T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題	ルイ・ド・ブロイ（1892-1987）の功績
Title	A meritorious deed of Louis de Broglie (1892-1987)
著者	村上陽一
Authors	Yoichi Murakami
出典	伝熱, Vol. 49, No. 208, pp. 52-57
Citation	Journal of the Heat Transfer Society of Japan, Vol. 49, No. 208, pp. 52-57
発行日 / Pub. date	2010, 7

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

ルイ・ド・ブロイ（1892~1987）の功績

A meritorious deed of Louis de Broglie (1892-1987)

村上　陽一（東京工業大学）
Yoichi MURAKAMI (Tokyo Institute of Technology)
e-mail: murakami.y.af@m.titech.ac.jp

ルイ・ド・ブロイ（1892~1987）

1. はじめに

1900 年のプランク法則の発表[1]によって幕を開けた前期量子論は，1913 年に発表されたボーア理論の成功[2]を契機として加速度的な展開を見せ始めます．本稿で焦点を当てるルイ・ド・ブロイは 1923 年, 当時の量子論の中心から離れたフランスにおいて，独自の思索に基づき物質と波動を結びつける理論の構築に成功し，その内容を幾つかの短い覚え書きとして発表します.

ド・ブロイの提案した「物質の波」という考えは当時あまりにも珍奇であり，しばらくの間真剣に捉えられることはありませんでした．しかしこの考えのもつ意味の重大さが理解されるようになると, これが後世に「量子力学の形成史において，プランクの量子とド・ブロイの物質波の二つが本質的に新しい出発点のアイデアを代表している」[3]と評される極めて重要な発見であったことが明らかになってゆきます.

2. 光の量子

2.1 アインシュタインの光量子仮説

1905 年，アインシュタインはプランクの理論およびそれまでに知られていた光電効果の実験観察と整合するものとして，光はプランクの式 $E = h\nu$ で与えられるエネルギー量子を持つ粒子であると提案します（光量子仮説）．すなわち，プランクが量子性を機械的振動子のエネルギーに留めていたのに対し，アインシュタインはこれを光にまで拡張したのでした．しかしこの考えは，その反証ともいえる波動性による解釈が数多くの実験証拠と共に確立していただけに，真剣に受け入れられるまでには長い時間を要しました.

2.2 コンプトンの実験

1923 年, アーサー･コンプトン（1892 - 1962, 1927 年ノーベル物理学賞）は単色の X 線を黒鉛結晶に照射し，その散乱角の増加とともに散乱 X 線の波長が長波長側にシフトすることを見出します．これは光の粒子が結晶内の電子に衝突し，電子を弾き飛ばすことで光子のエネルギーが低下したと考えることにより説明可能な結果で，その波長変化は光量子仮説に基づく予測と定量性に一致しました．これにより光子が実在のものであることが明確になり，以降光は波動性と粒子性を合わせ持つという考えが受け入れられてゆきます.

3. 発見にいたるまで

3.1 生い立ち： 科学への転向まで

ド・ブロイはフランスの名家であるブロイ公爵家の末子として生まれ，豊かな幼少時代を過ごします．十七歳年上の兄に実験物理学者のモーリスがおり，この兄から人生の要所で大きな影響を受けてゆきます．ド・ブロイはソルボンヌ大学の歴史科に入学後，中世史を主要科目に選択して学士課程を終えます．卒業後は暫く将来の方向について揺れ動き，法律や外国語などを勉強しつつ一年間過ごした後，科学へ進路変更し，二年間で学士課程を終えます[4].

ド・ブロイの人生の転機となったのは，1911 年

の「放射の理論と量子」と題された第一回ソルヴェー会議でした．量子論が急速な進歩を遂げつつあり，物理学を揺さぶる地震がひたすら激しくなる状況の中，第一線の学者が会して物理学の抱える諸問題を議論したのです[5]．その会議録の出版を兄のモーリスが担当していたことから，ド・ブロイは会議録が出版される前に，ほぼリアルタイムでその原稿を読む事ができました．この体験はド・ブロイに深い感動を与え，彼の心に「内面のクーデターを引き起こし」，これが契機となって「ひとが信仰の道に入るように，科学の道に入り，ほとんど修道者のように身を科学に捧げるようになった」[4]と伝えられています．

3.2 初期の着想

同じ 1911 年，ド・ブロイは力学と光学について熟考していた時，両者の間の類似に愕然として気付きます．すなわち，光線束の伝播を記述する幾何光学はフェルマーの原理に従いますが，この原理は光は常に最短経路（通過時間が最小となる経路）を取ることを教えます．一方，力学はモーペルテュイの原理(最小作用の原理)に従いますが，これも最短経路の原理です．ド・ブロイはただちに最短経路の原理を中心にして光学と力学を理論的に統合しなければならないと考え，それがその後の中心的な研究テーマとなってゆきます[6]．

3.3 第一次大戦による中断 ～ 研究の再開

その後，第一次世界大戦の期間も含め，1913 年から 6 年もの間兵役に出ることになります．兄モーリスの友人に無線電信技術を専門とする将軍がいたことから，ド・ブロイはエッフェル塔の無線局に配属されます．その後 1919 年 9 月に動員解除になるまでの期間，エッフェル塔の地下無線局で暮らしながら，無線電信の性能向上に関する研究や無線機の修理などを担当したそうです．

1919 年に復帰してからは，ド・ブロイは兄の X 線の研究所に通いながら研究を再開します．同時に，新しい知識を吸収すべく，熱流体分野でもお馴染みのポール・ランジュヴァン（1872 - 1946）の講義とセミナーにも参加していました．この時期のド・ブロイは，後の発見の基礎となる X 線に関する覚え書きや報告書を書いています．

4. ド・ブロイの理論

4.1 物質波の着想

ド・ブロイが物質が波動であるとの着想を得たのは，1922 年初頭に光量子に関する論文を書いてから 1923 年 9 月に至るまで，長い熟考の時期を経た後のことでした．その理論構築の特徴は特殊相対性理論を指導原理としたことにありました[3,4,7]．彼はまず光量子に付与すべき質量を精確に求めることを目指し，プランクの式

$$E = h\nu \tag{1}$$

とアインシュタインの特殊相対論の式

$$E = mc^2 \tag{2}$$

とを関連付け，振動数をもとに質量を定義するのが妥当と考えます[8]．

思考の過程で，ド・ブロイはこの考えが質量をもつ任意の物質粒子に拡張できる可能性を認識し，そこから質量と振動数を結びつけるという天才的な着想を得ます．このような物質と光（波動）を統合するというアイデアは，式(1)と(2)を同等なものと考えてかつ信頼するという以外には，それ以前に存在したいかなる実験観察からも類推しえない突拍子のないものだったと言えます [3,4]．

4.2 理論構築の試みと困難

ド・ブロイが初めに考えた粒子は，図 1(a)に示すような，その内部に振動を含むものでした．この粒子に対する静止系 K_0 から見た粒子の内部振動数をν^*_0，質量を m_0 とします．すなわち，式(1)と(2)からこの粒子は K_0 系において

$$\nu^*_0 = \frac{m_0 c^2}{h} \tag{3}$$

というリズムで脈拍することになります．一方，この粒子が速度 V で走って見える慣性系 K から観測したときの粒子の振動数ν^* は，相対論の求めるローレンツ変換によって

$$\nu^* = \nu^*_0 \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}} \tag{4}$$

となり，ν^*_0 より小さくなります（運動する時計の遅れ）．また，粒子のエネルギーE は

$$E = m_0 c^2 \Big/ \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}} \tag{5}$$

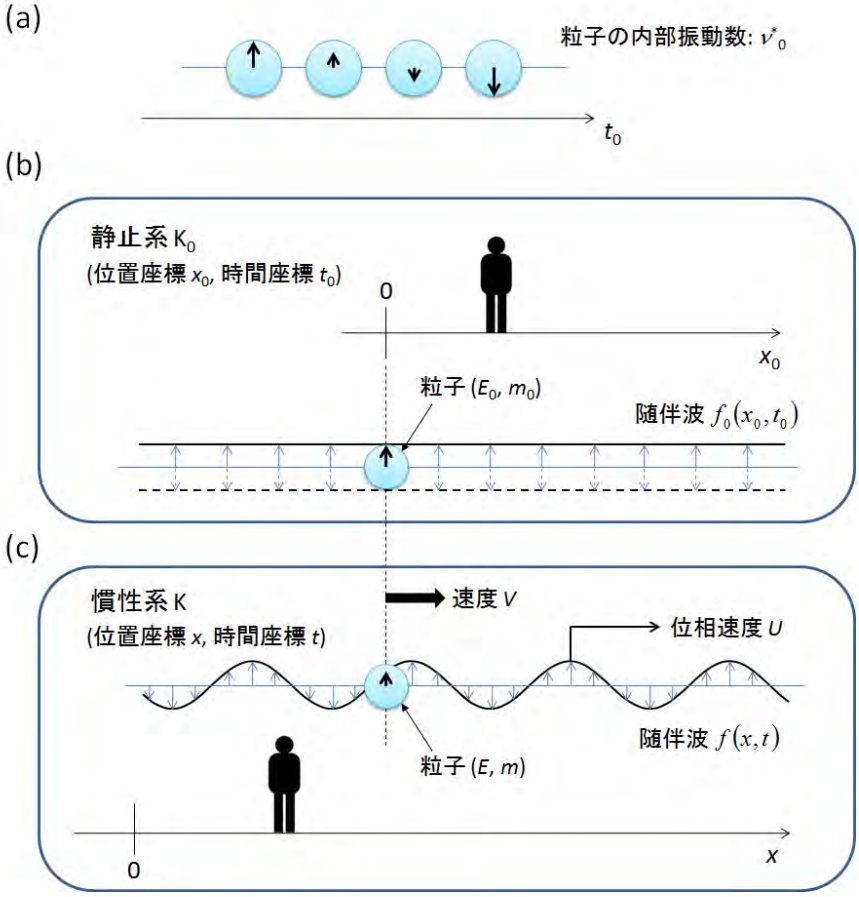

図 1　(a) 粒子が内包する振動の模式図．粒子内部の矢印は位相を表す．(b) 粒子に固定された静止系 K_0 における観測．粒子と随伴波の位相は一致．(c) K_0 系と相対速度 V の関係にある慣性系 K における観測．粒子の位置で粒子の位相と随伴波の位相は一致．理想的な場合として，随伴波は非局在化した単色の波で示している．

となり，こちらは K_0 系でのエネルギーより大きく見えることになります（運動する粒子の質量増加）．しかし，これでは振動数とエネルギーが互いに逆向きに変化することになり，図 1(a)の描像では相対論的共変関係が満たされない（式(1)がローレンツ変換で変わってしまう）ことになります．この問題はド・ブロイを悩ませました．

4. 3 物質波の導出

1923 年，ド・ブロイはこの困難を回避する方法を見出します（「そのとき，大いなる光が頭の中で突然に輝きわたった」[4]）．彼は，問題を解決するためには，粒子には内部の振動と同じ位相を持つ空間的に広がった波動が結びつけられている（粒子に波動が随伴する）必要があることを認めます．そして 1923 年 9 月，理論を完成させたド・ブロイは，科学史上重要な二本の覚え書き[9,10]を相次いで発表します．この覚え書きでは，電子波の考えに基づくボーアの量子条件の解釈（後述），および物質の回折と干渉の可能性について，初めて言及がなされています．

ド・ブロイの見出した道筋は以下のようなものでした[11]．図 1(b)に，静止系 K_0 における観測者が見た粒子とそれに結びついて空間的に広がった随伴波を示します．随伴波の振動数 ν_0 は粒子の内部振動数 ν^*_0 に等しく，両者の位相は一致するものとします．これは位相が場所に依らない波で

$$f_0(t_0) = A\sin(2\pi\nu_0 t_0) \qquad (6)$$

と表されます（A: 振幅）．

一方，相対速度が V の慣性系 K（図 1(c)）からこの波を観測するときには，その系の観測者が用いるべき時間 t はローレンツ変換によって

$$t_0 = \frac{t - Vx/c^2}{\sqrt{1 - V^2/c^2}} \tag{7}$$

となります．すなわちK系での随伴波は

$$\begin{aligned} f(x,t) &= A\sin\left(2\pi\nu_0 \frac{t - Vx/c^2}{\sqrt{1 - V^2/c^2}}\right) \\ &= A\sin\left\{2\pi\nu\left(t - \frac{Vx}{c^2}\right)\right\} \end{aligned} \tag{8}$$

のような位相が場所により異なる波となり（同時性の崩れ），ここで

$$\nu \equiv \frac{\nu_0}{\sqrt{1 - V^2/c^2}} = \frac{mc^2}{h} \tag{9}$$

はK系で見た随伴波の振動数となります．（最左辺と最右辺の関係は式(1)と式(2)から．）

すなわち，式(8)はこの随伴波が x 方向に

$$U = \frac{c^2}{V} \tag{10}$$

の位相速度を持つことを示しています．この波の波長λは，式(9)および式(10)を用いて

$$\lambda = \frac{U}{\nu} = \frac{h}{mV} \tag{11}$$

と導かれます．式(11)はド・ブロイの物質波の関係式であり，この最も有名な式は1924年の学位論文の最後にようやく登場します．

この学位論文は，講義とセミナーを通じて知っていたランジュヴァンに提出されます．ランジュヴァンは，この内容が彼の著名な友人の興味を引くかもしれないと考え，学位論文を一部アインシュタインに送ります．アインシュタインからの返信は次のようなものでした．「ド・ブロイの仕事は私に大きな感銘を与えました．彼は巨大なベールの片端を持ち上げたです．」[4]　以降，アインシュタインはド・ブロイの強力な理解者となります．

4.4 粒子速度の物理的意味

導出過程では，粒子は速度 V で移動する点であり，それに波動（物質波）が結び付いているとしていました（図1）．振り返って，これがどのような物理的意味に対応するのかを見てゆきます．

現実の波動は，図1(c)に示したような無限に広がった単色の波ではなく，互いに近い振動数の波が重なり合った空間局在性（うなり）を有する波束として考えられます．式(9)と式(11)から V を消去すると，角周波数ω (= 2πν)と波数 k (=2π/λ)を用いて物質波の分散関係

$$\omega^2 = c^2\left(k^2 + \frac{2\pi m_0{}^2 c^2}{h^2}\right) \tag{12}$$

が得られます．また，レイリーの波動の式によると群速度（波束の振幅の伝播速度）は $d\omega/dk$ で与えられます．式(12)から $d\omega/dk$ を計算すると

$$\frac{d\omega}{dk} = \frac{kc^2}{\omega} = \frac{c^2}{\nu\lambda} = \frac{c^2}{U} \tag{13}$$

となり，これと式(10)から，粒子の速度 V は物質波の群速度に等しいことが判明します．すなわち物質波の速度 U が式(10)により超光速の波であるのに対し，物体の速度 V は物質波の波束の群速度に対応して光速 c を越えることはありません[12]．このことはド・ブロイの理論の物理的健全性を示す根拠となっています．

4.5 ボーアの量子条件との関連

1913年，ボーアは原子内の n 番目の軌道（半径 r_n）に運動する電子が満たすべき条件として

$$mV_n r_n = \frac{nh}{2\pi} \tag{14}$$

（n = 1, 2, ···）を導入しました．ド・ブロイはこの

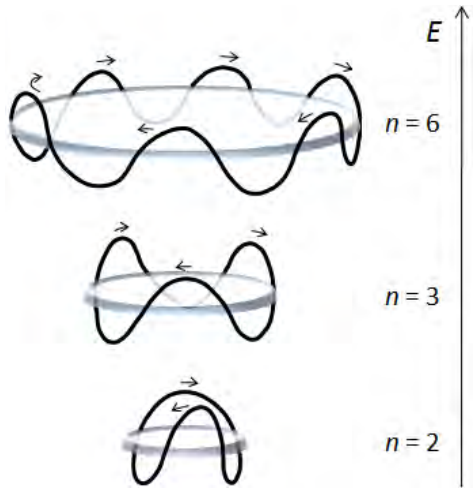

図2　電子波で表したボーアの量子条件（量子数 n = 2, 3, 6 の場合）．円環はボーアの電子軌道．

量子条件を，電子の波動が定常の波となるために軌道を一周した際に位相が接続する条件（共鳴条件）と説明します[9]．これは図 2 のように軌道上に電子波の波長が整数個入る条件に他ならず，すなわち式(14)は式(11)を用いて

$$2\pi r_n = n\lambda \qquad (15)$$

と明快な形に書き換えられることになります．

5. 実験による確認

5.1 ラムザウアーの実験

1921 年頃，ドイツの物理学者ラムザウアー（1879 - 1955）は希ガスに電子線を照射し，その透過能を調べていました．彼は，電子の速度が低い領域では透過能が速度の低下につれて下がり，さらに速度を低下させると今度は透過能が急激に上がるという奇妙な結果を得ます．この結果は気体原子と電子の散乱断面積が速度には大きく依存しないと考えられる古典論では説明がつかず，暫くの間，人為的な結果だと思われていました．

21 歳だったゲッチンゲンの学生，エルザッサー（後の地球ダイナモ理論の始祖）は，ラムザウアーの観察を含む幾つかの未解釈の実験結果が，ド・ブロイの理論によって解釈可能であると指摘します．ラムザウアーの結果は，電子の速度が低くなると電子の波長が原子の径に比べて十分長くなるために，波が殆ど散乱されることなく原子気体を透過し始めるために起きたものでした．

5.2 ダヴィソンとジャーマーの実験

アメリカのベル研究所のダヴィソンとジャーマーは 1927 年，電子線をニッケル結晶に照射する実験を行いました[13]．彼らは電子を 54 V で加速して結晶に照射し，角度θ= 50°の方向に散乱の極大が現れる事を見出します（図 3）．この速度において，電子の波長は式(11)から 1.67 Å と予想されます．一方，ニッケル結晶の格子定数は X 線を用いた実験から d = 2.15 Å と知られています．すなわち，実験結果の示す波長は $d \sin\theta$ = 2.15 sin(50°) = 1.65Å であり，これはド・ブロイ理論による予想 1.67Å と極めて良い一致を示しました．これにより物質波の実在が証明され，ド・ブロイは 1929 年，ノーベル物理学賞を受賞することになります．

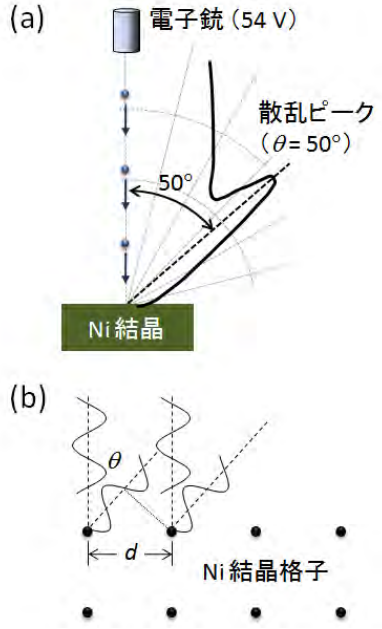

図 3　(a) ダヴィソンとジャーマーの実験の模式図　(b) ニッケル結晶表面での電子回折の模式図．特定の方向に強め合いの干渉が起こる．

6. 物質波の例

6.1 電子顕微鏡

ド・ブロイは，自身の発見が電子顕微鏡に応用され医学に貢献したことを何より誇りに思っていたそうです[4]．1933 年頃，ドイツのエルンスト・ルスカ（1906 - 1988, 1986 年ノーベル物理学賞）が最初の電子顕微鏡を製作していたとき，その途上でド・ブロイ波の存在を知り，当初期待していた分解能が得られないと悟って絶望したと伝えられています．しかし分解能に制限を与えるのがド・ブロイの理論ならば，電子の加速電圧を上げれば分解能が向上する事を教えるのもド・ブロイの理論です．ルスカが当初期待した分解能は得られなかったにせよ[14]，電子顕微鏡が素晴らしい微細観測手段となっていることは確かです．

6.2 フラーレンC60 の干渉

フラーレンの一種であるC60 は，炭素原子 60 個がサッカーボール状の構造をとった直径約 0.7 nm の球形分子です．これは走査型プローブ顕微鏡で容易に観察できる巨大分子であり，最近では有機薄膜太陽電池の n 型半導体やナノ機械システムの部品などに用いられている重要な分子です．

1999 年，オーストリアのグループがC60 分子の

干渉の観測に成功します[15]．彼らは，真空容器中でC60の分子線を速度約220 m/sで幅50 nm，周期100 nmのスリット型回折格子に入射させ，その背後で波長2.5 pmに対応する干渉縞を観測しました[16]．このような現実的な物体が波として振舞うことは未だ新鮮な驚きであるとともに，ド・ブロイの洞察の正しさを重ねて裏付けるものとなっています．

7. その後と与えた影響

ド・ブロイは1928年，設立されたばかりのアンリ・ポアンカレ研究所の理論物理学助教授となり，量子に関する様々な理論的研究に取り組みます．ド・ブロイはその名声にも関わらず，周りの人々に深い印象を与える程謙虚で質素な生活を送っていたと伝えられています[4]. 1962年に同研究所を退官後も精力的に研究を続け，穏やかな日々の後，1987年に95歳で天寿を全うします．

ド・ブロイの理論によって，プランクの式 $E = h\nu$ の適用範囲が，いまや物質にまで拡張されたことは非常に大きな進歩でした．ド・ブロイの理論はやがて量子力学の発展に直接の寄与を行い，前期量子論と量子力学を結ぶ重要な役割を担うことになります．

参考文献

[1] 花村克悟，マックス・プランクの功績，伝熱，**48-205** (2009) 32.

[2] 村上陽一，ニールス・ボーアの功績，伝熱，**49-206** (2010) 25.

[3] 量子力学の発展史，高林武彦著，中央公論社 (1977).

[4] ルイ・ド・ブロイ ― 二十世紀物理学の貴公子，ジョルジュ・ロシャク著，宇田川博訳，国文社 (1995).

[5] 参加者にはプランク，ローレンツ，ポアンカレ，マリー・キュリー，ラザフォード，アインシュタインなどが含まれていました．

[6] 実際，1924年の学位論文においてはこの点に力点が置かれており，「モーペルテュイの原理とフェルマーの原理」と題された第二章が最長の章となっています．

[7] 物質と光，ルイ・ド・ブロイ著，河野与一訳，岩波文庫 (1972).

[8] ド・ブロイは光子にはごく僅かではあるが質量が存在していると考えていました．つまり，逆説的ですが，光子はその質量のために光速 c に漸近できても達することはできない（c は単に速度の上限値を与える）と考えていました．

[9] L. de Broglie, Comptes rendus **177** (1923) 507.

[10] L. de Broglie, Comptes rendus **177** (1923) 548.

[11] ド・ブロイが最初に示した導出はやや迂回的なものでした．本稿における導出は，ノーベル賞受賞講演において示されたよりシンプルな方法（文献[7]の第四章）に基づいています．

[12] 式(12)において，$m_0 \to 0$ の極限で光の分散関係（$\omega = ck$）を再現することは重要な点です．すなわちこの極限で波動の分散はなくなり，二つの速度 U と V は共に光速 c に一致して，本来の目的であった光子の物理を表現することになります．このとき，式(11)の最右辺の分母（mV）はアインシュタインによって導かれた光子の運動量 $h\nu/c$ と一致します．

[13] C. Davisson and L. H. Germer, Nature **119** (1927) 558.

[14] 現在の電子顕微鏡ではド・ブロイ波長よりもむしろ電子レンズの収差が解像度のボトルネックになります．100万ボルト級の超高圧電子顕微鏡でも解像度はド・ブロイ波長より遥かに大きい0.1 nm程度になります．

[15] M. Arndt et al., Nature **401** (1999) 680.

[16] この干渉はC60分子がどのスリットを通過したかを観測していない（原理的に判別できない）ために生じる量子的な干渉効果であり，C60分子が一度に一個ずつスリットを通過しても起こるものです．