

## 原子論に於ける因果律

——物理的實在の量子力學的記述は完全と考へられ得るか?——

ニールス・ボーア

武谷 三男 譯

一九一三年有名な原子論を提出し、その後世界の物理學者を指導し育みながら量子物理学を完成に導いたコペンハーゲンのニールス・ボーア *Niels Bohr* 教授は四月來朝五月へかけて各大學で熱心な講演やデイスカッションを行ひ多大の刺激を與へた。哲學者の多い京都では「原子論と因果律」と云ふ題で極めて含蓄ある講演を行ひ、さしも廣い法經第一教室もあ

ふれるばかりの聴衆であつた。此處に譯出したのはアインシュタイン、ポドルスキー、ローゼンが一九三五年五月十五日の *Physical Review* 誌に出した爆弾的な論文 *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?* (「哲學研究」二月號に拙譯あり) に對して同誌一九三五年十月十五日號に同題の論文で極めて親切にボーアが答へたものである。譯題を「原子論に於ける因果律」としたのは、ボーアの京都講演が物理に關する點では全く此の論文と

同じだからである。猶此の論文は困難な觀測問題を極めて上手に、極めて解りやすく(文章はかなり六ヶ敷しいが)述べたのみでなく、物理學的に云つても量子論解釋に於てオリゲナリテイのある貴重な論文である。

猶「科學」誌六月號に講演の際の圖が載つてゐるから参照され、ば理解が樂であらう。「哲學研究」二月號にアインシュタイン其他の論文、及びノイマンの見地からフアリーの數學的に此の問題を分析してゐる論文を譯載したから参照され、ば幸甚である。

アインシュタイン、ポドルスキー、及ローゼン(註一)は最近の同題の論文に於て、問題の疑問に否定的な解答を與へる論證を提出した。彼等の立論の趨勢は、併し乍ら、吾々が原子物理学に於て面してゐる實際の形勢に適

當してゐる様には私には思はれない。此の機會を利用して以前種々の機會に簡單に述べた(註2)一般的な觀點即ち便宜的に「補足性」Complementarityと名付けたものを、いくらかより詳細に説明するのは欣快とする所である。此の觀點からすれば量子力學はその範圍に於て、例へば原子過程で吾々が面する様な物理現象の、完全に合理的な記述として現れるものである。

註1 A. Einstein, B. Podolsky and N. Rosen, Phys. Rev. 47, 777(1935)

註2 Cf. N. Bohr, Atomic Theory and Description of Nature, I (Cambridge, 1934)

「物理的實在」と云ふ表現に一義的な意味を歸せしめ得る範圍は、勿論アプリアリオリな哲學的概念から導く事は出来なくて、寧ろ——上に擧げた論文の著者達自身が考へてゐる様に——實驗と測定に直接訴へる事に基礎を置かねばならない。此の目的から彼等は次の様に定式化された「實在の準據」なるものを提唱した。即ち「一つの系を如何なる仕方に於ても攪亂する事なしに一つの物理的量の値を確定的に豫測する事が出来るならば、その

場合には此の物理的量の對應する物理的實在の一つの要素が存在する。」續いて、一つの興味ある例——之に就て後で論ずる——に據つて、彼等は量子力學に於て古典力學に於てと全く同様に、適當な條件の下に力學系を記述する任意の與へられた變數の値を、それ以前の或時刻までその系と相互作用を行ひ、後完全に離れて了つた他の系に行つた觀測から豫測する事が出来る事を述べた。彼等の準據に従ひその著者達はそれ故に、かゝる變數によつて表はされた諸量の各々に實在の要素を歸する事を欲した。尙ほ進んで、力學系の狀態の記述に於て二つの正準共軛變數の双方に確定値を附與する事は出来ないと云ふ事は量子力學の現在の定式化 *formalism* の有名な特色であるから、彼等はそれ故に此の定式化が不完全であると考へ、より完全な理論を展開する事が可能だと云ふ所信を表明した。

此の様な議論は、註で示した様な<sup>\*</sup>、測定の如何なる手續をも自働的に含む様な一貫した數學的定式化に根據を置いてゐる量子力學的記述の健全さに影響を及ぼすに充分だとは思はれない。その外見の撞着は實は、吾

吾が量子力學に於て扱ふ様な型の物理現象の合理的な説明をするためには通常の自然哲學の觀點が本質的に不適當である事を露すにすぎないものである。實際作用量子の存在そのものによつて制約されてゐる對象と測定行爲の間の有限の交互作用——測定が行はれた時測定器械へ及ぼす對象の反作用をコントロールし得ない事による——は因果性の古典的觀念の終極的な拋棄及び物理的實在の問題に對する吾々の態度のラディカルな變革の必要を惹起する。事實、以下我々が見る様に、先に述べた著者達によつて提唱された様な實在の準據は、——その定式化が如何に慎重に見えても——我々が此處で扱ふ様な實際的な諸問題に適用された時本質的な多義性を有つものである。此の爲の議論を出来るだけ明かにする爲に、先づ測定裝置の簡單な例を二三幾らか詳細に考へて見やう。

\* 上述の論文に含まれてゐる演譯は此の點に於て量子力學の變換理論の直接的結果と考へられる、此の理論は恐らく如何なる他の定式化の特色よりもその數學的完全さやその古典力學との合理的な對應を確かにする様にしてゐる。事實、交互作用を行ふ又は行はれない二つ

の部分系(1)及(2)から成つてゐる力學系の記述に於て、それぞれ系(1)及び(2)に關し

$$[q_1, p_1] = [q_2, p_2] = \hbar / 2\pi$$

$$[q_1, q_2] = [p_1, p_2] = [q_1, p_2] = [q_2, p_1] = 0$$

(且、 $[q, p] = q_1 p_1 - p_1 q_1$ ,  $\hbar =$  Planck constant)

なる通常の交換關係を充す正準共軛變數の如何なる二つの對( $q_1, p_1$ ), ( $q_2, p_2$ )をも、新しい共軛變數の二つの對( $Q_1, P_1$ ), ( $Q_2, P_2$ )によつて置換へる事が常に可能である。新共軛變數は初めの變數に平面( $q_1, q_2$ ), ( $p_1, p_2$ )内で角の廻轉に對應した簡單な直交變換によつて關係してゐるものである、即ち

$$q_1 = Q_1 \cos \theta - Q_2 \sin \theta \quad p_1 = P_1 \cos \theta - P_2 \sin \theta$$

$$q_2 = Q_1 \sin \theta + Q_2 \cos \theta \quad p_2 = P_1 \sin \theta + P_2 \cos \theta$$

之等の變數は同様な交換則特

$$[Q_1, P_1] = \hbar / 2\pi, [Q_2, P_2] = 0$$

を満足するから、結局系の狀態の記述に於て確定的な數値を $Q_1$ と $P_1$ の双方に附與するべきでなく、寧ろ確定値は $Q_1$ と $P_2$ の双方に明かに附與すべきである事が従ふ。その場合猶之等の變數を( $q_1, p_1$ )、及び( $q_2, p_2$ )によつて表はす事から、即ち

$$Q_1 = q_1 \cos \theta + q_2 \sin \theta, P_2 = -p_1 \sin \theta + p_2 \cos \theta$$

と表はす事から、それに續いた $q_2$ 又は $p_1$ の何れかの測定から各々か $Q_1$ か $P_2$ の値を豫測する事が可能となると云ふ事が結果する。

一つの粒子が隔壁の細隙を通過すると云ふ簡単な例から始めやう、此の例は多少とも複雑な實驗裝置の部分成すものである。

隔壁に當る前の此の粒子の運動量が如何に完全に知られてゐても、その状態のシュボリックな表示を與へてゐる平面波が細隙で廻折する事によつて、隔壁を通過した後には粒子の運動量に不確定を含む事になる、そして此の不確定は細隙が狭ければ狭い程大きい。所で細隙の幅は、波長に比し大である間は何れにしても、この粒子の隔壁に相對的な位置が細隙に直角な方向で有つてゐる不確定とと考へられる。猶進んで、運動量と波長の間のドブローイーの關係  $\Delta p \sim \frac{h}{\Delta x}$  は波長——譯者)から簡單に、此の方向に於ける粒子の運動量の不確定とはハイゼンベルグの一般原理

$$\Delta p \sim \frac{h}{\Delta x}$$

によつてと結び付いてゐる事がわかる、此のハイゼンベルグの原理は量子力學の定式化に於て各共軛變數の對が充たす交換關係  $(p_i q_j - q_j p_i) = \frac{h}{2\pi i}$  (譯者)の直接の結果である。明かに不確定とは、粒子と隔壁の間での

運動量のやり取りの可能性と不可分に結び付いてゐる。而して我々の議論にとつて主要な關心となつてゐる當の疑問は、斯うしてやり取りされた運動量が、此處で扱ふ實驗裝置によつて研究される様な現象の記述に於て如何なる範圍まで計算に入れる事が出来るかと云ふ事である。先の細隙を粒子が通過する場合は此の最初の段階として考へる事が出来る。

先づ、注意すべき電子廻折現象の普通の實驗に一致して、隔壁は裝置の他の部分——此處では第一の細隙に平行な幾つかの細隙を有つ第二の隔壁及び寫眞の乾板——と同様に一つの臺に固定されており、その臺は空間枠の基準 the space frame of reference を決定してゐるものである。然らば粒子と隔壁の間の運動量のやり取りは、粒子が他の物體に與へる反作用をも一緒にして、共通の臺に移り、斯くして吾々は此等の反作用を分離して計算する事によつて、實驗の最後の結果——此處では粒子によつて寫眞乾板上に作られる點の位置——に關する豫測をする可能性を進んで拋棄した事になる。粒子と測定器械の間の反作用のより嚴密な分析が不可能である

事は實際以上述べた實驗手續に特殊なものではなく、寧ろ當面の型の現象の研究、即ち其處では古典力學と完全に無縁な個體 individuality のフィーチュアを扱はねばならない様な研究に適合したあらゆる裝置法の本質的な性質である。事實、粒子と器械の箇々の部分との間の運動量のやり取りを計算に入れる事の如何なる可能性でも、直ちに我々にかゝる現象の「經過」"course"に就ての結論を引出す事を許す事になる、——例へば第二の隔壁のどの特別な一つの細隙を通つて寫眞乾板に至つたか——此の事は、寫眞乾板の或與へられた面積要素に粒子が到達する確率は、どの特別な一つの細隙の存在によつて決めるのではなくて第一の隔壁の細隙から廻折された結合波 associated wave が達する範圍内にある第二の隔壁の總ての細隙の位置によつて決る、と云ふ事と全く兩立しないものである。

もう一つの實驗裝法即ち第一の隔壁を器具の他の部分に固定的に結び付けない事によつて、少くとも原理的にその運動量を粒子の通過の前後に於て所望の正確さで測定する事が可能となる、そして斯くして粒子が細隙

を通過した後の運動量を豫測する事が可能となる。事實此の様に於て運動量を測定するには、例へば何か或る試驗物體を使ひそれと隔壁との衝突過程に古典的な運動量恒存則を一義的に適用すれば充分である、此處にその試験物體の運動量は衝突の前と後で適當にコントロールするのである。此の様なコントロールは、古典力學の諸概念が適用出来る様な或過程の時間空間的經過を檢する事に本質的に係つてゐると云ふ事は正しい。併し乍ら若し空間的な大いさ、時間々隔の總てを充分に大きく取れば、此の事は試験物體の運動量の正確なコントロールに關して明かに限界を含む事はなく、寧ろ單にそれ等の空間時間座標のコントロールの正確度に關する斷念を含んでゐる。此の事情は事實先程論じた實驗裝法に於ける固定隔壁の運動量をコントロールする事の斷念と甚だ類似してゐる。そして最後のには此の事情は、その行動の記述に量子力學の不確定關係に對應した自由さを許容する必要を包含してゐる所の測定器具を、純古典的に取扱ふ要求に係つてゐるのである。

\* 我々の使用し得る實驗技術によつて、此處に及び以下

論する様な測定手續を實際に實行する事が當然不可能だと云ふ事は明かに原理的な論議に影響するものではない、何となれば問題の手續きは、コムプトン効果の様な運動量恒存則の、相當した適用が明白に確立してゐる原子課程と本質的に同等であるから。

此處に考へた二通の實驗装法の主な差異は併し乍ら次の事にある、即ち、第一の隔壁の運動量をコントロールするに適する装法に於ては、此の物體(第一の隔壁)はもはや以前の場合(固定)と同じ目的のための測定器具として使用する事は出来なく、寧ろ、器械の他の部分に對してのその位置に就ては、細隙を通過する粒子と同様に、その位置及び運動量に關して量子力學の不確定關係があらはに考慮されねばならぬ意味で觀測對象として扱はねばならない。事實、隔壁の空間フレームに對しての位置を、その運動量の最初の測定以前に知つたとしても、又その位置を最後の測定後に實際に固定する事が出来たとしても、吾々は諸試験物體との各衝突過程の間に隔壁がコントロール出来ない移動をする故に、粒子が細隙を通過した時のその位置に就ての知識を失ふ事

になる。この装法全體はそれ故に明白に以前の場合と同種の現象を研究するのに不適當である。特別に次の事を示す事が出来る、若し隔壁の運動量を、粒子が第二の隔壁の或特定の細隙を通ると云ふ決定的な結論を與へるに充分な正確さで測定したならば、かゝる知識に適合する第一隔壁の位置に就ての最小の不確定さへも、如何なる干涉効果——寫真乾板上の、粒子があたる事の出来る帯に關しての——をも一掃して了ふ、此の干涉効果は器械の各部分がお互に固定されてゐる場合、第二の隔壁に二つ以上の細隙がある事によつて起るものであるが。

第一隔壁の運動量を測定するに適した装法に於ては、此の運動量を粒子が細隙を通過する前に測定したとしても、通過した後には粒子運動量を知るか、器械の他の部分に對してのその最初の位置を知るかは自由選擇として吾々に残される。第一を選ぶ場合には、隔壁の運動量の二度目の決定を行ひさへすればよい、此の時粒子が通過した瞬間のその隔壁の位置は永久に未知のまゝである。第二を選ぶ場合には、空間フレームに對してのその位置を決定しさへすればよい、此の場合不可避的に隔壁

と粒子の間の運動量のやり取りに就ての知識を失ふ事になる。若し隔壁が粒子に比較して充分に大質量であれば、測定手續を、隔壁が、その運動量を最初に決定された後器械の他の部分に對して或未知の位置に靜止し、その後の此の位置の不動はそれ故に簡單に、隔壁と共通の臺との間の固定的な結合を設立する事になる様にアレンジする事も出来る。

此等の簡單なまた大體に於てよく知られた考察を此處で繰返へす主な目的は、今取扱つてゐる現象に於て吾々が、物理的實在の種々の要素の中から或ものを、他の要素を犠牲にして任意に選ぶと云ふ事によつて特性附けられる不完全な記述を扱つてゐるのでなく、空間的位置の概念の一義的使用か又は運動量恒存則の正當な適用かの何れか一方が適合すると云ふ本質的に異つた實驗裝法及び手續の間の合理的な區別を扱つてゐると云ふ事を目立たすためである。其他の任意性として見えるものは單に實驗と云ふ概念そのものの特性である所の、測定器械を操する (handling) 事に於ける吾々の自由性にすぎない。事實、各實驗裝法に於て物理現象の記述に

於ける二つの局面の一方又は他方の拋棄——此の兩者の共同が古典力學の方法を特性附けるものであり、それ故に此れ等は此の意味で相互に補足的 complementary として考へる事が出来る、——は、量子論の領域に於て、對象の測定器具に及ぼす反作用を正確にコントロールする事の本質的な不可能、即ち、位置測定の場合の運動量傳達、及び運動量測定の場合の位置の移動、に係つてゐる。正しく此の今述べた點に於て量子力學と普通の統計力學との如何なる比較も——如何にそれが理論の形式的表示にとつて有用であらうとも——本質的に見當違ひのものである。實際吾々は本來の量子現象を研究するに適した各實驗裝法に於て、單に或物理的諸量の無知 ignorance を扱ふのではなく、此等諸量を一義的に限定する事の不可能性を扱ふのである。

この注意はさきに引用したアインシュタイン、ポドルスキー、ローゼンによつて取扱はれた特別の問題に同様な適切さで適用する、これに於ては上に論じた簡單な例以上の表示を實際に含んでゐない。彼等があらはな數學的表現を與へた二つの自由粒子の特別な量子力學的狀

態は少くとも原理的に次の様な簡単な實驗裝法によつて造る事が出来る、即ち二つの平行な細隙を有つ固定隔壁、その各細隙はお互の間隔に比して甚だ狭いもの、そしてその各を通して各一箇の粒子が與へられた始初運動量を以てお互に無關係に通過すると云ふ實驗裝法である。若し此の隔壁の運動量が正確に各粒子が通過する前と後とに於て測られたならば、實際に於てその二つの

通りぬけた粒子の運動量の細隙に直角な成分の和と、同時に同方向に於けるそれ等の始初位置座標の差を知る事になる、所が當然の結果として共軛諸量即ちそれ等の運動量の差及びそれ等の位置座標の和は全然知る事が出来ない。<sup>\*</sup>此の裝法に於てそれ故に、それ等の粒子の一つの、位置又は運動量の何れかについてのその後の單一な測定は、自動的にもう一つの粒子のそれ、位置又は運動量を任意の所望の正確度に於て決定する事は明らかである、少くとも若し各粒子の自由運動に對應する波長が細隙の幅に比して充分短かければ。さきに述べた著者達によつて示された様に、それ故に此の段階に於ては、考へてゐる粒子と直接に抵觸しない様な過程によつ

て今の諸量の一方か又は他方がの何れを決定するかに就て完全な自由選擇に面してゐる事になる。

<sup>\*</sup>直ちに分る様に、此の記述は非本質的な規準因子 (normalizing factor) を無視すれば、二粒子の位置座標及び運動量成分を  $(x_1, p_1)$ ,  $(x_2, p_2)$  で表はし  $\psi(x_1, p_1, x_2, p_2)$  とすれば、前の脚註に述べた變數變換に嚴密に對應してゐる。猶、上述の論文(アインシュタイン其他)の式(9)で與へられた波動函數は、特別な場合  $\psi_0$  をとる事に、そしてまた二つの無限に狭い細隙と云ふ極限の場合に對應するものである事は注意すべきである。

隔壁の細隙を通過して行く單一粒子の位置か又は運動量かの豫測に適した兩實驗手續間で選擇を行ふと云ふ上述の簡単な場合と同様に、吾々は、今述べた裝法によつて提供された「選擇の自由」と云ふ事に於て、まさに補足的な古典的諸概念の一義的使用が可能な異つた各實驗手續間の區別に干はつてゐるのである。實際各粒子の中の一箇の位置を測定する事は、その行動と、空間フレームの基準を決定する臺に固定された或器械との間に相關を確立する事を意味し得るに他ならない。またそれ故に上述の實驗諸條件の下にこの様な測定は、



兩粒子が各細隙を通過する時の、他の場合には全然知られないこの空間フレームに對しての隔壁の位置に關する知識を與へることになる。事實此の方法に依つてのみ吾々は器械の他の部分に對してのもう一方の粒子の始初位置に就て結論する根拠を得るのである。第一の粒子からその臺へ本質的にコントロール出來ない運動量が傳達する事を許す事によつて、併し乍ら、吾々は此の手續に於て隔壁と二粒子とから成る系に運動量恒存則をその後適用する可能性を失つた事になる、そしてそれ故に、第二の粒子の行動に關する豫測に運動量の概念を一義的に適用する唯一の基礎を失つた事になる。逆に、此等の粒子の一方の運動量を測定する方を選ばなければ、かゝる測定に不可避なコントロール出來ない移動のために、此の粒子の行動から器械の他の部分に對しての隔壁の位置を導き出す可能性を失ひ、斯くしても一方の粒子の位置に關する如何なる豫測をも行ふ基礎を失つた事になる。

我々の觀點よりすれば、上に擧げたアインシュタイン、ポドルスキー、ローゼンによつて提出された物理的實在

の準據の語法は「如何なる仕方<sup>に</sup>於ても或系を攪亂する事なしに」と云ふ表現の意味に關して曖昧さを含んでゐる事がわかる。勿論今考へた様な場合に於て、測定手續の最後のクリティカルな段階を通して、考へてゐる系の力學的攪亂の心配はない。併し此の段階に於てすら、系の將來の行動に關する豫測の可能な諸型を決定する諸條件そのものが及ぼされる影響は本質的に問題となる。之等の諸條件は「物理的實在」と云ふ言葉を正當に附する事が出来る様な如何なる現象でもを記述する場合の固有の要素を成して居る故に、上述の著者達の議論は量子力學的記述は本質的に不完全であると云ふ彼等の結論を正當化するものではない事がわかる。此の反對に、以上の論議から明白になつた様に、此の記述は量子力學の分野に於ける對象と測定器具間の有限でコントロール出來ない交互作用と兩立してゐる所の測定の一義的解釋の全可能性を合理的に利用したものとして特性付ける事が出来る。事實、それは新しい物理法則に場所を與へてゐる所の、補足的な物理的量の「一義的な限定<sup>ダイニクン</sup>」を行ひ得る様な、あらゆる二つの實驗手續が相互に相排除する

と云ふ事に過ぎない。此の兩方が共存してゐると云ふ事は一見科學の根本原理に背く様に見えるとしても。補足性、Complementarityの觀念が特性附けやうと志してゐる事は、正しく物理現象の記述に關しての此の全く新しい形勢なのである。

これまで論じて來た諸實驗裝法は、問題となつてゐる現象の記述に時間の概念が第二次的の役割しか演じなかつた故に特殊な簡單さを呈してゐる。我々は任意に時間的關聯を含んでゐる、「以前に」とか「以後に」と云つた言葉を使用したのは事實である、併し各場合に於て或不正確さを許容しなければならぬ、此の不正確さは、併し乍ら、扱つてゐる時間々隔が、研究中の現象のより嚴密な分析に入つて來る固有の週期に比して充分に大である間は重要な事ではない。量子現象のより正確な時間的記述を試みるや否や、吾々はよく知られたもう一つのパラドクスに遭遇する、之を闡明する爲には對象と測定器具間の相互作用に就てのそれ以上の諸フィーチュアを考へに入れねばならない。事實、その様な現象に於ては、も早、本質的にお互に對して靜止してゐる諸器械か

ら成つてゐる實驗裝法を問題にしてゐるのではなくて、時計の働をなすメカニズムによつてコントロールされてゐる運動する諸部分——隔壁の細隙の前にあるシャッターの様な——を含む裝法を問題にしてゐるのである。對象と空間フレームを決定してゐる物體間の上に論じた運動量の授受の他に、此の様な裝法に於てはそれ故に對象と此等の時計様メカニズム間にエネルギーの偶然的なやり取りを考慮しなければならぬ事になる。

量子論に於ける時間測定に關しての決定的な點は、上に概説した位置測定に關する議論と完全に類似してゐる。器械の各部分への運動量の傳達が全然コントロール出來ない事を知つた——各部分のお互に對する位置の知識が現象の記述のために要求される——のと全く同様に、對象と種々の物體——此の相對運動を器械の合目的々使用の爲に知らねばならない——との間のエネルギーのやり取りはそれ以上たち入つた如何なる分析をも不可能にする。事實、時計を時間指示器として使用する事に本質的に妨害する事なしに、その時計に傳達して行くエネルギーをコントロールする事は原理的に排除せ

られる。此の使用は各時計の機能も他の時計とのエヴェンチュアルな比較も、古典物理學的方法の基礎の上に考へる事の可能性を假定する事に全く頼つてゐる。此の理由によつて吾々はそれ故に明かにエネルギー平衡に於て、共軛時間及びエネルギー變數に對する量子力學的不確定關係に對應する餘地を許さねばならない。位置と運動量の概念の量子論に於ける一義的使用に關する相互に相排除する性格に就て上に論議した問題と全く同様に、一方では原子現象に重點を置いての詳細な時刻と、他方では原子的反應に於てエネルギー移動の研究によつて明かとなる原子の固有の安定度の非古典的フェイチュアールとの間の補足的な關係を惹起するのは終局に於て此の事情なのである。

各實驗裝法に於て、考へられてゐる物理系の中、測定器具として扱はるべき諸部分と、研究中の對象を成してゐる諸部分との間で區別をする此の必要性は實際、物理現象の古典的記述と量子力學的記述の間の主要な差別を形成するものであると云ふ事が出来る。各實驗手續の中に於て此の區別が設けられる場所は兩場合に於て大

きな程度で便宜上の問題であると云ふ事は事實である。所が、併し乍ら、古典物理學に於ては對象と測定行爲の間の區別は扱つてゐる現象の記述の性格に何らの差異を惹起しないのに反して、以上我々が見て來た様に、量子論に於てこの區別の基本的な重要性は、例へ吾々が物理學で干與する新しい型の法則性レギュラリティーを扱ふのに古典論が充分ではないに不拘、あらゆる固有の測定の解釋に古典的諸概念の使用が不可避である事にその根據を置くものである。此の形勢シチュエーションに従へば、有名な諸法則に具體化されたもの以外に量子力學の諸表式(symbols)の如何なる一義的解釋も問題となり得ない。此の諸法則は全然古典的仕方で記述された所與實驗裝法によつて得らるべき諸結果を豫測する事を得せしめるものであり、又その諸法則の一般的表現は既に参照した様に變換論によつて與へられるものである。古典論とのその固有の對應を守る事によつて、之等の理論は量子力學的記述に於て特別に、對象と測定行爲の間に設けられる區別の場所を變化する事に關係した如何なる想像し得る撞着をも除くものである。事實各實驗裝法及び測定手續に於て吾々

は此の場所(區別の)を、扱つてゐる過程の量子力學的記述が古典的記述と實際に同等である範圍内でのみ自由に選び得ると云ふ事は上の論議の明白な結果である。

此の稿を了る前に尙ほ量子論の領域に於ける物理的實在の問題に對する一般相對性理論から導かれた偉大なる教訓の關係を強調して置きたい。事實、全特性的差異にも不拘、古典理論の之等兩一般化に於て吾々が干渉する形勢は屢々注意された様に驚くべき類似を示して

ゐる。特に、量子現象を扱ふ場合の上に論じた測定器械の特殊な地位は、相對性理論に於て、此の理論の本質そのものは、空間時間諸概念の在來の分離を拋棄せねばならない様な含蓋に於て新しい物理法則を樹立するものであるに不拘、あらゆる測定過程に於て空間時間座標間の鋭い區別を含んでゐる様な普通の記述を維持すべき有名な必要性と、密接な類似を呈してゐる。相對性理論に於て各測定や時計の讀みの基準系への從屬は、我々をして量子論に於て補足性の觀念によつて特性付けられる形勢に遭遇せしめる所の、測定對象と空間時間の基準系を決定してゐる全器械との間の運動量及びエネルギー

の本質的にコントロール出来ないやり取りと比較する事も可能である。事實自然哲學の此の新しい特色は物理的實在に關する我々の態度のラディカルな變革を意味して居る、そして之は一般相對性原理によつて齎された物理的現象の絕對的性格に關する全諸觀念の基本的變更に並行するものと云へやう。

\*正に此の事情が、量子論の不確定性原理の相對律的不變性と共に此の論文で概説した論議と相對性理論の全危機との間の一致を確實にする。此の問題は現在用意しつゝある論文に於て非常に詳細に扱ふつもりである、その論文で著者は特に重力理論のエネルギー測定への利用に關するアインシュタインによつて提出された非常に興味あるパラドックスを論ずるであらう。その解は補足性の論議に特に有益な説明を與へるものである。その中で量子論に於ける空間時間測定のもつと徹底的な議論を必要と全數學的展開と實驗裝法の圖解と共に與へるであらう、現在の論文では主な重點が問題となつてゐる論争の觀點に置かれたため之は後にゆづる事となつた。——譯註、圖解並びに簡單な數學的表現は講演で説明され「科學」六月號にも載つてゐる。