

# Neils Bohr

仁科芳雄

## §1. Bohr の地位

今日の純物理学界に於て、最も重きをなす世界人は Niels Bohr である。Planck 老い Einstein 衰えた今日、其右に出づるものは見当たらない。勿論<sup>もちろん</sup>各国共その国内に於ては色々の意味に於て権威者はある。又各専門に於てそれぞれの第一人者は存在する。然しこれ等の人々を一堂に集めた時、名実共に備わった<sup>せきがく</sup>碩学を選んだとすれば、Bohr はその首位に推される人である

それは今日迄の Bohr の業績が、自然科学の最も深い基礎を左右する大飛躍であったからである。従<sup>したが</sup>って多くの科学は何等かの形でそのお蔭を蒙って居る。否科学のみならず吾人の思想、観念にも重大な影響を及ぼそうとして居るのである。その結果でもあり又本来の性格でもあるが、Bohr の関心は科学、哲学等の広汎な範囲<sup>わた</sup>に亘<sup>わた</sup>って居る。興味を惹かぬ領域の事は軽蔑するのが人の常である。その反作用としてその領域の人からは相談を持ちかけられない人となってしまう。Bohr は物理学以外に化学、生物学等の広い範囲に同情と理解とがある。而かもそれが下手<sup>した</sup>の横好き<sup>へた</sup>というのではなく、問題の核心を把握する素質を備えて居るのであるから、誰しも敬畏する道理である。

又 Bohr の学界に対する態度は、国の東西を問わず相提携して學術の進歩を念願として居るのである。それが為にはあらゆる手段を講じて同僚後輩のために學術上、人事上の助力を惜まない。今日の新しい物理学を推進して居る多くの有為な人々は、直接か間接か何かの機会に於て Bohr から教えられている事が多い。殊<sup>こと</sup>に Copenhagen の Bohr の研究所に雲集する人々は、Heisenberg のいう Kopenhagener Geist で以て仕込まれるのであって、これが今日の物理学進展の一大原動力とな<sup>したが</sup>って居ることは否めない事実である。従<sup>したが</sup>って Bohr が物理人欽仰の的となるのも当然であろう。

又 Bohr の風格、人物、年令などが、今日の Bohr の地位を築き上げるに与<sup>あずか</sup>って居ることも見逃がせないことである。

## §2. 生立ち

Niels Hendrik David Bohr は 1885 年 10 月 7 日丁抹<sup>デンマーク</sup>の首都 Copenhagen に生まれた。厳父 Christian Bohr は同地の大学の生理学教授であったが、特に物理学に興味を持ち、云わば純実験物理学的の仕事をした人であるという。これが Bohr の将来に多大の影響を及ぼしたのはいう迄もないことで、Bohr の天賦は此環境によって延ばされた事であろう。

殊に当時の大学の物理学教授 C. Christiansen と厳父とは親友であった。Bohr が 1903 年即ち数え年 19 歳の時大学に入って物理学を専攻することになってから、Christiansen は Bohr を講義実験の助手にしようとした。がそれは恐らく Bohr には所を得たものとは云えなかったのであろう、1 年位で止めになって了<sup>しま</sup>った。

然し茲<sup>しか</sup>に Bohr の力量<sup>ここ</sup>を示す機会が来た。それは Christiansen が自分の講義に關聯して、1905 年に丁抹<sup>デンマーク</sup>の学士院をして物理学の懸賞論文を募集させた事である。其の題目は“Rayleigh の液体 jet の定常振動の理論を用いて表面張力を測定”せよというのであった。Bohr は此の問題に着手し、自宅（官舎）にあった厳父の実験室で実験を行った。此実験は一度始めると終る迄は止められなかったので、夜おそく迄も続けなくてはならなかったということである。

論文は 1906 年 10 月に提出され、翌 1907 年には学士院から金牌が授けられた。此論文は London の Royal Society の Phil. Transaction (1909)<sup>(1)\*1</sup> に発表せられたが、これが Bohr の唯一の実験物理学に関する論文である。此頃は勿論<sup>もちろん</sup>その後も Bohr は実験物理学者たることを志して居たようであったが、理論物理学における大きな業績は Bohr をそちらに掻<sup>しま</sup>って行って<sup>しま</sup>った。

上述の論文を見て気の付くことは、Bohr が其構想に於ても又技術に於ても、卓越した実験物理学者であるということである。これは筆者も Bohr 教授の研究所に滞在中切実に感じたことであって、同研究所から発表せられる実験物理学の論文には、Bohr の着想又は理論的要素が多分に織り込まれて居るものなのである。

更に此論文に表われて居ることは、Bohr が学生の若さであり乍<sup>なが</sup>ら、既に発

\*1 本文中 (1), (2) とあるは巻末 Bohr 論文目録の番号を示す。以下同じ。

達した理論家であったということである。即ち Rayleigh の理論は極めて小さい振幅の場合にだけ当てはまるものであるが、実際実験の場合には有限の振幅のものを取扱うのであるから、其影響を補正しなくてはならぬ。Bohr は此補正を導入して Rayleigh の理論を拡張して居る。

かくて 1909 年には magister (学士) となり、1911 年には“金属の電子論”なる論文を提出して理学博士の学位を得た。此論文は<sup>デンマーク</sup>丁抹語で書かれ他に発表されて居ないが、其内容は古典的電子論即ち Lorentz の電子論の見地よりして、金属の諸性質を最も一般的に導き出そうと試みたものであった。此論文に於ても其異常な天分がよく表われて居り、<sup>こと</sup>殊に統計力学に堪能なことが解る。そして其結論としては、古典論的電子論の見地よりしては、物質の磁性は説明し得られないという事であった。

此結論は今日の量子論の立場から回顧すると、極めて興味あることで、金属の電気伝導にせよ磁性にせよ、其頃既に古典論の行くべき所迄は行き盡して居たということが解る。そしてそれ以上は一つの新しい飛躍が必要であったのである。Bohr は此事態を此論文により最も切実に体験した訳であって、これが古典論からみれば不合理と考えられる水素原子模型の提唱を敢行せしめた理由でもあろうか。

金属の電子論は、少くとも原理的には今日の量子論によって解決せられたのであるが、此量子論たるや吾人の脳裡に終始一貫した因果的の描像を許さないものである。<sup>したが</sup>従って Bohr の論文は吾人の描像的能力の極限に到達して居たものと思うべきである。

### §3. 古典的量子論

学位を受けてから間もなく Bohr は、英国に 1 箇年間の留学をすることになった。そして最初は Cambridge の J. J. Thomson の許に、次いで Manchester の Rutherford の所に行ったのである。

Cambridge では、帯電粒子が物質の通過に際して受ける速度の減衰について、理論的研究を行った<sup>(4)</sup>。Bohr は 2 年後に再び此問題を取り上げて研究して居る<sup>(14)</sup>。これ等の結果は  $\alpha$  粒子や  $\beta$  粒子の物質通過に際するエネルギー損失の理論として今日に至る迄尊重せられて居る。そして 20 年後の今日になっ

て、量子力学の立場から Bethe や Bloch によって研究せられたが、其結果は少くとも非相対性理論の範囲に於ては、大体に於て Bohr の結果と合致することが知れた。これは Bohr の勘の好さを示す一例であって、古典論を以て量子力学の結果を予知し得たものと云って好いであろう。此事は次に述べる原子構造の理論に就いても同様に云えることである。

Cambridge を去って Bohr は Manchester の Rutherford の所に遊学した。ここで Rutherford を知ったことは、Bohr の一生を支配する重大な意義をもつ事であった。Rutherford は Bohr より 14 年の年長者であったが、両者の親交は Bohr に大きな支援、激励、慰安を齎したのである。一昨年 Rutherford の薨去に際して Bohr の受けた心的打撃が如何に大であったかは、筆者に寄せられた手紙によっても明かである。その一節に “To me Rutherford was not only the great master but a fatherly friend such as I shall hardly find in life any more.” というのがある。よく両者の交りが表われて居ると思う。

Rutherford が Cavendish Laboratory の長として Cambridge に居た頃は、Bohr は大抵 1 年に一度か 2 年に二度海を渡って Rutherford を訪問し、Cavendish Laboratory で講演したりなどして居た。現に筆者が初めて Bohr に会ったのは、1922 年 3 月 Cavendish Laboratory に於てであった。

話が岐路に走ったが、Bohr が Manchester に行った時は、恰度 Rutherford が  $\alpha$  粒子の散乱に関する実験結果からして、実験的に長岡博士の模型即ち核原子の模型に到達し、これを提唱した直後であった。此模型は周知の通り今日の原子構造論の礎石を置いたもので、惹いては現下の元素の人工変換に導いて行ったのである。今日から見ればこれは大して破天荒の着想とも考えられないかも知れないが、それは後からの話で、其頃物理学界を風靡して居た J. J. Thomson の模型、即ち陽電気の雲塊の中に電子が浮かんで居るものに比べると、全く新しい洞察であった。

此核原子の模型によって放射性元素の問題にも色々の曙光を認めた。此点に就ても先鞭を着けたのは Bohr であったが、実をいうと Bohr の立場は更に高い所にあった。即ち此模型の真実性を確信し、これにより原子、分子の構造を明かにし、一般的物性の依て来る処を説明しようとするのであって、放射性元素について其当時問題となった事は其一端に過ぎなかった。従って滞

英中これ等のことに就いては何の発表をもしないで帰国した。

丁抹<sup>デンマーク</sup>に帰った冬即ち 1912-1913 年の冬の学期には、講師として講義をし乍ら<sup>なが</sup>此問題の研究に没頭した。そして原子の出すスペクトルの究明に着手して茲<sup>ここ</sup>に不朽の業績を樹てたのである。それは周知の通り前記の核原子模型に Planck の作用量子の仮定を適用する事により、古典論では説明の付かなかった水素の原子スペクトルを理論的に解いたのである。これは雑誌 Phil. Mag. 1913 年 7 ~ 11 月号<sup>(5)(6)(7)</sup>に 3 回<sup>わた</sup>に亘って発表せられて居る。其骨子はよく知られて居る通り古典論では律し得ない二つの基礎仮定<sup>\*1</sup>にある。此 Bohr の原子論<sup>つ</sup>に就いて述ぶべき事が二つある。第一は其当時の理論は所謂<sup>いわゆる</sup>古典的量子論であつて、原子の定常状態のエネルギーを算出するには古典論を用いるが、定常状態の規定並に定常状態の間の遷移には、古典論と相容れない上述の二仮定を用いるのであるから、理論としては一貫性を缺いた不満足のものである。そして此二仮定も今日の量子論からは自然に導き出されるものであるから、Bohr 理論は今日の量子論の生みの親であったという歴史的価値以外には、理論としては最早今日何の価値もないものであるという議論を聞くが、これは妥当な見解とは云えない。

勿論<sup>もちろん</sup>定量的の問題を解くに当っては、Bohr 理論<sup>すべ</sup>は凡て今日の量子力学によって置き換えらるべきであるということに異論はない。然し原子内の電子の行動<sup>しか</sup>について、吾人のもって居る概念を用いてこれを表現しようとする、其一つの行き方として Bohr 理論に帰着することは避け得ないのである。勿論<sup>もちろん</sup>巨視的事象を通して形成せられた吾人の概念を、描像能力の極限を超えて居る原子、分子等の微視的対象に適用すると、行き詰りを生ずることがあってもそれは止むを得ないことである。それが Bohr 理論の遭遇した運命であり、又前述の金属の電子論に表われた事態であつて、定量的の問題は描像能力の限界内

\*1 (A) 原子内の電子の運動状態は、或る條件で規定せられる所謂定常状態のみが許される。そして此状態は不思議な安定度を有って居って、電子が其運動状態を変える場合には、必ず一つの定常状態から他のものに移り、如何なる作用があつても其中間の状態にはあり得ない。(B) 一つの定常状態から他の定常状態に移る場合には、次の式で与えられる振動数  $\nu$  をもつ電磁波を輻射又は吸収する

$$h\nu = E' - E''$$

但し  $E'$ ,  $E''$  はそれぞれ初めと終りとの定常状態に於ける原子のエネルギーで、 $h$  は Planck の常数である。

にある古典論では解き得ず、描像を超脱した量子力学を必要としたのである。然し苟も描像を用いるならば、其範囲内では Lorentz の古典論は正しい。それと同様に原子なる対象を描像を用い得る古典論によって表わすならば、Bohr 理論が一つの表現法なのである。只これでは描像は可能であるが、量的には不正確である。これを補うために前記の仮定を別に導入して量子力学と同一結果に達することを得たのである。即ち量子力学を知らずしてこれと一致する結果を得る同等の方法を見出したのであるから、前述の通り Bohr の勘の好きさが窺われるであろう。勿論此仮定は既に描像の範囲を脱して居り、又これでも定量的には不充分であって、結局理論を定量的に進めて行く量子力学が生れたのであるが、太陽系に似た模型を用うる Bohr の概念は正しい。そして定常状態とか定常状態間の遷移などの考えは、その俛永く残るものである。

Bohr の理論は原子、分子の行動を表現する一方法であると云ったが、他の描像は何であるかと云えば、それは de Broglie の波動論である。即ち原子を一つの定常波として取扱うのである。此波動も古典論に従う波動でないことは、Bohr 理論に於ける電子が古典論に従う粒子でないことと対応して居って、de Broglie 理論に於ても定量的に問題を取扱うには、やはり波動場の量子論を必要とするのである。此点では Bohr 理論と同様描像の限界内にあるものであるから、その範囲を超えた問題についてはやはり無力である。

第二に Bohr 理論に就いて述ぶべきことは、水素原子の定常状態のエネルギー値が、古典量子論によるものと今日の量子力学によるものとが定量的に一致することである。これは Coulomb 法則の場合に起る偶然の一致であって、帯電粒子の衝突の問題に於て、古典論と量子力学とが共に Rutherford 式に達すると同様である。Coulomb 以外の法則では恐らく必ずしも一致しないであろう。

此偶然の一致は量子論の進歩の為に、一面幸であり又一面不幸であったと云えるかも知れない。幸というのは、此一致の為に、Bohr は後に述べる対応原理 (correspondence principle) を樹立し、これに従って原子構造論、スペクトル論などを進めて行って、量子力学の誕生前既にその結果を予知して居た。若し此一致がなかったならば、こんな進歩は恐らく著しく遅れたであろう。

然し一面から云うと、此一致があった為に古典論の力を過信した傾きがな

かったとも云えない。殊に Sommerfeld の微細構造の理論等が、之も偶然の一致から実験に合う結果を示したので、其当時人は古典論は原子、分子にも定量的に適用し得るといふ誤信を抱くものもあつた。之が為今日量子力学の発見が或は多少遅れたかも知れない。然し又一旦之が発見せられると其進展の驚くべく迅速であつたのは、古典論の適用によつて嘗めさせられた経験の苦さ、及び前述の通り古典量子論によつて形成せられた正しい背景が与つて力あつたと思へば、これも結局は幸であつたといふべきであらう。殊に何の手掛りもなくは量子力学も発見が困難であつたらうから、つまり今日の量子論は行くべき道を進んだと考へべきである。

#### §4. Bohr の理論物理学研究所

1913年の夏 Bohr は Christiansen の後をついだ Knudsen の後任として大学物理学の助教授 (Docent) となつた。此講座では医学部の学生に物理学初歩を教えるのであつたが、之はあまり有難い仕事ではなかつた。然し夫は1年丈で済んだ。といふのは1914年には Manchester の Rutherford の所へ、物理の講師として呼ばれたからである。当時欧州大戦が勃発したが同年10月には英国に渡り、2年間 Manchester に滞在した。其間1915年には前記スペクトルと原子構造の研究の継続結果を発表した<sup>(11)(13)</sup>。

1916年には Copenhagen 大学に Bohr の為理論物理の講座が設けられ其教授に任ぜられた。そして此講座にはやはり前記の医学部学生への講義が付き纏つて居たのであるが、1916年夏帰国するや代講者を置くことを許され、又1918年には別に此講義の講師が置かれることになつて、全く悪縁を切る事になつた。

Bohr は就任後直ちに、此講座に附属する理論物理学研究所の建設を大学当局に提議した。其内容は図書室、講義室並に理論物理学研究に必要な設備、又理論物理学研究結果の検討並に理論発展の手引きをすべき、実験研究を行うための器械装置及び工作場を設けることであつた。此建議は大学当局、政府、議會を簡単に通過した。それは此敷地が有志者の寄附(8万クローネ即ち現在の8万円)によつて、市の東北 Blegdamsvej に購入することが決つたからである。

此建築は 1918–1919 年の冬に始められ、1921 年 3 月 3 日大学理論物理学研究所 (Universitetets Institute for teoretisk Fysik) として開所せられた。此建物は約 15 間 × 7 間位で、半地下室は物理実験室及び工作場に用いられ、その上の階が講義室、図書室並に理論の方の人の居室、及び化学実験室になって居り、二階は Bohr 教授一家の住居となって居た。此研究所の完成により外国の若い理論並に実験物理学者が次から次へと集って来た。我国の学者で此処で研究した人も 10 人近くある。Bohr 教授は日本の留学生に対しては非常に好意を寄せられ、皆愉快に研究に没頭することが出来た \*1。

此研究所に最初に来た物理学者は和蘭<sup>オランダ</sup>の Kramers で、助手並に講師として 10 年近くも滞在したようである。Kramers が Utrecht に去った後任は Heisenberg であったが、其任期は 2 箇年位であったろう。Heisenberg が Leipzig に行った後を O. Klein が継ぎ、3~4 年の後 Klein が Stockholm に去って暫くは空席であったのを、Møller が引き継いで今日に至って居る。此外に Rosenfeld も既に数年間助手として滞在して居るようである。之等の助手の中丁抹人<sup>デンマーク</sup>は Møller 1 人で、他は皆外国人である。此研究所の空気が如何に cosmopolitan であるかが解るであろう。又 Hevesy は Manchester 以来 Bohr の親友であって、中途<sup>ドイツ</sup>独逸の Freiburg に教授として赴任して居た数年を除いては、殆ど最初から此研究所で研究を行い、後に述べる元素 Hf の発見後、其化学的研究並に分離を行った。人工放射能の発見と共に今日では専ら生物学の研究に没頭し、大切な仕事を出して居る。

此外 Pauli, Dirac, Jordan, Slater, Urey (重水発見者), Gamow, Heitler, Nordheim, Hund, Bloch, Goudsmit, Weizsäcker, Coster, Kopfermann 其他今日物理学界に名を知られて居る人の大半は、長いか短いか此研究所に居った経験をもって居るのである。<sup>したが</sup>従って此研究所は 20 世紀前半の物理学史上、直接間接に不朽の貢献をしたものであって、誰か此研究所の歴史を書き残して置くことは後日の為大切なことであろうと思われる。

1931 年に此研究所は創立 10 年記念を祝った。其際此研究所から発表せられた全部の論文の別刷を集めて一冊とし、これを Bohr 教授に贈呈した。論文の

\*1 留学者の氏名：青山新一，有山兼孝，金子五郎，木村健二郎，杉浦義勝，高嶺俊夫，仁科芳雄，福田光治，堀健夫。



数は約 275 あったということである。此目録は雑誌 'Fysisk Tidsskrift' (1931) に出て居る。

其後此研究所も次第に手狭くなって居たが、1923年に米国の Rockefeller Foundation から 4 万<sup>ドル</sup>弗援助を得て拡張を行った。敷地は Copenhagen 市より寄附することになり、経常費は政府が出し、又丁抹<sup>デンマーク</sup>ビール会社 Carlsberg の設立した Carlsberg Foundation も多額の寄附をしたので、研究所の拡張として 1925 年に先ず Bohr 教授の官舎が隣に新築せられて一家はこれに移られた。そして元の住宅であった二階は理論の方が人が使うことになり、又別に工場と実験室とを含む 1 棟が増築せられた。実験の方の助手 Jacobsen は初め此処で仕事をして居った。

其後 Bohr 教授一家は、前述の Carlsberg 会社の社長 Jacobsen が学者の為に寄贈した壮大な邸宅に移られた。それはもう 7 年前の事である。此邸宅に住む人は<sup>デンマーク</sup>丁抹随一の学者で、同国の学士院が推薦することになって居る。最初これに住まったのは哲学者 Höffding で、其没後 Bohr 教授一家がこれを承継いたのである。

最近原子核物理学が盛んとなったので、Bohr の研究所にも此方面の実験設備が整えられることになった。Rockefeller Foundation 及び実業会社方面の寄附によって、200 万ヴォルトの高電圧電源が建設せられ、且つ丁抹<sup>か デンマーク</sup>の人である Poulsen の電弧発振器に用いられて居た、65<sup>トン</sup> 匁の電磁石を改造してサイクロトロンが作られつつある。之等を容れるために研究所の建物が増設せられたのは云う迄もない事である。これで原子核の問題、生物学の研究が著しく推進せられることと予期せられる。これ迄此方面の研究は、同地のラヂウム研究所のラヂウム、及び Bohr 教授の 50 歳の誕生日を祝って友人たちの贈った 500mg のラヂウムによって居たのである。以上で明かなように、名は理論物理学研究所であるが、実験方面に於ても常に世界の第一線に立つような設備が整えられて居る。これが結局理論を進める重要な手段なのである。

## §5. 対応原理と原子構造

Bohr は水素原子の理論を提唱した最初から、量子論に没頭しながらも古典論から目を離さなかつた。否寧ろ<sup>いなむし</sup>古典論の結果を出来るだけ量子論に利用し

て其発展を企てたのである。そして此兩者の間には不離不即ともいふべき一種の対応の存在することに気付いて居た。これを Bohr は対応原理と名付けた。

例えば量子数の大きい極限に於ては、Bohr 理論と古典論とは其結果に於て一致する。勿論これは結果だけであつて其物理的解釈は全く異つて居る。例えば原子が光を出す場合に於ても、量子論では一つの素過程に於て単一の振動数を有する光量子を放出する。そして異つた素過程の集合した結果多くの振動数をもつ光を出すのである。所が古典論では帯電粒子が軌道運動をすれば、同時に多くの振動数をもつた光を出すことになる。此兩者の結果は一般には一致しないが、量子数の大きい極限に於ては同じことになる。これからして Bohr は量子論が古典論を一般化したものであるという考えを夙くから抱いて居た。

又原子に於て Bohr の二仮定に従つて輻射される光の強度と、それに関連した定常状態に於ける電子の運動の Fourier 展開係数とが、特別の場合には古典論に従う関係をもつことを指摘した。これは其後 Kramers によつて Stark 効果の場合に適用して詳細に研究せられた。

古典量子論を原子、分子の問題に直接適用出来ないことは、其後次第に明かになって来た。こんな場合にも Bohr は古典論との対応を追究することによつて、問題を解く端緒を得て行つたのであつて、云わば対応原理は闇夜の燈火であつた。これ等の点を最もよく論述したのは丁抹の<sup>デンマーク</sup>学士院の報文として 1918 年<sup>(15)(16)</sup> 並に 1922 年<sup>(26)</sup> に発表せられた 3 論文である。之は量子力学の発見以前は、量子論の基礎仮定に関する 1923~1924 年の論文<sup>(34)(35)</sup> と共に、量子論の教書のように考えられたものである。

Bohr は対応原理を指針として、元素の週期律を原子構造の立場から解明しようと試みた。それには各元素の裸の原子核が、電子を 1 箇宛捕捉して行く時に生ずるスペクトルを理論的に攻究し、それと X 線スペクトル並に原子スペクトルに関する実験結果とを照し合せ、又他の諸性質をも参考として各元素の原子構造を明かにした。そしてその結果を初めて 'Fysisk Tidsskrift' (1921)<sup>(22)</sup> に発表した。

これによつて各原子の構造が解ると共に、逆に此結果から未発見の元素の性質が予告し得るようになった。Hevesy, Coster の 72 番の元素 Hf の発見は、

これに基いてジルコン鉱石の中を探索した結果であって、Bohr 理論の大きな応用の一つである。Bohr は 1922 年 12 月のノーベル授賞式の講演に於て、この発見を最初に発表したのであった。これより先仏国の Urbain は此 72 番の元素を稀土類の中に発見したと云い、これを Celtium と名付けて居たのであるが、Bohr の理論によれば、之は稀土類に属さぬものであることが明かであって、此発見に就いては Urbain と Hevesy, Coster との間に論争を生じたが、今日では Celtium なる名は消滅したようである。

Bohr の原子構造論は其後 Main-Smith 並に Stoner によって多少改められたが、ともかく今日の量子力学と Pauli の原理とからして得られる結果と少しも異なる所はない。今日から見ると対応原理を唯一の信條として、よくも此処迄漕ぎ付け得られたものと思われる。これも Bohr の勘の好さによるのである。

此勘の好いということが何であるかは、言葉その物の本来の意味の示すように、これを解説することは出来ないが、人が一つの問題に没入すると、これに同化融合し、人と自然とが一体になり、自然の根柢を支配する深い法則に触れるようになるのではないかというような気がする。これは Bohr 教授に接したものの受ける印象ではなからうか。

Bohr の原子構造の研究が完成した頃から、対応原理を指針とする古典量子論の無力さが次第に表面に現われて来た。殊に光の波動説と粒子説（光量子説）との矛盾が、人に甚だしい不満の念を抱かせた。此点に橋をかけるために Bohr-Kramers-Slater の理論が出た<sup>(37)(38)</sup>。これはエネルギー、運動量の不滅法則が素過程には行われなくて、ただ統計的にのみ成り立つものであるという考えを用い、波動と粒子とを結ぶ試みであった。此説は Geiger-Bothe, Compton-Simons の実験によって誤であることが明かにせられ、Bohr 自身も既に其前に熱力学的考察からこれは誤って居ることを覚って居た。今日から見ればこれは明白であるが当時としてはそんなに簡単ではなく、殊に Bohr は個々の電子、原子などの行動が、こんなに迄立ち入って検討せられるものとは考えて居なかつたようである。

此 Bohr の考えは誤ではあったが、今日から見て興味あることは、今の量子論ではこれと同様な考え方が、時間空間の問題に採用せられて居るということである。即ち個々の光量子や電子の時間空間に於ける伝播、運動は、これを

予知することは出来ない。只統計的にのみこれを規定し得るものである。即ち Bohr–Kramers–Slater の考え方は、これをエネルギー、運動量に適用せずして、それと正規共軌きょうやくの関係にある時間、空間に適用すればよかったのであった。こんなことは後から考えると真に紙一重の差である。

対応原理の無力を示す事象は、その他色々出て来たが、その中でも Ramsauer 効果及び多重スペクトルなどは著しいものであった。前者は結局量子力学の発見によって始めて解かれた問題であるが、後者は電子のスピンによってその前に闡明せんめいせられたのである。此スピンの発見は Goudsmit, Uhlenbeck の二人によって指摘せられたものである。Bohr は始め雑誌 Naturwiss. に出た二人の寄書を見落して居たのであるが英国に行った途中和蘭オランダに立ち寄って此話を聞き、速座に其考えの正しいことを洞察し、帰国後早速 Goudsmit を Copenhagen に招き、連日の討議によって今日のスピン模型の理論が確立せられたのであった。此論議に於て 2 なる値をもつ係数を Thomas が計算したのであった。

此話は Bohr が如何いかに學術の進歩を促すに熱心であるかを示す一例である。これによって八方塞がりの量子論ややしゅうびも稍愁眉を開いたのであるが、然し真しかの展開はそれから後の事であった \*1。

## §6. 量子力学の発見

それは Heisenberg の量子力学の発見によって始まった。此着想は 1925 年の春 Heisenberg が病を避けるため Heligoland の島に居た時得たものである。そして島から下りて来る途中 Hamburg に居た Pauli に此話をした所が、Pauli は直ぐ賛意を表したので之を書いて雑誌 Zeitschrift für Physik に送った。之が所謂 Pauli の“裁許”いわゆる (sanction) の一例である。

Heisenberg は是以前に Copenhagen に来たことがあるから対応原理の真髓に徹して居た。殊ことに Kramers と共に光の分散に関する量子論の研究を行って、その精神に曉通して居たのである。此分散の研究は量子力学発見の先駆であった。要するに Heisenberg の理論は Bohr の対応原理を数学的の形式によって体現したものであって、之によって対応原理は其使命を果したものと云って

\*1 今日の量子論の状態がこれに類似して居る。湯川理論によって重粒子間の作用、その他宇宙線の問題は解かれたが、更に量子論その物の本質的改革が要望せられて居る。

よいであろう。そして古典論と量子論との対応は一目瞭然、しかも定量的に規定せられるようになった。

これより先に de Broglie の物質波動説は提唱せられて居たのであるが、Schrödinger がこれに数学的の形を与え、所謂波動力学を樹ててから一般の注意を惹くようになったのである。Schrödinger の理論は de Broglie 波を表現するものであると同時に、Heisenberg の意味での量子力学に於ける、最も有力な数学的武器である事が後から解って来て、今迄堰き止められて居た水が、一時に奔流するような勢で凡ての問題が解かれて行った。

これで知れるように量子力学の発見には、直接に Bohr の手で行われた部分はない。然し直接間接にこれを生み出す機運を誘致し、又其下にある Copenhagen 学徒の中から発見者並に推進者を出したのであるから、其生みの親と云ってもよいであろう。

## §7. 量子論の哲学的考察——相補性<sup>\*1</sup>

量子力学の威力が至る所に発揮せられている頃、Heisenberg は其物理的内容の闡明について深い研究を行い、不確定性原理<sup>\*2</sup>を誘導した。これは Hamilton の所謂正規共軛の二つの量を同時に測定する場合、その各の平均の測定誤差の積は、Planck の常数  $h$  よりは小さくし得ないという原理である。これは測定器の不正確に基因するものではなく、量子論的の量に固有の原則的制限であって、これ以上の正確度を云為するのは意味の無いことなのである。

Bohr は之と類似の考えを前から抱いて居って<sup>\*3</sup>、やはり其頃此考察を行って居たのであるが、Heisenberg の此原理の発表後更に其核心を把握する研究に没頭した。その結果として Heisenberg の思考実験中の行論を訂正し、進んで此不確定性原理の因って来る所を明かにした。即ち対象に対し正規共軛の二つの量の一方を測定する実験を行うと、量子論的實在にあっては其実験の為に無視し得ない影響を他方の量に与えることを避け得ない。その上にその影響の大きさは、光及び電子が量子論に従う實在である為に、原則的に正確に求め得ないもので、従って古典論の場合のように補正を行うということが出

\*1 論文 (47), (48), (51), (53) 参照。

\*2  $\Delta_x \Delta_{px} \approx \Delta_y \Delta_{py} \approx \Delta_z \Delta_{pz} h$ 。

\*3 論文 (34), (35) 参照。

来ない。云い換えれば観測に於て、観測体と被観測体とが古典論の場合のように截然たる区別をつけられないという事態にあることに基因するのである。これは Bohr のいうように、心理学に於て主観と客観とが判然と区別し得ないことに類似して居るのである。

不確定性原理に従えば、正規共軛の二つの量の一方を非常に正確に求める実験を行うと、他方の量は全く解らなくなってしまう。かように量子論に於ては半面的の事態が至る所に存在して居る。Bohr はこれを相補性 (Complementarity) と名付け、量子論のことを相補性理論と唱えて居る。これは相対性理論に対応する名前である。以上のことで解るように、量子論の領域に於ては、観測の仕方によって現象が規定せられる。観測に無関係に実在する現象はない。これはよく言われる“物は観方による”という言葉で表わして好いであろう。

de Broglie の物質波動説が実験的基礎を得るようになってからは、光に於ける波動説と粒子説との論争が、物質にも飛び火がした。光に於て此両者の調整に失敗した Bohr が此事態に最も関心を深めたのも当然である。そして相補性の考察を進めてこれを解決した。即ちこれ等の波動説とか粒子説とかの基礎となる実験事実を検べて見ると、波動説の場合には時間空間に於ける伝播、運動が問題となり、粒子説の現われるのはエネルギー、運動量が当面の問題となった時である。そして一方が問題となって居る時は他方は自然に姿を消してしまふ。此両者は前述の通り互に正規共軛の量であるから互に相補の関係にある。従って時間空間の問題に於て波動性が現われエネルギー、運動量の問題に於て粒子性が現われるということは、つまり別々の実験の結果を、古典論によって抽象せられた波動とか粒子とかいう概念によって解釈して居ることであって、何等矛盾ではない。即ち五感を通して得た古典的概念によって、光とか電子とかいう五感を超越した実在を律しようとする時、相補性に従って其半面だけが把握せられるのものであって、それが別々の実験である以上矛盾ではない。寧ろ古典的概念の本質として半面しか表わし得ないというのが量子論から云えば当然なのである。これで世紀に亘る波動説と粒子説との論争も結末を告げることになった。

所で量子力学の数式の解釈によると、光又は電子等の時間空間の伝播、運動の問題では確率が与えられるだけで、古典論のように個々の過程に於て因

因果律は成立しない。確率が与えられる結果として、因果律の成立するのは多くのものの統計的結果に対してだけである。此事は Heisenberg の不確定性原理から云っても、古典的因果律に反するものではない。というのは古典的因果律が成立する為には時間、空間、エネルギー、運動量の数値が全部正確に与えられる必要がある。所が不確定性原理に従えば、それは不可能なことなのであるから、事が因果的に運ばないのは寧ろ当然である。即ち量子論は古典的因果律を適用すべき範囲ではないのである。

そして統計的結果は、量子力学の示す所によれば波動の形を採るものであるから、多くの光量子、多くの電子の体系が波動性を示すことになって来る。之に反してエネルギー、運動量は量子力学にあっても、個々の過程に於て其不滅則の成立することが示される。従って不滅則の関する限り個々の過程に於て古典的因果律が成立するのである。

以上の結論として時間空間の問題に於ては古典的因果律は成立せず、且つエネルギー、運動量は問題の表面に現われて来ない。これに反しエネルギー、運動量の問題に於ては因果律は成立するが、時間空間の問題は全く不明である。古典論に於ては時間空間の問題が因果的に記述せられたのであるが、量子論に於てはこれが両立せず、只一方だけが当面の問題となるもので、而かも二つの半面が全実在を構成し、極限に於ては合して古典論となることからして相補性の名が生れたのである。そして此相補の関係にある二つの半面は互に排除的であって、一方が問題となる時は他方は隠れて了うものなのである。これを Heisenberg の不確定性原理が数学的に表わして居る。

量子論の此半面性乃至は古典的因果律の不成立ということは、人によっては甚だ不満足であると考えて居るようであるが、これは吾人の抱く物理的觀念の本質として止むを得ぬ事態である。吾人の觀念は巨視的事象から抽象せられたものであって、それを微視的実在に適用するから此ような事態に立ち至るのである。而かもこれは古典論の極めて自然な拡張と見らるべきものであるから、寧ろ満足すべきものである。

ところが人によっては吾人の古典的觀念を捨てて、何か新しい觀念を用いれば、半面性並に古典的因果律の不成立が避け得られるであろうと考えるようであるが、之は全くの誤であって、吾人の物理的觀念なるものは巨視的世界



に於ける事象を経て形成せられるより外に方法はないのであるから、今日の結果は極めて順調にして正当な発展と見るべきである。吾人のもつ観念、例えば時間とか位置とか、又エネルギーとか運動量などを適用する限りは、どうしても個々の運動は確率で規定せられるより外はないのである。

これ等古典観念と量子論との関係に就いては、後に述べる Bohr の形式と内容とに関する言葉こそ、<sup>まこと</sup> 洵に味うべきものである。

## §8. 他の領域に於ける相補性 \*1

宇宙を構成する物質の窮極世界に行われる法則が、生物現象又は精神現象と一脈相通ずる所があるのは、孰れも<sup>いず</sup>広い意味に於ける自然現象の一面であるという見方から云えば、或は当然かも知れないが真に興味あることである。そして前にも述べたように、物質の究極に達する Bohr の勘は、生物界乃至は精神界にも通じたのである。それは相補性なる事態が、物質以外の他の世界にもあることを指摘したことである。勿論今日の所ではそれは単なる類推に過ぎないで、その間には何の因果的關係も存在しない。<sup>したが</sup>従って目下の所では、単純なる物理学の事態から推して複雑なる他の領域の問題の理解を<sup>やす</sup>易からしめ、又果てしなき無用の論争を避けて新しい見方を教えるというに止って居る。然しこれ等類推の裏には、更に深く且つ<sup>か</sup>広い共通の基礎が横わって居るのかも知れない。これは恐らく遠い将来の研究に<sup>ま</sup>俟つべき問題であろう。

それは兎も<sup>と</sup>角、Bohr は生命と今日の原子物理学的方法とが互に相補の關係にあること、<sup>したが</sup>従って生命は物理学的には解けぬ実在として扱ふべきものであること、<sup>あたか</sup>恰も Planck の作用量子が古典論では解けぬ実在として扱われると同様であることを先ず指摘した。

心理学に於ても同様の事態が存在する。例えば自己の心理現象を観察することは、その心理現象その物とは互に相補の關係にあつて、観察のために現象が変化する。自由意志の存在が因果的に説明出来ないのは、やはり自己の意思の観察に於て、既述の通り主観と客観とが互に作用して分けられないからであつて、これは<sup>ちようど</sup>恰度量子論に於て凡ての量が同時に<sup>すべ</sup>観測出来ないから因果的の記述が出来ないのと同様である。又生物学に於て、生命現象を原子物

\*1 論文 (51), (53), (57), (58), (66), (67) 参照。



理学的に記述出来ないのも類似の事態によるのであって、生物体は新陳代謝が行われて居る為に、これを原子物理学的に規定することが出来ない。即ちどれだけの原子が其生物に属し、又どれだけが生物体外のものであるかが決められない。規定することが出来なければ原子物理学を適用する手掛りを失うわけである。

又思想と感情、理性と本能という対立的心理現象の存在も互に相補の関係にあって、一方の存在する所他方が隠れて了うのは、自己観察の特性の然らしむる所である。

吾人の用うる言葉そのものも、その分析と適用とが相補関係にあって、言葉を分析し定義すると使えなくなつて了う。これを定義しないで漠然たる所に適用の余地が出来てくるのである。又事物の形式と内容とも相補の関係にあって、内容なくして形式はないが、内容を余り分析すると形式は無くなつて了う。尚此形式と内容とについては Bohr は次のように云つて居る。

There is no content which is not framed in a form; there is no form which is not too narrow, if one does not limit its application.

そして内容の増大による不調和は、更に広い見地から調和せられるものであるという。量子論の発達<sup>ちやうど</sup>は恰度これを体現して居る。

## §9. 原子核の理論

原子核の理論に於ける Bohr の業績も影響の及ぶ所が大きい。それは中性子の捕獲の問題から這入<sup>はい</sup>って行つて所謂 Bohr の液滴模型を提唱した。それは核の構成粒子間の相互作用が大きい為に、これを核外電子のように一体問題にして解くことが出来ぬことを高調し、中性子捕獲の共鳴作用、其際生ずる  $\gamma$  線、又多くの粒子の放出作用等について、古典的模型を用いて考察を進めた。

此考察の結果は実験の進むにつれて次第に実証せられて行きつつある。そして立入った定量的の研究は Kalckar と共著で一昨年最初の論文を発表し、次いで行われた研究が発表せられる予定であつたが、Kalckar の急逝で其後どうなつたかと思われる。

最近<sup>めぐ</sup>は  $\gamma$  線による原子核の光電効果的崩壊について考察を廻らせ、何故に  $\gamma$  線による変換が元素により選択的に共鳴作用を現わすかを論じて居る。

これ等の研究は今後更に興味ある発展を示すであろう。それと共にかような模型を微視的に取扱う方法が見出されることを希望して居る。

尚<sup>なお</sup>序に一言すべきは、Gamow が  $\alpha$  崩壊の理論を提唱して間もなく Copenhagen に来て其話をした所が、Bohr は速座に其正しいことを認めてこれを激励した。その後 Gamow は長く Copenhagen に居<sup>よ</sup>って好い仕事を残した。

## §10. Bohr と学術会議

Bohr は欧米各国の大学、学士院、学会などから名誉学位を与えられ、名誉会員に推され、又賞牌などは数知れず授けられて居る。1921 年のノーベル物理学賞は其一である。又歐洲の各国で開かれた物理学の会議には、よく出席して講演に討論に其抱負見解を述べ、指導的影響を与えて居る。

米国には既に 4 回も招聘せられ、各地で講演討論を行い、其結果は何か新しい発展を米国の物理学会に残して居る。目下は Princeton 大学の招きに応じ Institute for Advanced Study に於て 5 月頃迄講義するということである。

Bohr は毎年春か秋かに、主として Copenhagen に居たことのある有為の物理学者を呼び集めて、現下の重要問題を討議することになって居る。これは非公式ではあるが最も有意義の会議であって、その為に物理学は直接間接に大きな推進力を得て居る。

尚<sup>なお</sup> Bohr はベルギーの Solvay 会議の会長であって、此処でも同様に新しい問題が討議せられる。嘗<sup>かつ</sup>て不確定性原理が論ぜられた時などは、Einstein と Bohr との間に深更に至る迄興味ある討論が行われたということである。Einstein は前から今日の量子論に反対の意見をもち、先年 Podolsky, Rosen と共著で“量子論は物理学的存在を完全に記述し得るや”という論文を出して、否定的の回答を与えて居る。Bohr はこれに反駁の論文<sup>(60)</sup>を發表したが、要するにこれは Einstein の誤解である。

## §11. 日本に於ける Bohr

Bohr 教授を我国に招聘することは長い間の宿題であって、昭和 10 年にはこれが実現する段取となって居たが、長男不慮の逝去によって中止となった。然<sup>しか</sup>し昭和 12 年春、三井、三菱、原田積善会、住友本社、逸見製作所、伊藤竹

之助氏，森轟昶氏の援助により遂に招聘は実現せられ，夫人並に次男同伴米国を経て4月15日に来朝せられたのであった。

それから5月19日に長崎から上海に向けて出帆せられる迄，約1箇月余の滞在の間に12回の講演と4回の討論とを行い，その上に10回に近い餐会に出席して寸暇もない忙しい日を送られたのであった。これ等の公会に於ける講演に挨拶に，Bohr教授は其<sup>うんちく</sup>蘊蓄と熱意とを以て聴衆に多大の感動を与えた。

其説く所は古典量子論より始めて相補性に及び，原子核，宇宙線を始めとして生物学，心理学，哲学等に関する最も基本的な今日の問題に就いて，教授独自の見解を吐露して広く我學術の研究発展に刺戟を与えた。現に目下我国に行われつつある物理学，生物学上の研究の中で，其端を当時教授との討論に発したもののあることは，此招聘が如何に<sup>い</sup>我學界の進歩を促したかを示すものである。

Bohrの講演に対する態度は極めて良心的であり，又常に細心の注意を払って居る。日本に於ける講演でも，会場に出る迄話の内容について心を砕いて居られるように見受けた。

Bohrの講演は前以て数式や図を黒板に一杯書いて置いて，その順序に話すのである。然し其<sup>しか</sup>講演は決して解り易いものではない。それは言葉の関係もあり又内容からも来るのである。Bohrに一度も接したことの無い人，又は其意見について少しの予備知識も持たぬ人には，Bohrの講演は難解たるを免れないであろう。

Bohrは<sup>はや</sup>夙くから東洋の文化に対して，深い興味をもって居たので，来朝中にも我国新旧の学問芸術に多大の関心を示し，其核心を把握体得する所<sup>すくな</sup>尠からぬようであった。一体同教授の思想，態度には東洋的色彩を帯びた所があった為でもあろうが，我国滞在中接する人に非常な感銘を与えたようである。此の相互の諒解は将来我が學術のため喜ぶべき実を結ぶであろう。

忙しい日程の中にも鎌倉，日光，松島，箱根，京都，奈良，宮島，雲仙と順を追って，走り乍ら<sup>なが</sup>も見物する暇のあったことは幸であった。その中で箱根で見た富士山は忘れられぬ印象を残したようである。教授は米国で買った活動写真機を以て，日本の風物を天然色で撮影して行った。そして帰国してからはこれを映写して，記憶を新たにすることは楽しんで居るといふ筆者への便り

であった。

最初に掲げた写真は丁抹<sup>デンマーク</sup>で教えを受けた連中が、1日鎌倉に遊んだ時の記念である。

離京に望み、教授は我国に盡瘁<sup>じんすい</sup>した功により、勳二等に叙せられ瑞宝章を賜わり、感激<sup>お</sup>措<sup>あた</sup>く能<sup>すくな</sup>わざるものがあつたようである。

## §12. Bohr の論文並に著書

Bohr の著書は専門雑誌に載せた論文を集めたものである。これ等の論文を書くのに Bohr は文体に<sup>すくな</sup>虧からず心を用い、満足が行く迄は何度でも書き直す癖がある。その為<sup>お</sup>に論文の発表が遅れることは度々である。今これ等の論文及び著書の目録を掲げて筆を擱くことにする。

### 論文目録：

#### 1909

1. Determination of the Surface-Tension of Water by the Method of Jet Vibration. Phil.Trans., **209**, 281~317.

#### 1910

2. On the Determination of the Tension of a Recently-formed Water-Surface. Proc. Roy. Soc. London, **84** , 395~403.

#### 1912

3. Note on the Electron Theory of Thermoelectric Phenomena. Phil. Mag., **23**, 984~986.

#### 1913

4. On the Theory of the Decrease of Velocity of Moving Electrified Particles on passing through Matter. Phil. Mag., **25**, 10~31.
5. On the Constitution of Atoms and Molecules. Phil. Mag., **26**, 1~25.
6. On the Constitution of Atoms and Molecules. II. Phil. Mag., **26**, 476~502.
7. On the Constitution of Atoms and Molecules. III. Phil. Mag., **26**, 857~875.
8. The Spectra of Helium and Hydrogen. Nature, **92**, 231~233.

**1914**

9. Atomic Models and X-Ray Spectra, (with H. Moseley). *Nature*, **92**, 553~554.
10. On the Effect of Electric and Magnetic Fields on Spectral Lines. *Phil. Mag.*, **27**, 506~524.

**1915**

11. On the Series Spectrum of Hydrogen and the Structure of the Atom. *Phil. Mag.*, **29**, 332~335.
12. The Spectra of Hydrogen and Helium. *Nature*, **95**, 6~7.
13. On the Quantum Theory of Radiation and the Structure of the Atom. *Phil. Mag.*, **30**, 394~415.
14. On the Decrease of Velocity of Swiftly Moving Electrified Particles in passing through Matter. *Phil. Mag.*, **30**, 581~612.

**1918**

15. On the Quantum Theory of Line-Spectra. Part I. D. Kgl. Danske Vidensk. Selsk. Skrifter, naturvid. og math. Afd., 8 Raekke, IV, **1**, 1~36.
16. On the Quantum Theory of Line-Spectra. Part II. D. Kgl. Danske Vidensk. Selsk. Skrifter, naturvid. og math. Afd., 8 Raekke, IV. **1**, 37~100.

**1919**

17. On the Model of a Triatomic Hydrogen Molecule. *Meddel. Nobelinstitut*, **5**, 1~6.

**1920**

18. Über die Serienspektren der Elemente. (Vortrag in der D. Phys. Ges. am 27. April, 1920). *Zeits. f. Phys.*, **2**, 423~469.

**1921**

19. Atomic Structure. *Nature*, **107**, 104~107.
20. Atomic Structure. *Nature*, **108**, 208~209.
21. Zur Frage der Polarisation der Strahlung in der Quantentheorie. *Zeits. f. Phys.*, **6**, 1~9.
22. Atomernes Bygning og Stofferes fysiske og kemiske Egenskaber. *Fysisk*

Tidskr., **19**, 153~220.

### 1922

23. The Difference between Series Spectra of Isotopes, (with P. Ehrenfest). Nature, **109**, 745~746.
24. On the Selection Principle of the Quantum Theory. Phil. Mag., **43**, 1112~1116.
25. Der Bau der Atome und die physikalischen und chemischen Eigenschaften der Elemente. Zeits. f. Phys., **9**, 1~67.
26. On the Quantum Theory of Line-Spectra. Part III. D. Kgl. Danske Vidensk. Selsk. Skrifter. naturvid. og math. Afd., 8 Raekke, IV. **1**, 101~118.
27. Om Forklaringen af det periodiske System. Fysisk Tidskr., **20**, 112~115.

### 1923

28. Om Atomernes Bygning. Fysisk Tidskr., **21**, 6~44.
29. Über den Bau der Atome, (Nobelvortrag vom 11. Dez. 1922). Naturwiss., **11**, 606~624.
30. The Structure of the Atom. Nature, **112**, 29~44.
31. Linienspektren und Atombau. Ann. d. Phys., **71**, 228~288.
32. Röntgenspektren und periodisches System der Elemente, (mit D. Coster), Zeits. f. Phys., **12**, 342~374.
33. The Effect of Electric and Magnetic Fields on Spectral Lines. Proc. Phys. Soc., **35**, 275~302.
34. Über die Anwendung der Quantentheorie auf den Atombau. Zeits. f. Phys., **13**, 117~165.

### 1924

35. On the Application of the Quantum Theory to Atomic Structure. Part I. The Fundamental Postulates, (translated from Zeits. f. Phys., **13**, 117~165). Proc. Cambridge Phil. Soc., Suppl. 42.
36. The Spectra of the Lighter Elements, (discussion in Sect. A of the Brit. Assoc. Liverpool, 1923). Nature, **113**, 223~224.
37. The Quantum Theory of Radiation, (with H. A. Kramers and J. C. Slater).

Phil. Mag., **47**, 785~802.

38. Über die Quantentheorie der Strahlung, (mit H. A. Kramers und J. C. Slater)  
Zeits. f. Phys., **24**, 69~87.

39. Zur Polarisation des Fluoreszenzlichtes. Naturwiss., **12**, 1115~1117.

### 1925

40. Über die Wirkung von Atomen bei Stößen. Zeits. f. Phys., **34**, 142~157.

41. Atomic Theory and Mechanics. Nature, **116**, 809.

### 1926

42. Atomtheorie und Mechanik. Naturwiss., **14**, 1~10.

43. Nogle Traek fra Atomteoriens senere Udvikling. Fysisk Tidskr., **24**, 20~  
21.

44. Spinning Electrons and the Structure of Spectra. Nature, **117**, 265.

45. Sir Ernest Rutherford. Nature, **118**, Suppl. 51~52.

### 1927

46. The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Theory.  
Atti Congr. Intern. dei Fisica Como-Pavia. Roma, Sept., 565~588.

### 1928

47. The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Theory.  
Nature, **121**, 580~590.

48. Das Quantenpostulat und die neuere Entwicklung der Atomistik. Natur-  
wiss., **16**, 245~257.

49. Sommerfeld und die Atomtheorie. Naturwiss., **16**, 1036.

### 1929

50. Atomteorien og Grundprincipperne for Naturbeskrivelsen. Fysisk Tidskr.,  
**27**, 103~114.

51. Wirkungsquantum und Naturbeschreibung. Naturwiss., **17**, 483~486.

52. Quantum Theory and Relativity. Nature, *123*, 434.

### 1930

53. Die Atomtheorie und die Prinzipien der Naturebeschreibung. Naturwiss.,  
**18**, 73~78.

**1931**

54. Maxwell and Modern Theoretical Physics. *Nature*, **128**, 691~692.

**1932**

55. Chemistry and the Quantum Theory of Atomic Constitution, (Faraday Lecture). *Journ. Chem Soc., Pt. I*, 349~384.

56. Atomic Stability and Conservation Laws. *Fondazione A. Volta, atti dei convegni 1.* "Convegno di fisica nucleare, Ottobre 1931", Roma.

**1933**

57. Licht und Leben. *Naturwiss.*, **21**, 245~250.

58. Light and Life, **131**, 421~423; 457~459.

59. Zur Frage der Messbarkeit der elektromagnetischen Feldgrößen, (mit L. Rosenfeld). *D. Kgl. Danske Vidensk. Selsk. Math.-fys. Medd.*, XII. 8., 1~65.

**1935**

60. Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Complete? *Phys. Rev.*, **48**, 696~702.

61. Zeeman Effect and Theory of Atomic Constitution, "Zeeman Verhandelingen." Haag, 131~134.

62. Friedrich Paschen zum siebzigsten Geburtstage. *Forschungen u. Fortschr.*, **11**, 50~51.

**1936**

63. Neutron Capture and Nuclear Constitution. *Nature*, **137**, 344~348. 351.

64. Neutroneneinfang und Bau der Atomkerne. *Naturwiss.*, **24**, 241~245.

65. Conservation Laws in Quantum Theory. *Nature*, **138**, 25~26.

66. Kausalität und Komplementarität. *Erkenntnis*, **6**, 293~303.

67. Causality and Complementarity.

**1937**

68. Transmutation of Atomic Nuclei. *Science*, **86**, 161~165.

69. On the Transmutation of Atomic Nuclei by Impact of Material Particles. I. General Theoretical Remarks. *Det Kgl. Danske Vidensk. Selsk.* (with F.



Kalckar). Math.-fys. Medd., XIV, **10**, 1~40.

70. Lord Rutherford. Nature, **140**, 752~753; 1048~1049

**1938**

71. Nuclear Photo-effect. Nature, **141**, 326~327.

72. Resonance in Nuclear Photo-effect. Nature, **141**, 1096~1097.

73. Wirkungsquantum und Atomkern. Ann. der Phys., **32**, 5~9.

### 著書目録

- I Abhandlungen Über Atombau aus den Jahren 1913~1916. (Autorisierte deutsche Übersetzung mit einem Geleitwort von N. Bohr-von Hugo Stintzing). XX u. 155S. Braunschweig, Verlag von Friedr. Vieweg u. Sohn, (1921).
- II The Theory of Spectra and Atomic Constitution. Three Essays. Cambridge University Press, (1922).
- III Drei Aufsätze über Spektren und Atombau. Mit 7 Abbildungen. Verlag von Friedr. Vieweg u. Sohn, (1922).
- IV Über die Quantentheorie der Linienspektren, (Uebersetzt von P. Hertz). Braunschweig, (1923).
- V Über den Bau der Atome. (Vortrag bei der Entgegennahme des Nobelpreises in Stockholm am 11. Dez., 1922. Ins Deutsche übersetzt von W.Paulijr.), Mit 9 Abbildungen, 60S. Berlin, Verlag von Julius Springer,(1924).
- VI The Theory of Spectra and Atomic Constitution. Three Essays. Second Edition. Cambridge University Press, (1924).
- VII Drei Aufsätze über Spektren und Atombau. 2, Aufl., Mit 13 Abbildungen, VII u. 150S. Braunschweig, Verlag von Friedr. Vieweg u. Sohn, (1924).
- VIII Atomteori og Naturbeskrivelse. 3 Artikler med en indledende Oversigt. Festskrift af Kóbenhavn's Universitet, Nov., 1929. Kóbenhavn, Bianco Lunos Bogtrykkeri (1929).
- IX Atomtheorie und Naturebeschreibung. Vier Aufsätze mit einer einleitenden Übersicht. IV u. 77S. Berlin, Verlag von Julius Springer, (1931).
- X Atomic Theory and the Description of Nature. Four Esssays with an Intro-

ductory Survey. Cambridge University Press, (1934).

- 
- 底本には、『岩波講座物理学I.B. 学者伝記』（岩波書店，1940（昭和15）年10月28日発行）を使用して作成された「青空文庫」所収のtxtファイルを使用した。
  - 読みやすさのために、旧漢字は新漢字に、旧かなは新かなに変更した。ただし一部の漢字は旧漢字のままにした。
  - 写真は省略した。
  - PDF化には $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X} 2_{\epsilon}$ でタイプセッティングを行い、dvi<sub>ps</sub>を生成し、dvipdfmxを使用した。

科学の古典文献の電子図書館「科学図書館」

<http://www.cam.hi-ho.ne.jp/munehiro/sciencelib.html>

「科学図書館」に新しく収録した文献の案内，その他「科学図書館」に関する意見などは，

「科学図書館掲示板」

<http://6325.teacup.com/munehiroumeda/bbs>

を御覧いただくか，書き込みください。