

The Past of an Electron

Young Popper's Failed *Gedankenexperiment* Against Heisenberg's Uncertainty Relations

marco.giovanelli@unito.it

Rome, 29/09/2025



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI TORINO

Introduction

- 1934–1936: Popper wrote at least eight (possibly nine) **manuscripts** on the interpretation of quantum mechanics:
 1. *Zur Kritik der Ungenauigkeitsrelationen*, 1. Mitteilung (August 1934)
 2. *Ergänzung zu der vorstehenden kurzen Mitteilung* (before November 1934)
 3. *Bemerkungen zur Quantenmechanik* (chapter VII of the *Logik der Forschung*) (Fall 1934)
 4. *Zur Kritik der Ungenauigkeitsrelationen*, 2. Mitteilung [A] (December 1934)
 5. *Zur Kritik der Ungenauigkeitsrelationen*, 2. Mitteilung [B] (December 1934)
 6. *Erwiderung auf die Kritik Heisenberg–Weizsäcker*
 7. *Meßanordnung* (February 1935)
 8. *Zur Kritik der Ungenauigkeitsrelationen* [1935] (August 1935)
 9. *Bemerkung zum Komplementaritätsproblem der Quantenmechanik* (1936)
- **Correspondence** with Weisskopf, Heisenberg, von Weizsäcker, Euler, Einstein
- **Discussions** with Urbach, Schiff, Thirring, Guth



“ a gross mistake for which I have been deeply sorry and ashamed ever since ”

Popper 1982, 15

Introduction

Recent literature refers to this episode only in passing, as a youthful blunder^{*}; however, in earlier literature it received some attention:

- **Jammer (1974)** anticipation of Einstein's 1935 EPR thought experiment
 - A variation of Einstein's 1931 ETP thought experiment (with the opposite conclusion)
- **Margenau (1974)** anticipation of the distinction between preparations and measurements
 - Misunderstood the notion of preparation



Coupling-hypothesis between preparations and measurements

^{*}Howard 2012; Shields 2012; Freire 2014; Del Santo 2017, 2019.

Part II

The Past of an Electron

The Past of an Electron: Heisenberg

DIE
PHYSIKALISCHEN PRINZIPIEN
DER QUANTENTHEORIE

VON

DR. W. HEISENBERG
PROFESSOR FÜR THEORETISCHE PHYSIK
AN DER UNIVERSITÄT LEIPZIG

MIT 22 ABBILDUNGEN IM TEXT



1 9 3 0

VERLAG VON S. HIRZEL IN LEIPZIG

- **Spring 1929:** During his lecture tour in the United States, Heisenberg delivered a series of lectures at the University of Chicago.
- **Summer 1930:** *The Physical Principles of the Quantum Theory* was published in both English and German.

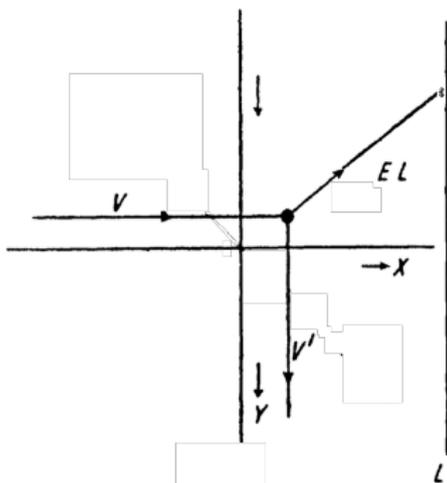
The Past of an Electron: Heisenberg

“ Beforehand, however, it should be noted that the uncertainty relations apparently do not apply to the past. For if the electron’s velocity is initially known and then its position is measured precisely, one can also calculate the electron’s positions for the time before the position measurement with precision; for this past, $\Delta p \Delta q$ is then smaller than the usual limit. Yet this knowledge of the past is purely speculative, since (because of the change of momentum during the position measurement) it in no way enters as an initial condition into any calculation concerning the electron’s future and does not appear in any physical experiment at all. Whether one should ascribe any physical reality to the aforementioned calculation about the electron’s past is therefore purely a matter of taste [*Geschmacksfrage*]. ”

(Heisenberg 1930, 15)

The Past of an Electron: Heisenberg

Collision: Electrons move along $+x$ with known p_x , photons enter along $-x$



From Heisenberg 1930, modified

- δp_y momentum at t_0 : ν -shift (Doppler) of scattered photon.
- Free motion: electron propagates undisturbed (EL).
- Position δy at t_1 : arrival at the screen at L .



Past path of the electron between the momentum measurement at t_0 and the position measurement at t_1 , so that $\delta y \delta p_y \approx 0$.

DIE NATURWISSENSCHAFTEN

19. Jahrgang

13. Februar 1931

Heft 7

Die Kausalität in der gegenwärtigen Physik.

Von M. SCHLICK, Wien.

1. Vorbemerkungen.

Unendlich ist die Zahl der denkbaren, logisch möglichen physikalischen Welten; aber die menschliche Phantasie erweist sich als erstaunlich arm, wenn sie neue Möglichkeiten darin ausfinden und durchdenken versucht. Ihr Vorstellungsvermögen ist so fest an die anschaulichen Verhältnisse der größeren Erfahrung gebunden, daß es sich auf eigene Faust kaum einen Schritt von dieser entfernen kann; erst der strenge Zwang der feineren wissenschaftlichen Erfahrung vermag das Denken von seinen gewohnten Standpunkten weiter fortzuführen. Das banalest Märchenreich der 1700er Jahre ist nur aus den Bausteinen der Welt des täglichen Lebens durch im Grunde ganz geringfügige Umgruppierungen des vertrauten Materials gebildet. Und wenn man die kühnsten und tiefsten philosophischen Systeme genauer betrachtet, so sieht man, daß von ihnen schließlich dasselbe gilt: war es beim Dichter ein Faßes mit anschaulichen Bildern, so ist es beim Philosophen ein Konstruieren mit abstrakteren, aber doch gewohnten Begriffen, aus denen mit Hilfe ziemlich durchsichtiger Kombinationsprinzipien neue Gebilde geformt werden.

Auch der Physiker verfährt bei seinen Hypothesenbildungen zunächst nicht anders. Das wird besonders die Fähigkeit, mit der er jahrhundertlang an dem Glauben festhielt, daß zur Naturerklärung eine Nachbildung der Prozesse durch sinnlich-anschaulich vorstellbare Modelle nötig sei, so daß er z. B. den Lichtäther immer wieder mit den Eigenschaften sichtbar und greifbarer Substanzen ausstatten wollte, obgleich nicht der geringste Grund dazu vorlag. Erst wenn die beobachteten Tatsachen ihm die Erweiterung seiner Begriffssysteme nahelegen oder aufdrängen, sieht er die neuen Wege und reißt sich von seinen bisherigen Denkgewohnheiten los — dann aber auch bereitwillig, und nicht macht er des Sprung etwa zum **REKEMANN'SCHEN RAUME** oder zur **EINSTEIN'SCHEN ZEIT**, zu Konzepten so köhn und tief, wie sie weder die Phantasie eines Dichters noch der Intellekt irgendeines Philosophen zu antizipieren vermocht hätte.

Die Wendung, zu der die Physik der letzten Jahre in der Frage der **Kausalität** gelangt ist, konnte ebenfalls nicht vorausgesehen werden, soweit auch über Determinismus und Indeterminismus, über Inhalt, Geltung und Prüfung des Kausalprinzips philosophiert wurde — niemand ist gerade und diejenige Möglichkeit verfallen, welche uns die Quantenphysik als den Schlüssel anbietet, der die Einsicht in die Art der kausalen Ordnung

öffnen soll, die in der Wirklichkeit tatsächlich besteht. Erst nachträglich erkennen wir, wo die neuen Ideen von den alten abweisen, und wieviel um vielleicht ein wenig, früher an der Kreuzungsstelle immer achtern vorbeigegangen zu sein. Jetzt aber, nachdem die Fruchtbarkeit der quantentheoretischen Begriffe durch die außerordentlichen Erfolge ihrer Anwendung dargetan ist und wir schon einige Jahre Gelegenheit zur Gewöhnung an die neuen Ideen gehabt haben, jetzt dürfte der Versuch nicht mehr verfrüht sein, zur philosophischen Klarheit über den Sinn und die Tragweite der Gedanken zu kommen, welche das gegenwärtige Physik zum Kausalproblem beibringt.

2. Kausalität und Kausalprinzip.

Die Bemerkung, daß philosophische Betrachtungen infolge ihrer engen Bindung an das vorhandene Gedankenmaterial die später gefundenen Möglichkeiten nicht voraussehen, gilt auch von den Erwägungen, die ich vor mehr als zehn Jahren vortragen habe (*Naturwiss.* 1920, 461 ff.). Dennoch ist es vielleicht nicht unvorteilhaft, an einigen Punkten an die älteren Überlegungen anzuknüpfen; der inzwischen erzielte Fortschritt kann dadurch nur um so deutlicher werden.

Es gilt zunächst festzustellen, was der Naturforscher eigentlich meint, wenn er von „Kausalität“ spricht. Wo gebraucht er dieses Wort? Offenbar überall da, wo er eine „Abhängigkeit“ zwischen irgendwelchen Ereignissen annimmt. (Daß nur Ereignisse, nicht etwa „Dinge“, als Glieder eines Kausalverhältnisses in Frage kommen, versteht sich heute von selbst, denn die Physik baut die vierdimensionale Wirklichkeit aus Ereignissen auf und betrachtet „Dinge“, etwa dreidimensionale Körper, als bloße Abstraktionen.) Was bedeutet aber „Abhängigkeit“? Sie wird in der Wissenschaft jedenfalls immer durch ein Geses ausgedrückt: Kausalität ist demnach nur ein anderes Wort für das Bestehen eines Gesetzes. Dem Inhalt des Kausalprinzips bildet nun offenbar die Behauptung, daß alle in der Welt gesetzmäßig geschieht; es ist ein und dasselbe, ob wir die Geltung des Kausalprinzips behaupten oder das Bestehen des **DETERMINISMUS**. Um dem Kausalatz oder die deterministische These formulieren zu können, müssen wir zuerst definiert haben, was unter einem Naturgeses oder unter der „Abhängigkeit“ der Naturvorgänge voneinander zu verstehen ist. Denn erst wenn wir dies wissen, können wir den Sinn des Determinismus verstehen, welcher besagt, daß jedes Ereignis Glied einer Kausalbeziehung sei, daß *jeder*

- **October 1930:** Drafting *Die Kausalität in der gegenwärtigen Physik*
- **November 1930:** Correspondence with Einstein, Heisenberg, and Pauli
- **December 17, 1930:** Galley proofs
- **February 13, 1931:** Publication

The Past of an Electron: Schlick

“ Heisenberg thinks that ‘whether any physical reality should be assigned to the calculation concern-ing the past of the electron, is purely a question of taste.’ But I should prefer to put it more strongly, in complete agreement with what I take to be the incontestable basic viewpoint of Bohr and Heisenberg themselves. If a statement about an electron’s position is not verifiable within atomic dimensions, we can attach no meaning to it; it becomes impossible to speak of the ‘path’ of a particle between two points at which it has been observed. (This is not, of course, true of bodies of molar dimensions. [. . .] for it is in principle possible to verify afterwards that [the projectile] was located at the intervening points.) ”

Schlick 1931, 159

Part III

The Einstein-Tolman-Podolsky (ETP) Thought Experiment

The Einstein-Tolman-Podolsky (ETP) Thought Experiment: Einstein

780

LETTERS TO THE EDITOR

of the containing vessel. Actually, however, experiment shows that the deposit is most dense directly opposite the cathode spot, with practically no deposit behind the cathode, the distribution of density following a cosine law roughly. So, little reflection must occur, condensation must take place on first impact, and vapor must flow from the cathode region at a rate just equal to the rate of vaporization measured by Tanberg. Since the momentum measured by Tanberg is carried by the mass he used, the velocity he calculated must be correct.

In the same way, the calculated high velocity of vapor striking a vane 2 cm from the cathode can be in serious error only if considerable reflection from the vane occurred,—a condition which does not seem to be true. Thus, if the force on the cathode is due to the reaction of neutralized ions, as proposed by Compton, some mechanism must exist whereby the many neutralized ions of low velocity transfer their momentum to the few atoms leaving the cathode region, with consequent high velocity.

The cathode spot itself, on the metal, need not be, and probably is not, at a high temperature. The experiment merely shows that a very high velocity vapor stream issues from the cathode region. A similarly high reaction upon the cathode of the mercury arc has been observed recently by Kobel.*

Whether or not to ascribe a high temperature to such a high velocity vapor stream is merely a matter of use of words. Perhaps, for the sake of emphasizing the unusual magnitude of the velocity, one may speak of the temperature of the vapor jet through the relation $3kT/2 = mv^2/2$.

Experiments to measure the magnitude of the vapor jet velocity by an independent means are in progress in this laboratory.

JOSEPH SLEPIAN
R. C. MASON

Research Laboratory,
Westinghouse Elec. and Mfg. Co.,
February 25, 1931.

* Kobel, Phys. Rev. **36**, 1636 (1930).

Knowledge of Past and Future in Quantum Mechanics

It is well known that the principles of quantum mechanics limit the possibilities of exact prediction as to the future path of a particle. It has sometimes been supposed, nevertheless, that the quantum mechanics would permit an exact description of the past path of a particle.

The purpose of the present note is to discuss a simple ideal experiment which shows that the possibility of describing the past path of one particle would lead to predictions as to the future behaviour of a second particle of a kind not allowed in the quantum mechanics. It will hence be concluded that the principles of quantum mechanics actually involve an uncertainty in the description of past events which is analogous to the uncertainty in the prediction of future events. And it will be shown for the case in hand, that this uncertainty in the description of the past arises from a limitation of the knowledge that can be obtained by measurement of momentum.

Consider a small box B , as shown in the figure, containing a number of identical particles in thermal agitation, and provided with two small openings which are closed by the shutter S . The shutter is arranged to open automatically for a short time and then close

again, and the number of particles in the box is so chosen that cases arise in which one par-



Fig. 1.

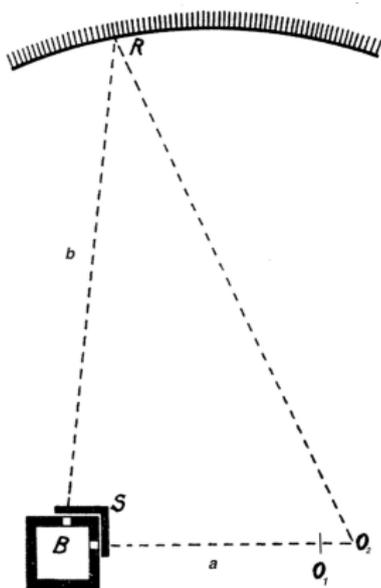
ticle leaves the box and travels over the direct path SO to an observer at O , and a second

- **February 26, 1926:** Einstein, Tolman, and Podolsky (ETP) submitted a letter to the editor of the *Physical Review*
- **March, 15 1931:** publication



ETP set-up: If sharp retrodictions about one particle *were* allowed, then predictions about a second, which the uncertainty relations forbids, *would be* possible.

The Einstein-Tolman-Podolsky (ETP) Thought Experiment: Einstein



From Einstein, Tolman, and Podolsky 1931, modified

- Box B with shutter S emits identical particles a and b at t_0
- Weighing B before and after gives the total energy loss ($E_{\text{tot}} = E_a + E_b$)
- Observer O can
 - measure momentum p_a (and energy E_a) at O_1 (Doppler effect)
 - record the position and arrival time t_1 of a at O_2
- Position of a at t_1 + **past** momentum $p_a \Rightarrow t_0$ shutter opening
- **Loophole opened:**
 - From energy conservation $\Rightarrow E_b = E_{\text{tot}} - E_a$
 - From $t_0 + SRO_2 \Rightarrow t_b$ arrival time at O_2

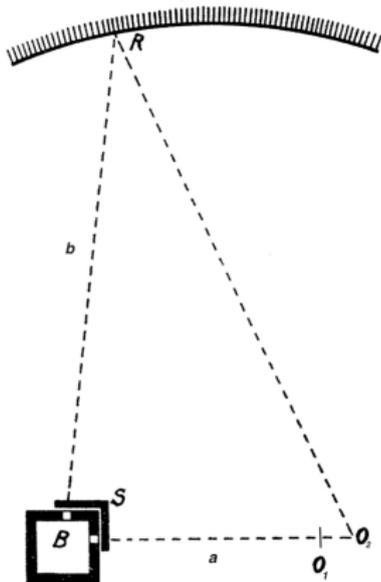
The Einstein-Tolman-Podolsky (ETP) Thought Experiment: Einstein

“ It is hence to be concluded that the principles of the quantum mechanics must involve an uncertainty in the description of past events which is analogous to the uncertainty in the prediction of future events. It is also to be noted that although it is possible to measure the momentum of a particle and follow this with a measurement of position, this will not give sufficient information for a complete reconstruction of its past path, since it has been shown that there can be no method for measuring the momentum of a particle without changing its value.

”

Einstein, Tolman, and Podolsky 1931, 781

The Einstein-Tolman-Podolsky (ETP) Thought Experiment: Einstein



- use retrodiction about a particle path allowed by uncertainty relations + conservation law \Rightarrow prediction about another particle *not* allowed by uncertainty relations
- momentum measurement followed by position measurement
- momentum reconstruction before momentum measurement **fails**

Part IV

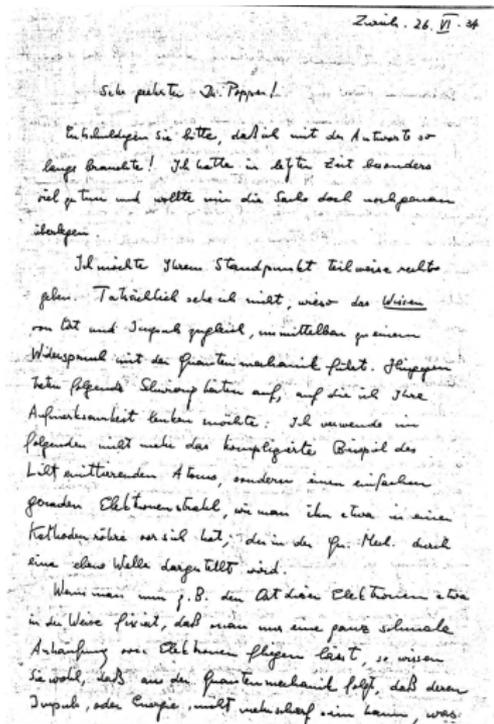
Popper's Turn to Quantum Theory

Popper's Turn to Quantum Theory



- **1931–1933:** Wrote *Grundprobleme*
- **1933–1934:** Transforming *Grundprobleme* into the *Logik*.
 - **April–May 1934:** Springer requested to shorten the book
 - **May–June 1934:** Quantum physics chapter with input from Franz Urbach, Victor Weisskopf, and his cousin Käthe Schiff
 - **June 26, 1934:** Letter from Weisskopf

Popper's Turn to Quantum Theory



Weisskopf to Popper, 26-06-1934, KPA, 360.21

- **Weisskopf:** I agree, the knowledge (Wissen) of position and momentum at the same time is not \perp with quantum mechanics; the problem is that such states cannot be produced (hergestellt).
- **Popper:** Apparatuses that can measure sharp values of both position and energy do not imply that such states can also be produced.
- **Weisskopf:** If such measurements are possible, then state-production must also be possible. This would contradict the uncertainty relations.

Popper's Turn to Quantum Theory

“ (1) Apparatuses that can measure both position and energy at the same time are not necessarily able to produce electron ensembles with sharp position and energy. I consider this conclusion not entirely correct, since – in the case that one has the possibility of determining the energy of electrons at sharp position – it must surely also be technically possible somehow to remove them, for example, if they have too much energy.

(2) You can probably anticipate my line of reasoning, which leads you to say that quantum mechanics is only capable of dealing with that world in which such apparatuses are not applied. But I would already regard that as a breakdown. After all, apparatuses are also part of nature and should therefore be valid within it. ”

Weisskopf to Popper, 06-06-1934

Popper's Turn to Quantum Theory

SCHRIFTEN ZUR
WISSENSCHAFTLICHEN WELTAUFFASSUNG
HERAUSGEGEBEN VON
PHILIPP FRANK UND MORITZ SCHLICK
o. ö. PROFESSOR AN DER UNIVERSITÄT PRAG BAND 9 o. ö. PROFESSOR AN DER UNIVERSITÄT WIEN

LOGIK DER FORSCHUNG

ZUR ERKENNTNISTHEORIE DER
MODERNEN NATURWISSENSCHAFT

VON

KARL POPPER



Springer-Verlag Wien GmbH 1935

- **August 27, 1934:** Paper sent to *Die Naturwissenschaften*
 - *Zur Kritik der Ungenauigkeitsrelationen (1. Mitteilung)*
- **Before November 1934:** Wrote a supplement to the paper
 - *Ergänzung zu der vorstehenden kurzen Mitteilung*
- **Autumn 1934:** Finished chapter 9 of *Logik der Forschung* + Apps. VI, VII
 - *Bemerkungen zur Quantenmechanik*

Part V

Popper and the Interpretation of The Uncertainty Relations

Popper and the Interpretation of The Uncertainty Relations: Selections and Measurements

- (Physical) **selection** (*Aussonderung*) is any procedure that produces a statistically reproducible ensemble of systems (filtering).
- **Measurement** (*Messung*) involves the detection of a particular system by a measuring instrument (recording).



- Not every physical separation is a measurement: passing electrons through a velocity filter prepares a sub-ensemble with definite momentum (a pure case, plane wave), but no value is recorded.
- Not every measurement is a physical separation: electrons in a monochromatic beam can be registered by a Geiger counter at a given location, but the electrons are not physically separated according to position.

Popper and the Interpretation of The Uncertainty Relations

$$\Delta q \Delta p \gtrsim \frac{h}{4\pi}$$

- (a) The uncertainty relations limits the degree of **statistical homogeneity** achievable in the selection of an *ensemble* of identical systems (*Unbestimmtheitsrelationen*)
- Statistical interpretation (von Mises)
- (b) The uncertainty relations limits the **precision** of the measurement on a *single* system (*Ungenauigkeitsrelationen*)
- Disturbance interpretation (Heisenberg)
- (1) (a) is the correct interpretation of the uncertainty relations (no super-pure case)
- (2) (b) does not logically follow from (a)
- (3) (b) follows from (a) only with an additional hypothesis (c)
- (4) The system (a) + (c) is contradictory

Popper and the Interpretation of The Uncertainty Relations: Predictive and Non-Predictive Measurements

Heisenberg concedes the possibility of sharper measurements:

- **Predictive** measurements on a single system $\delta q \delta p < \frac{h}{4\pi}$ are forbidden
- **Non-predictive** measurements on a single system $\delta q \delta p < \frac{h}{4\pi}$ are allowed
 - (a) Position followed by position
 - (b) Momentum followed by position
 - (c) Position followed by momentum
- \Rightarrow Arbitrarily sharp past of the electron **between** the two measurements

Is the past path of an electron real?

- **Heisenberg**: a question of taste
- **Schlick**: a meaningless question
- **Popper**: a meaningful question

Popper and the Interpretation of The Uncertainty Relations: The Coupling Hypothesis

- **Non-predictive** measurements on single systems $\delta q \delta p < \frac{h}{4\pi}$ are required (to test the theory)
- **Predictive** measurements on single systems $\delta q \delta p < \frac{h}{4\pi}$ are forbidden (why?)



“ That is precisely my opinion, our opponent [**Weisskopf**] will reply [...][:] If I had instruments with which I could carry out such measurements, then with these or similar instruments I should also be able to produce [*herstellen*] electron ensembles that are (a) spatially localized and (b) possess a definite momentum. [...] To these considerations we [**Popper**] first remark that [...] these considerations do not prove that exact predictions would contradict quantum mechanics, but rather introduce an additional hypothesis.

”

Popper and the Interpretation of The Uncertainty Relations: The Coupling Hypothesis

coupling-hypothesis (*Kopplungshypothese*)



“ The statement (which corresponds to Heisenberg’s view) that exact single predictions are impossible turns out to be equivalent to the hypothesis that **predictive measurements and physical selections are inseparably coupled**. With this new theoretical system—the conjunction of quantum theory with this auxiliary coupling-hypothesis—my conception must indeed clash. Thus we have completed point (3) of our program; what still remains to be shown is point (4): that the system, consisting of statistically interpreted quantum mechanics (together with the laws of momentum and energy conservation), combined with the coupling hypothesis, is **contradictory**.

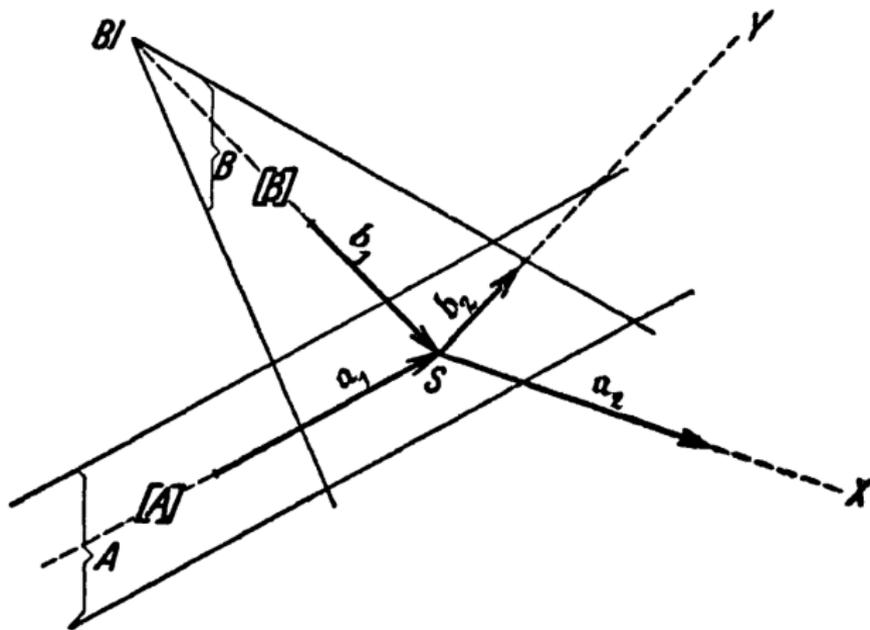
Part VI

Popper's ETP-like Thought Experiment

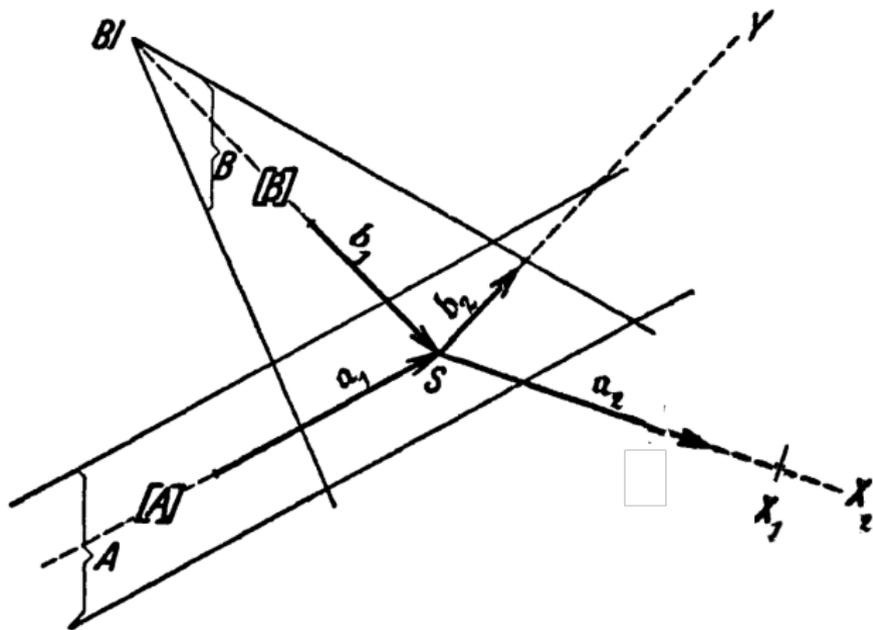
Popper's ETP-like Thought Experiment

- Two **non-predictive** measurements on one particle (momentum followed by position)
- **Conservation law**
- A **predictive measurement** on another particle sharper than the uncertainty relations allows

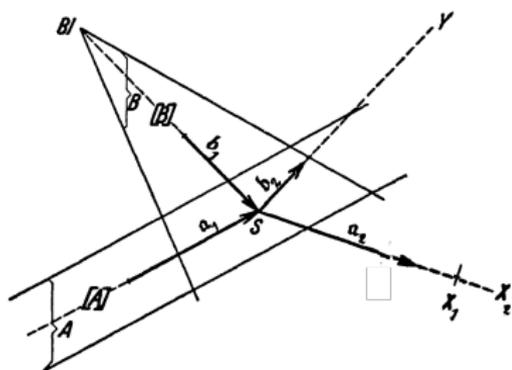
Popper's ETP-like Thought Experiment



Popper's ETP-like Thought Experiment



Popper's ETP-like Thought Experiment: Crossed Beams Setup



Reconstructing the past
of an electron (and cons.
law) allows prediction
of the future of a photon

■ Physical selection:

- Electron beam A : monochromatic, sharp momentum a_1
- Photon beam B : slit-selected; unsharp momentum b_2

■ Collision at S (Compton-effect):

- A -electron goes to X with a_2
- B -photon goes to Y with b_2
- Conservation of momentum:
 $a_1 + b_1 = a_2 + b_2$

■ Non-predictive measurements:

- X_1 : electron momentum a_2
- X_2 : electron position at X_2 at t_A

■ Predictive measurement:

- From t_A and a_2 reconstruct t_S
- Momentum $b_2 = (a_2 + b_2) - a_2$
- Arrival time t_B at Y ,
- Photon B will be at Y with b_2 at t_B

Popper's ETP-like Thought Experiment: Addendum

“ [D]oubts could now arise regarding the possibility of [...] such non-prognostic measurements as we require in the specified experiment. One could in fact take the following view: non-prognostic measurements allow us to make an exact calculation only for certain intervals, namely for the intervals **between** two measurements [X_1 and X_2] [...]. For the time **before** the first [X_1] or after the second measurement [X_2], however, [...] the uncertainty relation holds, whose validity would therefore (in contrast to Heisenberg's remark) be **symmetrical for past and future***. ”

Popper, Ergänzung

*The conclusion of the ETP paper.

Popper's ETP-like Thought Experiment: Appendix VI

- At X_1 , an **electrostatic filter** (parallel plates with E normal to the beam) selects electrons with the same momentum p_x without changing it.
 - Hence, it does not change the x -coordinates of a single particle; otherwise, there would be a jump (only the ensemble shows a spread of positions).
- At X_2 , a **Geiger counter** (or moving film strip) records position x and arrival times t .



“ Assuming that the x -coordinates of the particles are not disturbed by the momentum measurement, then the exact determination of position and momentum also extends to the time before the momentum selection [X_1]; assuming that the momentum selection disturbs the x -coordinates, then we can calculate the trajectory exactly only for the time between the two measurements [X_1 and X_2]. ”

(Popper 1935, 220)

Part VII

The Leipzig Reaction



Heisenberg and Weizsäcker in Leipzig, 1935. Source: Max Planck Society Archive, Berlin

The Leipzig Reaction

Institut für theoretische Physik
der Universität Leipzig

LEIPZIG 01, am 25. Nov. 34
Linden 4

Herrn
Dr. Karl P o p p e r,

W i e n XIII
Anton Langergasse 46

Sehr geehrter Herr Dr. Popper!

Herr Dr. Berliner schickte mir, wie Sie in Ihrem Brief erwähnen, einen Korrekturabzug Ihrer Zuschrift an die Naturwissenschaften. Auf die Bitte von Dr. Berliner haben Dr. v. Weisäcker und ich uns das von Ihnen gestellte Problem überlegt und, wie wir glauben, den Fehlschluss in Ihrer Diskussion des Gedankenexperimentes gefunden. Wir haben daraufhin eine kurze Diskussion des Experimentes an Herrn Dr. Berliner geschickt mit der Bitte, sie Ihnen weiterzugeben und für den Fall, dass Sie an der Veröffentlichung Ihrer Zuschrift festhalten wollen, sie gleichzeitig zu veröffentlichen. Welcher Art die Kritik ist, die wir an Ihren Überlegungen über, werden Sie ja aus unserer Note inzwischen gesehen haben. Es handelt sich im wesentlichen um den Begriff der "nichtprognostischen Messung", der uns in Ihrer Arbeit missverständlich erscheint. Da es wahrscheinlich am leichtesten ist, bei der Diskussion eines bestimmten Experimentes zur Klarheit zu kommen, so würde es mich interessieren zu wissen, ob Sie mit dem, was in Weisäckers Note steht, einverstanden sind oder nicht. Ich glaube, es müsste möglich sein, hierüber zur Einigkeit zu gelangen.

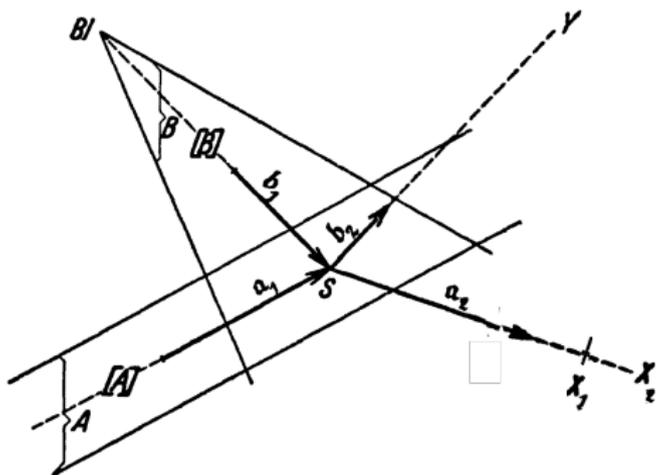
Mit vorzüglicher Hochachtung

W. Heisenberg.

“ You will then see what kind of criticism it is. Essentially, it concerns the concept of the ‘non-prognostic measurement,’ which in our view appears to be misunderstood in your work.

”
Heisenberg to Popper,
23-11-1934

The Leipzig Reaction: von Weizsäcker's Reply



- Measuring momentum at X_1 (Doppler effect) and later position at X_2 (Geiger counter) allows reconstructing a 'trajectory' only **between** X_1 and X_2 .
- It cannot be extended **before** X_1 due to the trade-off between frequency accuracy ($\Delta\nu$) of scattered radiation and observation time (Δt).



time of the collision
at S undetermined

The Leipzig Reaction: von Weizsäcker's Reply

“ Thus, even if the position [at X_2] after the momentum measurement is exactly known, one still cannot infer the position before the momentum measurement [at X_1] with an accuracy greater than the error $h/4\pi\Delta p$. That is, our knowledge of the trajectory of particle A before the momentum measurement at X , and thus also of the trajectory of particle B after the collision at S , is in accordance with the uncertainty relation. This proof, of course, again applies only to a specific experimental setup. However, we have no reason to doubt that any other combination of measuring devices at X would yield the same result. ”

Weizsäcker in Popper 1934

The Leipzig Reaction: Popper Counter-Reply

November 26, 1934: sent the galley proofs of the *Logik* to Heisenberg + Appendix VI

- Popper insists that in his first note he did not attempt to prove the legitimacy of calculating the past of the electron, but simply assumed it, citing Heisenberg's remark as licence.
- Popper replies that von Weizsäcker refuted only one method of momentum measurement (scattering), not all. By using momentum selection devices (filters, spectrometers), he claims, one can measure momentum without disturbing the particle.

The Leipzig Reaction: The Publication of the Paper

Kurze Originalmitteilungen.

Unter Mitwirkung von MAX HARTMANN, MAX V. LAUE, CARL NEUBERG, ARTHUR ROSENHEIM und MAX VOLMER.

Für die kurzen Originalmitteilungen ist ausschließlich der Verfasser verantwortlich.
Der Herausgeber bittet, 1. im Manuskript der kurzen Originalmitteilungen oder in einem Begleitschreiben die Notwendigkeit einer baldigen Veröffentlichung an dieser Stelle zu betonen, 2. die Mitteilungen auf einen Umfang von höchstens einer Druckspalte zu beschränken.

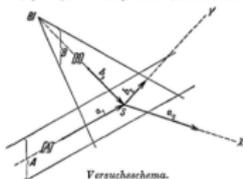
Zur Kritik der Ungenauigkeitsrelationen.

Die Interpretation der HEISENBERG'schen Ungleichungen

$$\Delta p \cdot \Delta q \geq \frac{h}{4\pi}$$

stützt sich auf Gedankenexperimente (Beobachtung durch ein Mikroskop usw.), die genauere, für nachprüfbar prognosen verwendbare Messungen nicht gestatten. Auf andere, „nichtprognostische“ Messungen, z. B. Messung des Impulses eines Teilchens beim Eintritt in einen genau gemessenen Ort, können die Ungenauigkeitsrelationen nicht ohne weiteres angewendet werden. — Bei dieser Methode der Diskussion kann natürlich nie ausgeschlossen werden, daß doch noch ein Gedankenexperiment aufgefunden wird, das genauere prognostische Messungen (unter Verwendung bekannter Effekte und Gesetzmäßigkeiten) als möglich erscheinen läßt. Ein derartiges Experiment wäre nun in der Tat das folgende:

Ein Elektronenstrahl A und ein Licht- (Röntgen-) Strahl B werden gekreuzt (auch andere Kombi-



Versuchsschema.

nationen von Strahlen sind möglich). A sei ein monochromatischer Parallelstrahl, B falle an der Stelle B durch einen schmalen Spalt und bilde monochromatische Kugelwellen; A und B sind also *reine Fälle*. Wir betrachten nun zwei schmale, einander bei S schneidende Teilstrahlen A_1 und B_1 , ohne diese Teilstrahlen jedoch aus den Strahlen A und B durch irgendwelche Vorrichtungen (Blenden od. dgl.) technisch zu isolieren. Der Impuls a_1 von A ist bekannt, ebenso der Impulsbetrag b_1 von B . Wir kennen daher auch die Impulsvektoren a_1 und b_1 der Teilstrahlen A_1 und B_1 (vor einem etwaigen Zusammenstoß der Teilchen bei S).

Wir wählen nun eine Richtung SX und betrachten jene Teilchen von A_1 , die nach dem Zusammenstoß in diese Richtung fliegen. Wir können dann deren Impuls a_2 berechnen sowie den Impulsvektor b_2 jener Teilchen von B_1 , die mit den in die Richtung SX fliegenden A_2 -Teilchen bei S zusammen gestoßen sind (COMPTON-Effekt). Stellen wir nun bei X einen Apparat auf (etwa einen entsprechend konstruierten Spitzenzähler), der die Impulsbeiträge der aus der Richtung SX einfallenden Teilchen sowie den Zeitpunkt des Eintreffens registriert, so können wir zu jedem beliebigen registrierten Impulsbeitrag a_2 Ort und Impuls jenes B_1 -Teilchens berechnen, das mit dem betreffenden A_2 -Teilchen bei S zusammengestoßen ist (sowie den Ort S des Zusammenstoßes, der sich mit variierendem a_2 auf der gewählten Geraden SX verschiebt). Die Genauigkeit dieser Berechnung ist für die SX -Richtung (bei geeigneter Anordnung) keiner grundsätzlichen Beschränkung von der Art der Ungenauigkeitsrelationen unterworfen; dabei wird vorausgesetzt, daß Impulsbetrag und Zeitpunkt eines einfallenden Teilchens „nichtprognostische“ Messung — beliebig genau meßbar ist (eine Voraussetzung, deren Zulässigkeit an anderer Stelle diskutiert wird). Die Berechnung hat den Charakter einer nachprüfbar prognostischen. Denn wir können auf der Bahn der mit dem berechneten Impulsvektor b_2 gestreuten B_1 -Teilchen — etwa bei Y — einen zweiten Registrierspalt aufstellen und mit seiner Hilfe prüfen, ob prognostizierte b_2 -Einschläge zur berechneten Zeit eintreffen oder nicht. Das angegebene Experiment führt also die Möglichkeit genauer Prognosen auf die gewissermaßen „nichtprognostischer“ Orts- und Impulsmessungen zurück.

Für dieses Experiment, dessen grundsätzliche Möglichkeit durch die Versuche von COMPTON-SNOW und BORSA-GRIZIA wohl außer Zweifel steht, ist charakteristisch, daß es uns nicht gestattet, bestimmten Teilchen einen bestimmten Ort und einen bestimmten Impuls willkürlich zu erteilen: Die Teilchen, deren Bahnen (Orte und Impulse) wir prognostizieren, werden in zufallsartig streuend-Abständen aufeinanderfolgen; und es ist auch nicht möglich, sie aus dem Teilchenschar, in dem auch andere Teilchen (mit zufallsartig streuend- Zustandsgrößen) auftreten, technisch zu isolieren. Das Experiment gibt also keinen Anhaltspunkt zur Herstellung einer Teilchenmenge, die homogener ist als ein reiner Fall. Interessiert man die HEISENBERG'schen Ungleichungen nicht als Genauigkeitsbeschränkungen (Ungenauigkeitsrelationen), sondern als statistische Streuungsrelationen — in dem Sinn, daß sie die Herstellung (bzw. Existenz einer Teilchenmenge, die homogener ist als ein reiner Fall, als mit der Quantenmecha-

nik unvereinbar erklären —, so wird ihre Gültigkeit durch das angegebene Experiment nicht beeinträchtigt.

Prognostische Messungen einzelner Teilchen von größerer Genauigkeit als die Ungenauigkeitsrelationen erforderten scheinen (ja sogar von grundätzlich beliebiger Genauigkeit), sind also möglich; sie sind nicht nur mit der statistisch geleiteten Quantenmechanik vereinbar, sondern werden von dieser (wie hier nicht näher ausgeführt werden kann) sogar verlangt!

Wien, den 27. August 1934.

KARL POPPER.

Das von HERR POPPER angegebene Experiment erlaubt bei korrekter Diskussion keine Unterschreitung der in der Ungenauigkeitsrelation gegebenen Genauigkeitsgrenze. Es ist nicht möglich, aus den Messungen in X Ort und Zeit des Zusammenstoßes in S genau zu bestimmen. Um dies einzusehen, ist es allerdings notwendig, über die Messungen in X präzise Angaben zu machen. Es werde beispielsweise zuerst der Impuls des A -Teilchens und dann der Zeitpunkt seines Eintreffens an einem vorgegebenen Ort gemessen. Die Ortsmessung zerfällt zwar in die Kenntnis des Impulses nach dem Stoß; dagegen läßt sich aus dem Impuls vor dem Stoß und dem Ort eine „Bahn“ des Teilchens vor dem Stoß konstruieren. Diese Tatsache dürfte so sein, die Herr POPPER durch den Begriff der „nichtprognostischen Messung“ ausdrücken will. Diese Bahn ist jedoch *prinzipiell* unkontrollierbar. Sie gilt nämlich nur für das Zeitintervall zwischen dem Ende der Impulsmessung und dem Beginn der Ortsmessung, in dem das Teilchen überhaupt keine Wechselwirkung mit seiner Umgebung hat, und läßt sich nicht in den Zeitraum vor der Impulsmessung fortsetzen, da diese ihrerseits die Kenntnis des Orts gemäß der Ungenauigkeitsrelation zerstört. Soll der Impuls beispielsweise durch einen Stoßprozeß (Doppelerfekt) gemessen werden (ein Spitzenzähler ist zu Impulsmessungen nicht geeignet), so erfordert die Messung eine endliche Zeit, weil sonst die Frequenz des stoßenden Lichtquants oder Elektrons nicht exakt definiert werden kann und somit der beim Stoß durch den Stoß teilweise unbestimmt bleibt. Infolgedessen kann aber der Zeitpunkt des Stoßes nicht genau festgelegt werden, und das bedeutet wegen der Geschwindigkeitsänderung beim Stoß, daß die mittlere Geschwindigkeit während der Zeitdauer der Impulsmessung nicht genau bekannt ist. Ist also der Ort nach der Impulsmessung genau bekannt, so kann daraus doch nicht der Ort vor der Impulsmessung genauer als mit dem Fehler $\Delta x \approx v \Delta t$ geschlossen werden. Das heißt, unsere Kenntnis der Bahn des A -Teilchens vor der Impulsmessung in X und somit auch der Bahn des B -Teilchens nach dem Stoß in S ist mit der Ungenauigkeitsrelation im Einklang.

Dieser Nachweis gilt natürlich wieder nur für eine spezielle Messanordnung. Wir haben aber keinen Grund, daran zu zweifeln, daß jede andere Kombination von Meßparapetien in X dasselbe Resultat liefern würde. Denn Herr POPPER führt bei seiner allgemeinen Diskussion des Experiments einen Widerspruch zur Quantenmechanik ein, indem er zwischen der von ihm definierten „nichtprognostischen Messungen“ und nachprüfbar prognostischen über die Vergangenheit nicht unterscheidet. Auf die „nichtprognostischen Messungen“ lassen sich die Ungenauigkeitsrelationen nur deshalb nicht anwenden, weil die Sätze, in denen ihre Resultate mitgeteilt werden, gar keine Aussagen über physikalisch mögliche Messungen enthalten; nachprüfbar Schlüsse auf die Vergangenheit unterliegen dagegen wegen der Symmetrie der quantenmechanischen Gesetze in bezug auf die Zeitrichtung denselben Genauigkeitsbeschränkungen wie nachprüfbar Schlüsse auf die Zukunft. v. WEIZSÄCKER.

The Leipzig Reaction: The Counter-Counter Reply

Zur Kritik der Ungenauigkeitsrelationen. 2. Mitteilung.

(Replik auf Dr. v. WEISSÄCKERS Kritik an der 1. Mitteilung "Zur Kritik der Ungenauigkeitsrelationen", Die Naturwissenschaften 22, Heft 4, S. 807f., vom 30. November 1934.)

Der in meiner 1. Mitteilung dargestellte Gedankengang sollte zeigen, dass genaue Orts- und Impulsprognosen möglich sind, wenn vorausgesetzt wird, dass eine genaue "Rechnung über die Vergangenheit" des Teilchens, d.h. über seine Bahn bis zum Eintreffen an einem genau gemessenen Ort zulässig ist. Die Zulässigkeit dieser Voraussetzung wollte ich in der 1. Mitteilung nicht untersuchen, da ich glaubte, aus einer Bemerkung HEISENBERGS¹ schliessen zu dürfen, dass sie beakmt ist. Ich verwies in meiner 1. Mitteilung auf ausführlichere Auseinandersetzungen in meinem Buch².

Dennoch beschäftigt sich die v. WEISSÄCKERsche Kritik meiner Mitteilung ausschliesslich mit dieser, dort überhaupt nicht diskutierten Voraussetzung³. Ich gehe deshalb in der vorliegenden Erwiderung davon aus, dass der in meiner 1. Mitteilung skizzierte Gedankengang - die Zurückführung der "prognostischen" Messung auf die Zulässigkeit von gewissen "nichtprognostischen" Messungen - einwandfrei ist und beschränke mich darauf, die in meiner 1. Mitteilung nicht diskutierte Zulässigkeit des fraglichen "nichtprognostischen" Messverfahrens, die v. WEISSÄCKER bestreitet, zu begründen.

"Nichtprognostisch" nenne ich Messungen, die zu einen der folgenden drei Fällen gehören: (a) Zweimalige Ortsmessung, (b) Ortsmessung mit vorangegebener und (c) mit nachfolgender Impulsmessung. Der Ausdruck "nichtprognostisch" soll andeuten, dass diese Kombinationen von Messungen (unhöchst) keinerlei Anhaltspunkte für nachprüfbare Behauptungen über das Teilchen zu liefern scheinen, wir können zwar voraussetzen, dass jede der beiden Messungen, die zusammen den Fall (a), (b) oder (c) ergeben, unbeschränkt genau sein kann, und wir können auf Grund beider Messungen zusammen auch ein Stück der Bahn des

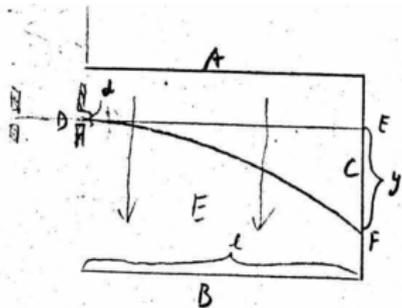
¹Die physikalischen Prinzipien der Quantentheorie, S. 15.

²Logik der Forschung, S. 177 ff., S. 220 ff.

³Der Inhalt meines Buches, das erst im Dezember 1934 erscheint, war HEISENBERG v. WEISSÄCKER nicht bekannt.

- **December 6, 1934** Popper sent a second communication
- **December 6, 1934** von Weizsäcker drafted a counter-reply
- **December 10, 1934** Heisenberg wrote to Popper (enclosing von Weizsäcker's letter)
- **December 16, 1934** Popper replied to Heisenberg with a revised version of his second communication

The Leipzig Reaction: von Weizsäcker's Counter-Counter Argument



Electrostatic setup to analyze the momentum of charged particles, like electrons

- The screen position $EF = y$ encodes momentum p information only if the entry position d is known with finite precision.
- If one improves the precision of d , the spread of momentum p increases.



The uncertainty relations are encoded in the momentum measurement apparatus itself

The Leipzig Reaction

Lieber Herr Popper!

Ich wollte Ihnen eigentlich ausführlich antworten, aber ich sprach letzters Herzenberg, der mir von der brieflichen Diskussion erzählte, die er übrigens sehr anregend fand. Da meine Stellungnahme ~~so~~ sachlich identisch mit der Herzenbergs u. Weizäcker's ist, glaube ich, daß eine Diskussion zwischen uns nur eine Wiederholung wäre.

Ich glaube, daß bei der jetzigen Situation

The Leipzig Reaction

- **February 1935** — Popper sent a new *Meßanordnung*
- **February 4, 1935** — Euler to Popper
- **February 14, 1935** — Popper drafted a response (not sent)
- **March 12, 1935** — Popper's second response
- **March 19, 1935** — Heisenberg sent his final letter
- **March 1935** — Grete Hermann (1935)

Part VIII

The Popper-Einstein Correspondence

The Popper-Einstein Correspondence

- **March 25, 1935** — EPR paper submitted to *Physical Review*; published on May 15, 1935.
- **April 28, 1935** — Frieda Busch to Einstein: *Logik der Forschung* + paper
- **June 15, 1935** — Einstein to Popper: endorsed Popper's philosophy but criticized the experiment as flawed
- **July 18, 1935** — Popper to Einstein
- **August 29, 1935** — Popper to Einstein: typescript *Zur Kritik der Ungenauigkeitsrelationen*

The Popper-Einstein Correspondence

Zur Kritik der Ungenauigkeitsrelationen.

A. Kurze Angabe der Grundgedanken.

Im folgenden wird die These vertreten, dass die aus der Quantenmechanik ableitbare HEISENBERG'sche Formel

$$(1) \quad \Delta p_x \Delta x \geq h/4\pi$$

im System der statistisch interpretierten Quantenmechanik nicht als "Unngenauigkeitsrelation", d.h. als Beschränkung der erreichbaren Genauigkeit bei gleichzeitigen Messungen einer Partikel interpretiert werden darf. Wir behaupten, dass die Formel (1) im System der statistisch interpretierten Quantenmechanik nur als statistische Aussage über die Streuung einer quantenmechanischen Gesamtheit (z.B. einer Elektronenmenge) interpretiert werden darf.

Versucht man, eine quantenmechanische Gesamtheit, etwa einen Lichtquanten- oder Elektronenstrahl möglichst homogen zu machen, so finden wir, dass solchen Bemühungen Grenzen gesetzt sind; wir können z.B. nicht die Impulse der verschiedenen Partikel der Gesamtheit beliebig genau monochromatisieren und gleichzeitig (durch Ausblendung) den Strahl beliebig schmal (oder beliebig kurz) machen, usw. Diese Erscheinung, die man in der Ausdruckweise der Wellenmechanik Wellentheorie "Beugung" zu nennen pflegt, kann man, wenn man von Partikelgesamtheiten spricht, als "Streuung" bezeichnen; man kann etwa in Bezug auf unser Beispiel sagen: (2) Die Orte der einzelnen Partikel eines Lichtstrahls streuen umso mehr, je homogener die Impulse sind, und umgekehrt.

Dieser Satz ist nur ein Spezialfall des allgemeinen Satzes der statistischen Quantenmechanik.

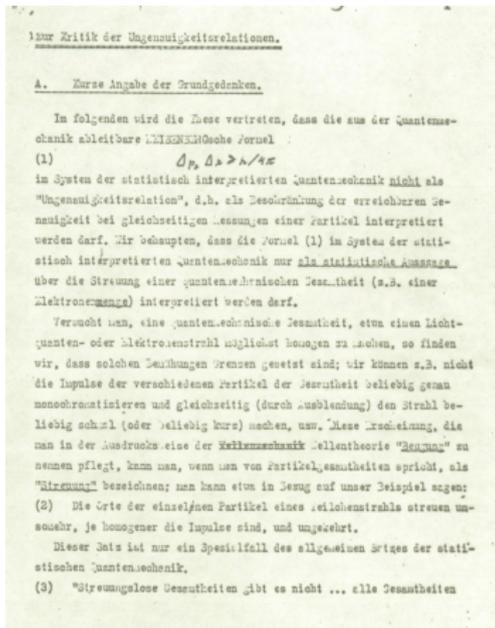
(3) "Streuungslose Gesamtheiten" gibt es nicht ... alle Gesamtheiten

The Popper-Einstein Correspondence

“ One would have to apply a ‘non-prognostic measurement’ according to case b) — a position measurement [at X_2] preceded by a momentum measurement at [at X_1]— arranged in such a way that one can calculate the trajectory not only in the interval **between** the two measurements, but also for the time **before** the momentum measurement) The position coordinate is measured precisely by the peak counter (the moment of incidence [at X_2]). Question: Is there a method of momentum measurement [at X_1] that could precede this position measurement without destroying (blurring) the position coordinate of the particle? ”

Popper, Zur Kritik der Ungenauigkeitsrelationen (1935)

The Popper-Einstein Correspondence



Popper's new filter

- **Colored glass filter** (e.g., a green filter): allows a broad band of wavelengths to pass, but blocks most other colors.
- **Gas layers**: absorb photons whose energy matches their resonances and let the others pass.
 - on-resonance photons
⇒ absorbed and re-emitted (blurred)
 - off-resonance photons
⇒ transmitted (unchanged)

The Popper-Einstein Correspondence

Blattyn. 19. IX. 35.

Lieber Herr Popper!

Ich habe Ihre Abhandlung angesehen und sie, wenn auch
gekennzeichnet. Nun glaube ich nicht an die Herstellbarkeit
eines „idealen Filters“, das es erlaubt würde, Rot und Violett
(Farbe) eines Lichtquants mit „unabhängiger“ Genauigkeit
zu präzisieren. Die Mittel (Folien mit Chloroform-
Kohlensäure) in Verbindung mit selektiv durchlässigen
(Filtern) halten sich aus dem Grunde für prinzipiell
unwirksam, weil sich bestimmt glaubt, dass ein
solches Filter „irreversibel“ wirkt wie etwa ein
Nennungsgerät.

Meine Begründung ist folgende. Denken Sie an
ein knappes Lichtsignal (genannt Rot). Nun die Kleinheit
des Abstrahierfilters zuzunehmen zu versuchen, den ICC (ich
meine dieses ein formal in eine große Anzahl von quasi-
monochromatischen Wellenlängen zu zerlegt. Die „Bordstei-
ner“ wirken auf alle „Frequenzen“ bis auf 10¹⁴. Dies ist ein
großes hat aber eine erhebliche Bedeutung, weil ein
quasi-monochromatisch rot (Abstrahlung);
d. h. das Filter wirkt unendlich „irreversibel“.

Sie gefällt das ganze unvollständig, gestört werden
haben an Beobachtungen überhaupt nicht. Ich

(Anmerkung)

² Folglich: Die v. Laue'sche Charakteristik eines (System-) „Gittergitters“
nicht ein „Lichtgitter“. Dies ist auch, dass Ergebnis der ersten unter
denjenigen Beobachtung. Diese Auffassung macht es auch möglich,
„Gittergitter“ und „Gittergitter“ Filter zu unterscheiden.

Einstein to Popper, 11-09-1935

The Popper-Einstein Correspondence

“ I have looked at your paper, and I largely [*weitgehend*] agree. Only I do not believe in the possibility of producing a ‘super-pure case’ which would allow us to predict position and momentum (colour) of a photon with ‘inadmissible’ precision. The means proposed by you (a screen with a fast shutter in conjunction with a selective set of glass filters) I hold to be ineffective in principle, for the reason that I firmly believe that a filter of this kind would act in such a way as to ‘smear’ the position, just like a spectroscopic grid. ”

Einstein to Popper, 11-09-1935



- short light signal (precise position) is analyzed into quasi-monochr. wave trains W_n
- absorbing filters cut out all the colors W_n except W_1 .
- the filter *puts* photons in a state with sharp momentum W_1 (thus unsharp position).

Part IX

Conclusion: Learning from Popper's 'Gross Mistake'

"A gross mistake for which I have been deeply
sorry and ashamed of ever since"

(Popper 1982, 15)

Conclusion: Learning from Popper's 'Gross Mistake'

- **Jammer (1974)** anticipation of Einstein's 1935 EPR thought experiment
 - A variation of Einstein's 1931 ETP thought experiment (with the opposite conclusion)
- **Margenau (1974)** anticipation of the distinction between preparations (selections) and measurements
 - (Predictive) preparations and (non-predictive) measurements: predictive measurements without prior preparation.



Weak Coupling-Hypothesis

Every measurement is a preparation (Weisskopf) Every measurement presupposes a preparation (Margenau)

Einstein's Unsent Letter: A Philological Cunundrum

“ The present quantum mechanics is adapted to the following postulate, which appears unavoidable in view of the empirical facts: If a measurement on a system yields a value, then the same measurement performed immediately afterward will, *with certainty*, yield the same value W . [...] [Example of polarizer] Therefore in my opinion one cannot avoid the assumption that the measurement [...] brings about a new state which, with respect to the variables to which the measurement refers, is an eigenstate ”

Einstein to Popper or Margenau (?), 01-01-1936

Thanks!

Acknowledgements: I thank Thomas Hainscho of the Karl Popper Archives (KPA) for kindly providing access to the unpublished manuscript and correspondence discussed in this talk

Marco Giovanelli

Università degli Studi di Torino
Dipartimento di Filosofia e Scienze
dell'Educazione

marco.giovanelli@unito.it

