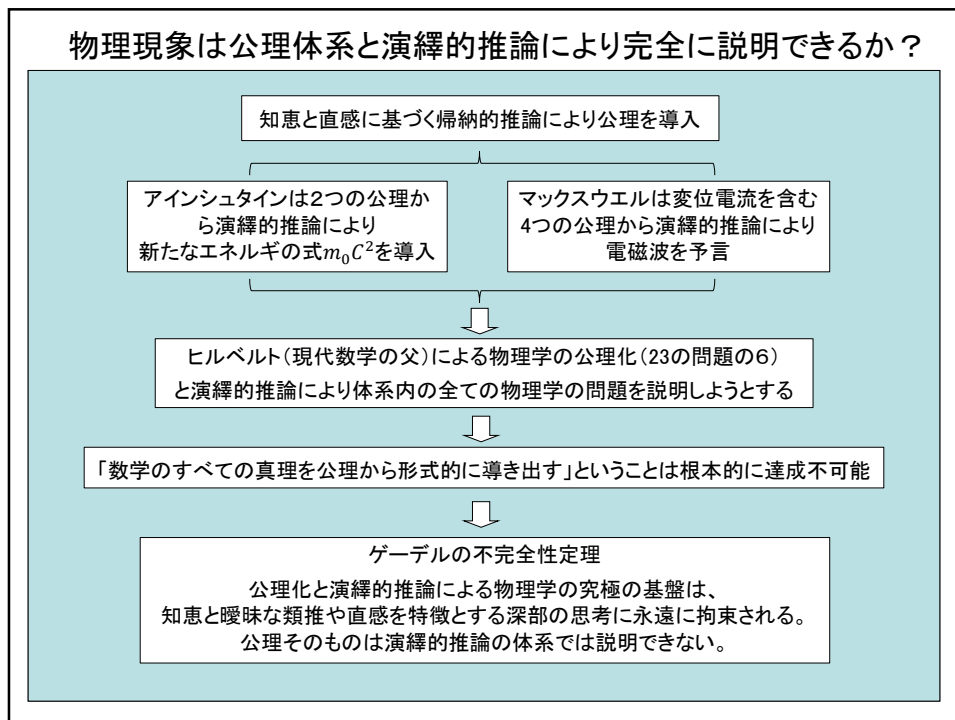
理論体系は完全であっても不完全性が存在するというゲーテルの不完全性定理にも通じる



科学理論の階層構造と創発



物理現象は公理体系と演繹的推論により完全に説明できるか？



科学革命の構造

- 科学は実在を前提とし、客観的実在とは証明できない真実(不完全性)
- 新たな科学理論(パラダイム)は既存の科学理論(パラダイム)を完全には包括しない(創発)
- 我々が知りうるのは客観的実在からの情報であり、情報を受ける側の影響を受ける(不確定性)
- 客観的実在は究極の複雑系で、その特定の側面を情報という形でしか知ることが出来ない(不完全性)
- 科学理論はある側面の情報により構築。見方が変われば情報も変わり科学理論も変わる(モデル化)

