

Carlos Manuel Sánchez Tasayco

Causalidade e Incerteza na natureza: Do
determinismo à incerteza segundo
Heisenberg

Cuiabá - MT, Brasil

19 de outubro de 2023



Carlos Manuel Sánchez Tasayco

**Causalidade e Incerteza na natureza:
Do determinismo à incerteza segundo
Heisenberg**

Trabalho de Conclusão de Curso

Monografia apresentada para obtenção do grau de Bacharel em
Filosofia pela Universidade Federal de Mato Grosso.

Orientador(a): Prof. Dr. Walter Gomide do Nascimento Junior

Cuiabá - MT, Brasil

19 de outubro de 2023



Carlos Manuel Sánchez Tasayco

**Causalidade e Incerteza na natureza: Do
determinismo à incerteza segundo
Heisenberg**

Trabalho de conclusão de curso sob o título “*Causalidade e Incerteza na natureza: Do determinismo à incerteza segundo Heisenberg*”, defendida por Carlos Manuel Sánchez Tasayco e aprovada em 19 de outubro de 2023, na cidade de Cuiabá, no Estado do Mato Grosso, pela banca examinadora constituída pelos professores:

Prof. Dr. Walter Gomide do Nascimento Junior
Departamento de Filosofia – UFMT

Prof. Dr. Alécio Donizete da Silva
Departamento de Filosofia – UFMT

Cuiabá, 19 de outubro de 2023

Resumo

O intuito desta monografia será analisar a interpretação conceitual do físico Werner Karl Heisenberg, sobre o problema da objetividade dos fenômenos quânticos, ou seja, em torno do problema metafísico na filosofia grega, de investigar os menores constituintes da natureza. Para Heisenberg, a ontologia da ciência moderna, fundamentada no materialismo e no determinismo, não é totalmente mais válida na nova física atômica. Consequentemente se torna necessário construir uma nova base ontológica, onde o antirrealismo, apoiado em um formalismo puro, surge como um princípio essencial de uma nova filosofia natural. Este trabalho visa investigar a ontologia antirrealista, a abordagem da tradição filosófica e da história da ciência de Heisenberg dentro da teoria quântica.

Palavras-chave: Natureza; Quântica; Ontologia; Materialismo; Antirrealismo

Abstract

The purpose of this monograph will be to analyze the conceptual interpretation of physicist Werner Karl Heisenberg, on the problem of objectivity of two quantum phenomena, or to investigate the minor constituents of nature around the metaphysical problem in Greek philosophy. For Heisenberg, the ontology of modern science, based on non-materialism and non-determinism, is not entirely more valid in the new atomic physics. Consequently, it becomes necessary to construct a new ontological basis, where antirealism, supported by a pure formalism, emerges as an essential principle of a new natural philosophy. This work aims to investigate antirealist ontology, an approach to Heisenberg's philosophical tradition and history of science within quantum theory.

Keywords: Nature; Quantum; Ontology; Materialism; Antirealism

Agradecimentos

Sou muito grato ao meu filho Miguel, quem tem sido o motivo principal para me superar cada dia mais como pessoa e como pai.

Gratidão à minha esposa Ariane pelo apoio e incentivo de concluir o curso e por ter sido a pessoa que dia a dia me ajudou a fortalecer a família que construímos juntos.

Gratidão aos meus pais e toda minha família de quem sou agradecido pela educação recebida por eles.

Agradeço ao professor Dr. Walter Gomide por aceitar orientar este trabalho, pela sua leitura, pelo acompanhamento e pela confiança depositada em mim.

Agradeço a todos os professores do curso de bacharelado e licenciatura do Departamento de Filosofia da Universidade Federal de Mato Grosso.

Sumário

Lista de Figuras

1	Introdução	p. 9
2	Filosofia na Física	p. 11
2.1	Heisenberg e a filosofia	p. 12
3	O Determinismo e a Física Clássica	p. 16
3.1	O determinismo na natureza	p. 16
3.2	Postulados deterministas na física clássica	p. 18
4	O Indeterminismo na física quântica	p. 19
4.1	A queda do determinismo clássico	p. 19
4.2	Evidência Experimental na nova física	p. 21
4.3	Interpretações filosóficas da física quântica	p. 24
5	Desenvolvimento das ideias filosóficas na Física Quântica	p. 27
5.1	Pensamento do Heisenberg e a física quântica	p. 27
5.2	Relações da Incerteza	p. 28
5.3	Interpretação filosófica das relações de Incerteza	p. 30
5.3.1	Problema do Subjetivismo	p. 30
5.3.2	A ontologia dos fenômenos quânticos	p. 31
5.3.3	Problema da Linguagem	p. 32
6	Conclusões	p. 33

Lista de Figuras

- 1 Quinta conferência - 1927: Elétrons e fótons - Muitos chamados de Físicos Filósofos. Da direita para esquerda, terceiro em pé: Werner Heisenberg - Imagem de Domínio Público p. 12
- 2 A lei de Planck descreve com precisão a radiação do corpo negro. Aqui é mostrada uma família de curvas para diferentes temperaturas. A curva clássica (preta) diverge da intensidade observada em altas frequências (comprimentos de onda curtos). p. 20
- 3 Imagem da trajetória de um pósitron em uma câmara de Wilson registrada por Carl David Anderson em 1932. p. 21

1 Introdução

Na segunda metade da década de 1920 a física clássica começou a sofrer grandes transformações que culminariam na formulação da teoria quântica. Werner Karl Heisenberg (1927), objeto central deste trabalho, apresentou seu trabalho intitulado *Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik*, cuja tradução ao português seria: “Sobre o conteúdo descritivo da cinemática e mecânica quântica”. Durante esse intervalo de tempo, muitas versões sobre a teoria quântica foram surgindo aumentando a discussão sobre o conceito e significado destes novos fenômenos não clássicos na física. A aceitação dessa nova formulação foi imediata, mas sua natureza física ainda era discrepante com a formulação clássica da época. O novo formalismo surge através de uma forma preditiva de justificar sua natureza, embora sem ponto de vista ontológico notável. É por isso que ao longo do desenvolvimento da nova teoria se tenta argumentar a nova formulação, pois fica evidente a quebra da perspectiva clássica que na época existia. Um surgimento de uma crise na ciência fica evidenciada e Heisenberg evidencia essa crise quando formula o princípio de incerteza, no qual demonstra a impossibilidade de determinar com exatidão, ao mesmo tempo, a posição e a velocidade de uma partícula atômica. Para Heisenberg, a concepção da teoria quântica não poderia estar sustentada apenas por noções intuitivas de tempo e espaço, de causa e efeito, apesar de que todos os conceitos estejam ligados a noções intuitivas, Capra (1995).

A ideia de regras ligadas ao fenômeno visível era quebrada desse novo ponto de vista (quântico) e Heisenberg apoiou a ideia da introdução de elementos ontológicos na formulação. Heisenberg, defensor da filosofia pré-socrática como sendo o começo do pensamento científico ocidental, buscou integrar a filosofia antiga com a física contemporânea ao compreender que os resultados da teoria quântica não poderiam ser enunciados sem quebrantar os princípios da mecânica newtoniana. Até então, a experiência imediata sempre foi resultado da lógica clássica aprendida através de estruturas ontológicas básicas no mundo clássico. E Heisenberg defende a profunda relação entre ontologia e lógica. Na teo-

ria clássica, o mundo a qual essa teoria se refere é um mundo macroscópico, de experiência imediata. Na teoria quântica, na visão de Heisenberg, a incompatibilidade com a ontologia materialista está presente, a lógica clássica não é mais aceita nessa nova formulação e resta estabelecer uma nova ontologia, elaborando uma nova lógica. Se bem que existam interpretações distintas com relação à natureza do princípio de incerteza, fica evidenciado para Heisenberg que o homem não conhece a realidade que mede, incapacidade não apenas restrita a medir uma determinada grandeza física e sim verificar o que realmente isso representa. Conforme com Heisenberg, aquilo que é possível conhecer refere-se única e exclusivamente a um momento específico. Saber restrito a um conhecimento parcial de um momento passado, Horstmann (2017).

2 Filosofia na Física

Ao contrário do que se apresenta sobre a irrelevância da filosofia para a física, a filosofia sempre teve, e deve manter, muito mais influência na física do que comumente se assume. O entrelaçamento entre a física e a filosofia, tanto do ponto de vista epistemológico como do ponto de vista histórico, tem sido reforçado no último século sobretudo com o avanço da física teórica como um dos mais novos desenvolvimentos da ciência natural. E as questões sobre esse entrelaçamento existem. Como a física e a filosofia se relacionam? Até que certo ponto a filosofia é útil para um físico desenvolver sua pesquisa, investigar suas descobertas e fundamentar suas teorias? É necessário começar a entender as posições contrárias existentes entre os físicos com relação à filosofia e à ciência: os defensores da não relevância da filosofia na física e os que defendem a importância mútua que a física e a filosofia exercem entre si.

Fundamentar uma nova teoria implica começar a se questionar sobre um novo fenômeno e eis aí que os físicos acabam filosofando na hora de encarar os problemas que a própria natureza esconde. Dentre os defensores do isolamento da física encontram-se Richard Feynman, Steven Weinberg e Stephan Hawking, embora acabem exercendo suas questões de forma filosófica através da forma como encaram certos problemas teóricos. Weinberg argumenta o prejudicial que pode se tornar a filosofia para a física [...] *muitas vezes é uma camisa de força que os físicos têm de se libertar* [...] Weinberg (1994). Hawking em uma conferência argumentou [...] *”Muitos de nós não nos preocupamos mais com essas perguntas, entretanto, questões como ‘de onde viemos?’ ou ‘para onde vamos’, que eram tradicionalmente questões filosóficas [...] Os filósofos atuais não têm treinado de acordo com as descobertas mais recentes da física, e por isso, a filosofia está morta hoje.”*[...] Zeitgeist... (210)

Do lado a favor da importância mútua entre física e filosofia, pode-se mencionar os físicos Thomas Kuhn, Albert Einstein, Werner Heisenberg, Carlo Rovelli. Para Rovelli ambos devem colaborar ativamente aprofundando a pesquisa e o diálogo sobre a melhor forma

de promover a ciência em defesa da integridade da física. Em “*Física e Realidade*” do Albert Einstein (1999), defende que o físico deve ser filósofo, sobretudo em momentos de crise, quando o que está em jogo são os fundamentos da física. No mesmo caminho Thomas Kuhn (1996) tem uma posição semelhante resumida em sua obra “*A Estrutura das Revoluções Científicas*”. E Sobre a posição de Werner Heisenberg? Para Heisenberg a filosofia não apenas é o fundamento teórico da *práxis* científica, senão que o caráter do empreendimento científico remete necessariamente ao conceito de investigação filosófica. Assim, quando se tenta saber “Por que não podemos conhecer o momentum e a posição de uma partícula atômica, em um mesmo instante?” é porque queremos chegar ao entendimento de questões científicas, mas além disso, de tentar entender o mundo, compreender a natureza acreditando que o mundo possui uma ordem, uma explicação.

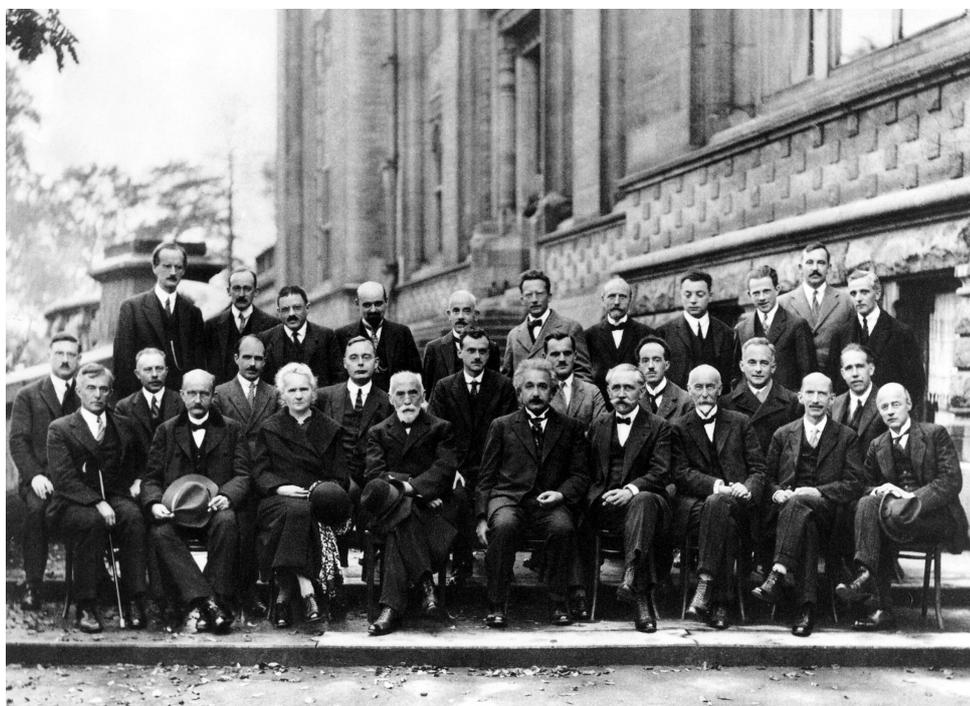


Figura 1: Quinta conferência - 1927: Elétrons e fótons - Muitos chamados de Físicos Filósofos. Da direita para esquerda, terceiro em pé: Werner Heisenberg - Imagem de Domínio Público

2.1 Heisenberg e a filosofia

Na ideia de Heisenberg, física e filosofia formam uma unidade coerente e complementar. As bases teóricas que sustentaram a ciência moderna ao longo da história científica, foram fundamentos filosóficos concebidos pelos antigos gregos, mencionamos o materialismo de Leucipo e Demócrito de um lado, e as crenças nas bases matemáticas do outro.

Heisenberg (1953) diz: A física nuclear a mais nova área em desenvolvimento da ciência teve começo na idealização da estrutura atômica da matéria sugerida 2500 anos atrás pelos antigos filósofos gregos. Compreender a nova teoria atômica moderna implica estudar a história do conceito de um átomo. A concepção atomista do ponto de vista filosófico se conserva atuante na visão de Heisenberg, o qual afirma que o átomo seria a manifestação de uma lei da natureza, de uma estrutura matematizada como formalizado por Pitágoras e Platão, citamos:

Existem, especificamente duas ideias da antiga filosofia grega que na atualidade ainda determinam o curso da ciência as quais são: a convicção de que a matéria consiste de pequenas unidades indivisíveis, os átomos, e a crença na força das estruturas matemáticas Heisenberg (1952)

O uso do termo "determinante" na citação acima torna-se importante e frequente ao longo do desenvolvimento da nova ciência. De acordo com Heisenberg, ideias filosóficas determinaram o modo e os objetos da física, desde seu surgimento, seu desenvolvimento e o fazem até os dias de hoje. Ele considerou a relação entre física e filosofia como fundamentalmente importante para o aprofundamento da compreensão da ação da natureza quanto do desenvolvimento da atividade científica.

Além dos dois fundamentos filosóficos da ciência mencionados anteriormente, Heisenberg defende a concepção acerca da importância da filosofia Kantiana para fundamentar o desenvolvimento da ciência natural. Heisenberg percebe a razão das investigações kantianas como base fundamental para a fundamentação da ciência moderna, fundamentado no conceito kantiano de "coisa em si". Existem duas formas para o entendimento da atividade científica, uma seria percebendo que a ciência descreve a natureza, expondo as estruturas da "coisa em si", uma espécie de discurso explicativo da ciência acerca da natureza. A outra forma seria aceitando que a ciência descreve como o homem entende o mundo. Consequentemente, a ciência é uma narrativa sobre a relação entre a natureza e o entendimento. Essa passagem da primeira para a segunda forma de compreensão da atividade científica caracterizaria a física teórica moderna, como explica Heisenberg:

O físico atômico teve por isso que resignar-se a considerar a sua ciência apenas como um elo da cadeia infinita dos contatos do homem com a natureza e que aceitar que esta sua ciência não pode falar simplesmente da natureza "em si" Heisenberg (1981)

Para Heisenberg as conquistas de Newton e todos os cientistas sucessores são reflexos da obra em que matemáticos e filósofos da Grécia antiga trabalharam. O desenvolvimento da ciência é um todo único e ela deriva e representa uma continuação da filosofia. Embora

muitos cientistas argumentam que a relação entre filosofia e ciência é meramente histórica e que a ciência moderna surge como superação da filosofia natural, Heisenberg, contudo, se opõe a essa ideia, defende a origem da ciência na filosofia grega e ainda argumenta que a relação entre filosofia e ciência é uma relação epistêmica.

A análise da filosofia da física de Heisenberg pode ser sintetizada no argumento por ele defendido que “Toda ciência precisa ser desenvolvida com fundamentos filosóficos preliminares, interpretações filosóficas atuais e implicações filosóficas futuras”. Os fundamentos filosóficos na ciência podem ser compreendidos de duas maneiras: (a) ou a ciência é a priori filosófica, pois todo seu entendimento é validado ao pressupor uma determinada tradição filosófica, por exemplo na física, Heisenberg se baseia no atomismo grego, no formalismo matemático de Pitágoras e do Timeu e na filosofia da ciência de Kant ou (b) porque a práxis científica é em geral uma “procurar pelo saber”, logo, uma “atitude filosófica”. Nas interpretações filosóficas atuais se envolvem os esforços em paralelo a todo desenvolvimento técnico de um novo conhecimento, para enquadrar esse novo conhecimento em um todo mais amplo, analisar o tipo de conceitos empregados neste novo conhecimento, interpretar rigidamente os procedimentos que concernem tal investigação, algo que levará esforço na análise da validade lógicas das preposições preliminares que sustentem tal investigação, assim como dos enunciados impostos por esta, analisar as inconsistências na definição dos conceitos empregados por esse novo conhecimento, analisar a compatibilidade entre os enunciados deste sistema e a tradição epistêmica na qual o sistema se inclui, isso as vezes implica em acomodar os enunciados à tradição, inclusive modificar a tradição para encaixá-la aos enunciados, algo que aconteceu no desenvolvimento da mecânica quântica, motivo deste trabalho. Neste caso Heisenberg foi forçado a abandonar as perspectivas milenares do materialismo reflexionando no significado dos conceitos como espaço, tempo e matéria nessa nova física. Finalmente as implicações filosóficas futuras são comuns em todo campo de investigação. Heisenberg toma em conta as análises sobre os aspectos e problemas epistemológicos e ontológicos levantados pela ciência dessa época assim como as reflexões sobre os problemas éticos e sociais levantados pela ciência.

Sintetizando a posição de Heisenberg frente à filosofia e ciência através da uma frase, ela poderia ser resumida da seguinte forma: “Convicções científicas são determinadas por ideais filosóficos”. Heisenberg defende firmemente que o curso da ciência atual é determinado pelas ideias filosóficas pré-socráticas da convicção pitagórica-platônica no formalismo matemático como forma de compreensão da natureza e a compreensão atomista de que as estruturas físicas são compostas por partículas elementares. Ele descarta totalmente a

ideia de que a ciência atual nasceu quando a investigação da natureza se apartou da filosofia. Heisenberg defende que a ciência moderna é um desdobramento da filosofia, é um modo de filosofar reunindo em um todo elementos já presentes entre os antigos filósofos. Heisenberg ao desenvolver a ciência moderna ele não se separa da filosofia, mas cria uma nova fase de filosofar.

3 O Determinismo e a Física Clássica

3.1 O determinismo na natureza

Já desde Aristóteles, existiam escolas e autores capazes de fundamentar determinismos do tipo ontológico, envolvidos com indeterminismos lógicos ou gnosiológicos, algo em que a maioria dos grandes filósofos tomaram postura ao respeito ao longo de toda a história da filosofia.

O ponto de partida será fundamentar o termo determinismo, o qual pode ser definido a partir do postulado que diz: “*efeito se segue sempre de uma determinada causa*”. Durante o Renascimento do século XVI o interesse pelo mundo físico teve um crescente interesse, abrindo passo a um novo tipo de procura para conhecê-lo, compreendê-lo e dominá-lo. Mas é apenas no começo do século XVII que a ideia do determinismo físico começou a se impor, não apenas restrito a um determinismo científico, senão também filosófico. É com Francis Bacon, Galileu Galilei e René Descartes que um novo espírito científico moderno surge, sintetizado na importância da experiência e a teoria, no reconhecimento no surgimento matemático e o começo da autonomia da ciência com relação à filosofia e à fé. Bacon com seu *Novum Organum*, impôs a necessidade da observação e do método indutivo para adentrar no conhecimento da natureza. Descartes através de “*Discours de la Methode*” propõe um modelo quase matemático nos descobrimentos e na construção da ciência. Mas foi Galileu com sua extensa obra quem conseguiu fundir observação e experiência com a razão e a matemática, experiências sensíveis e demonstrações necessárias. Foi apenas ele quem alcançou o novo método da ciência moderna.

Tanto para Galileu, como para Descartes e Bacon, a atividade natural das causas deve ser explicada sem nenhuma forma de antropomorfismo, empregando uma força que sempre satisfaz seu cometido, força que é para causa eficiente. Segundo Galilei (1685) “*a toda causa deve ser prescrito um efeito real, mas se removida o efeito acaba*”. Estes fenômenos são regidos por uma regra constante de necessidade racional, fundamentada

em uma conceição mecânica da matéria.

Assim chegamos ao sistema da natureza de Isaac Newton. Em suas *Principia* expõe um conjunto de axiomas que interligados entre si, fortalecem um sistema fechado que permite explicar as leis da natureza. Uma vez representado cada conceito e suas relações na linguagem matemática, torna-se simples atingir o conhecimento dos sistemas e forças que agem sobre ele, e assim predizer eventos futuros. Todo o futuro, tudo aquilo sem participação da mão do homem, seria de conhecimento certo para os cientistas, sempre e quando se pudesse ter um conhecimento completo e total do sistema mencionado. Sustentado nessa premissa, todo fenômeno que foi se descobrindo foram descritos em termos da mecânica Newtoniana, a qual era capaz de explica-lo.

Evidenciado pelas novas descobertas e grandes logros, Laplace (1812) chegou a fundamentar que: “*os eventos atuais possuem uma conexão com seus precedentes, fundamentado no principio evidente que uma coisa não pode começar a ser sem uma causa que a produza*”. Assim deveríamos considerar o presente estado do universo como o efeito do seu estado anterior, e como a causa daquele que lhe sucede. Se fosse possível, em um instante dado, conhecer todas as forças que animam a natureza e os estados de todos os objetos que os compõem, e submeter todos esses dados a análise, com certeza poder-se-ia condensar dentro de uma formula universal os movimentos tanto dos corpos macroscópicos como dos corpos microscópicos: nada poderia ser incerto, e o futuro assim como o passado, estaria frente aos nossos olhos.

Com relação ao termo *determinismo*, relativamente começou a ser usado nos últimos séculos. Encontra-se em certos textos de filósofos alemães do século XIX, para representar uma ideia que já está presente, de fato, sobre outras denominações, mencionamos por exemplo os termos *predeterminado* ou *predeterminismo* (*praedeterminismus*) e particularmente em Leibniz (1666) (determinação e razão determinante, *praedelineatio*). A doutrina da necessidade de Leibniz sobre a superposição das causas e dos efeitos coloca-se sob o atributo da razão suficiente (que força as coisas serem tais quais são e não de outro modo), e é verdade que esta última subordina à maior parte das concepções que reivindicam, com ou sem uma terminologia precisa, o determinismo. A razão suficiente subordina, em todo caso, à declaração de Laplace que seria depois utilizada para ilustrar o sentido mais preciso retido pelo determinismo, aquele denominado “determinismo laplaciano”, embora Laplace, no texto que se tornou célebre, não emprega a palavra “determinismo”. Talvez também o uso da expressão “*determinismo laplaciano*” se expandiu, sobretudo, no curso do século XX por antítese, para atribuir aquilo a que a física quântica opunha fortes objeções, como será discutido durante este trabalho.

3.2 Postulados deterministas na física clássica

No começo do século XIX, o determinismo encontrava-se imerso no âmbito científico e já tinha se tornado um princípio fundamental, absoluto e indiscutível de toda a ciência empírica. Sem determinismo não pode haver ciência, dizia Globot, enunciado que se tornou a identificação dos cientistas de diversas áreas científicas da época. O determinismo da física clássica foi fundamentado em postulados reduzidos as seguintes ideias fundamentais:

- **Postulado da objetividade:** A realidade física e os fenômenos do mundo material são independentes da atividade do observador e dos meios de observação empregados. Objetivar uma perfeita adequação entre a imagem subjetiva do observador e a realidade objetiva do mundo. Selvaggi (1964)
- **Postulado da racionalidade:** Se concebe o causal como racional, a causa é a razão do efeito, e assim pode ser conhecida pela menta humana. Se identifica a ligação dos fenômenos com a sequência lógica entre o que antecede e o que procede. Partindo desse racionalismo fica identificado completamente o princípio de causalidade como o mais rígido determinismo. Heisenberg (1981)
- **Postulado da matematicidade:** As relações causais, são reduzidas a expressões matemáticas quantitativas, com variáveis relacionadas entre si. Selvaggi (1964)

Assim, esses postulados, conduziram à física clássica a um maior e mais rígido determinismo causal, enquanto a estrutura mesmo do universo foi reduzida a uma representação geométrica, onde reinou a invariabilidade das leis, a constância e a necessidade. A noção de uma natureza determinista tinha ganhado aprecio, pois foi a partir dela que a ciência toda progredia aparentemente de forma indefinida até atingir um sistema definitivo que explicaria tudo.

4 O Indeterminismo na física quântica

4.1 A queda do determinismo clássico

O começo da queda do determinismo clássico não se deu por argumentos filosóficos de algum tipo, e sim provocado pelo próprio seno da ciência clássica. A origem se deu quando a ciência começou a considerar soluções do tipo estatístico e probabilísticos para alguns problemas. Cálculos estatísticos começaram a ter utilidade na hidrodinâmica de Daniel Bernoulli (1738) na mecânica do calor, que logo se converteria em um precursor da teoria cinéticas dos gases de Gauss, quem a finais do século XVIII, desenvolveria a primeira aplicação concreta e matemática dos métodos estatísticos e probabilísticos. Porém, estes físicos, aos que podemos acrescentar outros grandes como Laplace (1812) e Lagrange (1759), consideravam estes métodos como uteis ferramentas que serviriam para descrever de forma mais sutil o comportamento determinista de um conjunto de partículas a menor escala. Resolvia-se o problema propondo que a determinação do estudo macroscópico de um sistema, descritos com simples variáveis, tais como volume, pressão e temperatura, lhe correspondia uma infinita variedade de estados microscópicos possíveis e prováveis, determinados pelas leis estatísticas da termodinâmica por exemplo, uma das primeiras leis estatísticas que tomariam o lugar de uma lei natural.

Esta Insistência no determinismo clássico permaneceu na mente dos cientistas até a descoberta, em 1900, dos *quanta* (plural de *quantum* – do latim: quantidade) de ação, realizada pelo físico teórico alemão *Max Planck*, quando investigava os problemas da irradiação de calor emitida pelo “corpo negro” a diversas temperaturas. Depois de outros físicos tais como *Wien*, *Rayleigh*, *Jeans*, entre outros terem encontrado explicações parciais, Planck (1900) encontrou uma fórmula geral para todos os casos, quaisquer que fossem os comprimentos de onda da radiação e as temperaturas. Para inferir esta nova fórmula, Planck teve de admitir uma nova hipótese que ia além da física clássica: a hipótese quântica.

Ele propôs que havia um elemento de descontinuidade na radiação de calor, que o corpo poderia emitir ou absorver a energia como um oscilador ou ressonador, respectivamente. Esta não é emitida pelo átomo continuamente, mas de forma descontínua, como que por pacotes. Planck chamou esses pacotes de quantum elementar de ação e considerou que a energia emitida era composta de grânulos mínimos indivisíveis, chamados quanta de energia. Esta concepção descontínua da radiação leva a admitir a hipótese de que a emissão é um fenômeno estatístico. [Heisenberg (1981)].

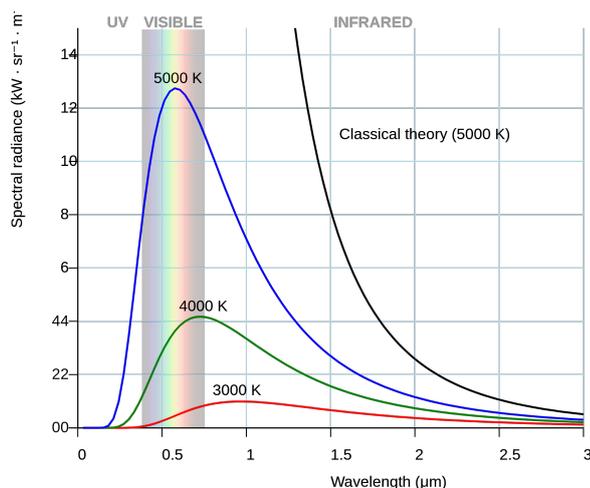


Figura 2: A lei de Planck descreve com precisão a radiação do corpo negro. Aqui é mostrada uma família de curvas para diferentes temperaturas. A curva clássica (preta) diverge da intensidade observada em altas frequências (comprimentos de onda curtos).

Os escritos do próprio Planck e do Heisenberg nos darão uma imagem da importância da descoberta dos quanta de ação: “Tentei imediatamente colocar o quantum de ação elementar h de alguma forma dentro do esquema da teoria clássica. Mas em cada uma destas tentativas, esta constante revelou-se irreduzível (...) O fracasso de cada uma das tentativas de ultrapassar este obstáculo tornou rapidamente evidente que o quantum elementar de ação desempenhou um papel fundamental na física atômica, e que a sua introdução abriria uma nova era na ciência.” Planck (1968)

A princípio foram encontradas poucas aplicações para a nova descoberta, e sua importância foi gradualmente reconhecida. Einstein (1905), utilizou-a para interpretar o efeito fotoelétrico, propondo o quantum de luz como pacotes granulares de luz, estendendo assim a quantização a todos os processos de radiação. Outro uso do quantum de ação foi o de Bohr (1913) ao explicar a estrutura interna do átomo planetário de Rutherford. Aos poucos, o novo conceito da física moderna começou a ser aceito. No entanto, muitas coisas permaneceram sem explicação. E foram geradas muitas contradições, que

a princípio foram deixadas de lado, mas com o passar do tempo tornaram-se mais agudas e exigiram uma abordagem mais concreta. Dentre esses problemas mais sérios citamos 1) o da dualidade onda-partícula aplicada principalmente à luz, introduzida por Einstein ao explicar o efeito fotoelétrico - e mais tarde a todo o espectro de partículas subatômicas - e 2) o das órbitas dos elétrons dentro o átomo e sua trajetória em uma câmara de nuvens, e assim por diante. O que mais chamará a atenção dos físicos da época foi o das órbitas dos elétrons. Devido a este problema, Heisenberg propôs, em 1927, a sua interpretação da mecânica quântica, uma interpretação que deixou de lado o conceito de órbitas electrónicas, para introduzir relações de incerteza na física moderna.

4.2 Evidência Experimental na nova física

Uma breve descrição de dois dos experimentos mais característicos da nova física torna-se necessário para aprofundar o evidente indeterminismo. O primeiro será a câmara de nuvens e o segundo o experimento de dupla fenda.

A câmara de nuvens consiste em um método eficiente de identificação de partículas subatômicas inventado por Charles Thomson Rees Wilson na Universidade de Cambridge em 1897. É uma câmara com interior saturado de vapor d'água. Se o interior da câmara for bombardeado com partículas provenientes de um feixe de raios X ou de uma fonte de raios gama, estas ionizam o gás presente na câmara. Os íons gasosos funcionam como núcleos de condensação de vapor, portanto percebe-se a condensação e verifica-se a existência de partículas. A câmara de nuvens é capaz de produzir vestígios visíveis de quaisquer partículas ionizadas que passem pela área sensível da câmara.

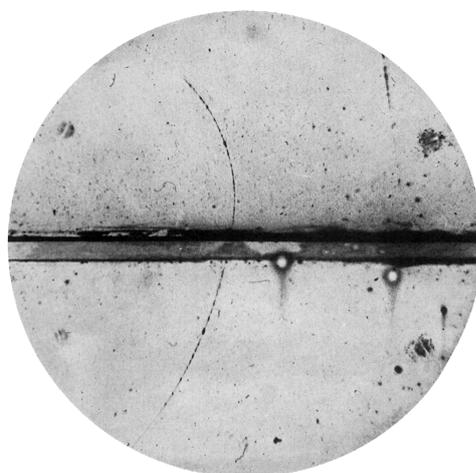


Figura 3: Imagem da trajetória de um pósitron em uma câmara de Wilson registrada por Carl David Anderson em 1932.

Estas partículas em movimento rápido produzem rastros brancos visíveis ou “nuvens” na câmara. Partículas neutras, sejam raios gama, raios X ou nêutrons, por exemplo, não produzem traços diretamente. Se uma partícula neutra transfere energia para uma partícula carregada, como um elétron ou um próton, podemos ver o rastro, ou ‘nuvem’, da segunda partícula.

O experimento de dupla fenda é muito simples e contém tudo o que há para saber sobre a mecânica quântica. Consiste em uma fonte de partículas (geralmente elétrons), uma tela detetora e uma barreira entre a fonte de partículas e a tela com duas fendas paralelas. Supondo que uma partícula de cada vez seja emitida pela fonte, começar com uma única fenda aberta resulta em um padrão aleatório de pontos na tela atrás da barreira com a fenda. A intensidade do padrão (a maior intensidade dos pontos na tela do detetor) será mais alta em uma linha central próxima ao plano que conecta a fonte de partículas à fenda, como esperado, e diminuirá uniformemente em ambos os lados desta linha central. Este padrão se repete se a outra fenda for aberta fechando a primeira. Até este momento nada de extraordinário acontece. O resultado obtido na tela é o que é seria esperado se as partículas fossem lançadas aleatoriamente em uma tela através de uma fenda. Agora, se o experimento for recriado com as duas fendas abertas, ao invés de encontrar um segundo padrão próximo ao primeiro (como seria de se esperar), algo completamente diferente acontece. Os pontos ainda serão vistos chegando na tela, um por vez, como se fossem partículas viajando no ar, em direção à tela. Porém, neste caso, elas formarão um padrão de diversas linhas paralelas, estendendo-se em regiões da tela que deveriam estar vazias. Este padrão é na verdade muito conhecido e estudado: é um padrão de interferência produzido pela interferência de ondas. Os pontos aparecem na tela, um de cada vez, em locais diferentes (localizados). E cada vez que uma partícula atinge a tela ela pode ser identificada com uma emissão individual de uma partícula da fonte. Contudo, o comportamento da partícula entre a fonte e a tela, incluindo o seu encontro com as duas fendas da barreira, é o de uma onda.

Para dar uma explicação plausível para este resultado inesperado, a teoria quântica afirma que a partícula, ao passar pela barreira com as duas fendas, interfere consigo mesma (porque se assumiu que as partículas são emitidas uma de cada vez), produzindo o padrão de interferência. A conclusão contraintuitiva é que, para interferir consigo mesma, a partícula deve passar pelas duas fendas ao mesmo tempo, no que é conhecido como superposição de estados. Há, no entanto, um resultado ainda mais surpreendente desta experiência,

ao introduzir um dispositivo de medição antes da barreira para observar por qual fenda a partícula passa. O que resulta na tela é um padrão de duas linhas, cada uma delas mais intensa no centro, afinando em ambos os lados. Ou seja, não se observa mais um padrão de interferência, mas sim o que era inicialmente esperado ao abrir as duas fendas. O padrão observado na tela depende se o comportamento da partícula através da barreira é observado ou não. O estado quântico do sistema (cada partícula emitida) deve ser considerado como a soma de todos os estados possíveis que o sistema pode ocupar. É a isso que se refere o princípio da superposição de sistemas. Este princípio não se aplica na mecânica clássica, pois na mecânica clássica é absurdo dizer que um elétron tem, por exemplo, duas orientações diferentes do seu momento magnético ao mesmo tempo ou duas posições ao mesmo tempo. Antes de medir um sistema quântico, entretanto, o estado do sistema não pode ser especificado. Após a medição, por outro lado, é obtido um único resultado do estado do sistema.

Detalhando mais os conceitos da mecânica quântica, a evolução temporal do sistema (por exemplo a trajetória do elétron) é descrita pela equação de Schrödinger (1926). Esta descrição é o que fornece a estrutura para a maioria das discussões em física quântica. A equação de Schrödinger, que inclui a função de onda que fornece a descrição do estado do sistema, é fundamental para entender como tal sistema evolui no tempo, permitindo que o presente do sistema seja utilizado para atribuir probabilidades a experimentos futuros. Hughes (1992)

$$\hat{H}|\Psi(t)\rangle = i\hbar\frac{\partial}{\partial t}|\Psi(t)\rangle \quad (4.1)$$

A forma canônica da equação 5.1 é uma equação diferencial parcial linear que descreve como o estado quântico de um sistema físico muda com o tempo, onde $|\Psi(t)\rangle$ representa o estado do sistema como um vetor em função do tempo, \hbar é a constante de Planck e \hat{H} é o operador Hamiltoniano. A função de onda será a soma dos estados possíveis do sistema, que são chamados de autoestados.

Das consequências que decorrem imediatamente da forma geral da equação de Schrödinger, uma das mais importantes é que apesar de ser de natureza probabilística, é uma equação determinística, no sentido de que a evolução do sistema ao longo do tempo é completamente fixa uma vez que o sistema é conhecido em algum momento da sua evolução. A falta de determinismo (ou previsibilidade) não é encontrada na evolução temporal do estado quântico, conforme a equação de Schrödinger estabelece. Esta falta de determinismo

aparece apenas na aplicação do processo de medição. Na mecânica quântica, mesmo em medições ideais e especificações precisas do estado do sistema, valores extremos de probabilidade (1 ou 0) não podem ser obtidos. Em vez disso, os valores de probabilidade estão dentro do intervalo $[0, 1]$. Qualquer medição correspondente a uma qualidade “mensurável” do sistema quântico – uma qualidade “observável” – resultará no “salto” do sistema para um estado próprio. Para qual estado próprio ele irá saltar? De acordo com a interpretação ortodoxa da mecânica quântica, trata-se de um processo puramente aleatório, embora isto será discutido na seção seguinte. Contudo, como mencionado, existem regras precisas para calcular probabilidades. O salto do estado quântico para um dos estados próprios é o processo denominado “redução ou colapso da função de onda”. A maior dificuldade que os físicos quânticos enfrentam é o conflito entre esses dois processos. A primeira é uma evolução temporal clara e que não causou muitas dificuldades. Porém, o segundo era algo totalmente novo, uma vez que a mecânica clássica se baseia no fato de que todos os estados do sistema sempre podem ser medidos e conhecidos com precisão, algo que não pode ser alcançado de acordo com as leis quânticas. A maior precisão que será alcançada é a expressa pelo princípio da incerteza de Heisenberg, que o tema deste trabalho e será detalhado no último capítulo.

4.3 Interpretações filosóficas da física quântica

Para compreender as diretrizes básicas da física quântica, as interpretações filosóficas tentarão explicar o que acontece sob o arcabouço teórico matemático que a física quântica apresenta, para representar uma imagem do mundo quântico real. Sabe-se que durante o último século a física quântica foi objeto de intensos debates e assim inúmeras interpretações foram propostas. Apenas alguns, os mais importantes epistemologicamente e ontologicamente, podemos listar linhas abaixo.

- **A interpretação de Copenhague**, formulada quase inteiramente por Bohr (1927) e Heisenberg (1927), é fundamentada em três princípios diferentes: 1) o estado físico do sistema é capturado inteiramente pela função de onda. 2) A função de onda quase sempre evolui de acordo com a equação de Schrödinger, mas nem sempre: às vezes entra em colapso. 3) A dinâmica completa é bastante probabilística: sistemas isolados que começam em estados idênticos podem resultar em estados diferentes. Esta característica probabilística aparece no colapso da função de onda. Assim, a interpretação de Copenhague afirma que a probabilidade prevista pela mecânica quântica é irreduzível no sentido de que não reflete exclusivamente o nosso

conhecimento limitado do sistema. Esta interpretação sustenta que o resultado de uma medição é fundamentalmente indeterminístico. A impossibilidade de prever o resultado de uma medição reflete um indeterminismo causal fundamentalmente ontológico no nível quântico. Isso é visto quando o sistema salta aleatoriamente para uma das probabilidades (ou autoestados) do sistema dada pela função de onda.

- **A interpretação de Bohm**, às vezes chamada de interpretação de Broglie-Bohm postula uma ontologia muito clara. Partículas de Bohm são partículas semelhantes às da mecânica clássica: elas sempre têm uma posição e trajetória definida, associada a uma onda sem a qual a partícula nunca é encontrada. Esta onda é uma oscilação em um novo campo, que é representado matematicamente pelo $|\Psi(t)\rangle$ da equação de Schrödinger. Nesta interpretação, a função de onda 'guia' o movimento da partícula, e evolui deterministicamente de acordo com a equação Schrodinger. Bohm (1984). Assim, existem dois níveis de realidade, um que é mais firme do que o outro. A partícula é a mais firme, enquanto a onda é de segundo nível, embora ainda seja real. Este nível mais fraco de realidade exerce um tipo de força sobre a partícula, e a partícula exerce uma influência recíproca sobre o campo $|\Psi(t)\rangle$, que é pequeno o suficiente para não ser tomado em conta. A força que o campo exerce sobre a partícula é tal que produz uma tendência que move a partícula de uma posição para outra.
- **A interpretação das variáveis ocultas**, defendida principalmente por Einstein (1935), afirma que a física quântica está correta na medida em que é compreendida, mas que é incompleta: existem fatores causais que a física quântica não inclui, e esses fatores são responsáveis pelo seu indeterminismo. Esta interpretação postula que ao lado ou abaixo das grandezas mensuráveis que a teoria mede (posição, momento, rotação, etc.) existem mais grandezas inacessíveis às medições, e que seus valores determinam os valores dos resultados obtidos medindo as grandezas mensuráveis. Nesse sentido, esses fatores ocultos fazem com que o sistema se comporte de forma determinística, embora com aparência indeterminística, devido à sua natureza oculta.

Dentro dessas interpretações, a escolha da melhor entre elas, depende de alguns critérios que nos ajudem a decidir por a mais razoável. William Stoeger, astrofísico da Universidade do Arizona, defende um critério epistemológico razoável baseado nas seguintes considerações: 1) devemos deixar o mundo quântico falar em vez de nos apropriarmos de

características que ele parece não ter, e 2) temos que admitir que a teoria quântica diz algo sobre a realidade tal como ela é. Stoeger (1988). É necessário admitir o primeiro ponto para evitar dotar a realidade de características que ela pode não ter no nível com que trabalha a física quântica. Desta forma estaremos acompanhando os fatos que ocorrem no nível quântico sem se apropriar deles. Stoeger justifica seu segundo ponto mostrando que é uma convicção que é constantemente posta em jogo toda vez que um cientista interage com um sistema físico quântico: a realidade quântica, explicitada pela teoria, manifesta tantas ou mais restrições do que a realidade clássica ao interagir com outros sistemas, e o cientista não pode impor o que deseja sobre tal sistema quântico. Desta forma, parece oportuno aceitar o critério epistemológico proposto por Stoeger. Seguindo esse critério, a interpretação de Copenhague resulta ser a mais satisfatória, já que leva mais a sério o caráter objetivo do indeterminismo manifestado na teoria, permitindo que a realidade se expresse sem querer impor uma ideia humana sobre ela.

5 Desenvolvimento das ideias filosóficas na Física Quântica

5.1 Pensamento do Heisenberg e a física quântica

O famoso diálogo de 1926 entre Heisenberg e Albert Einstein ocorreu em Solvay após ele expor sua mecânica matricial. Heisenberg chegou a isso usando o método que o próprio Einstein usou para propor sua teoria da relatividade, quer dizer, deixando de lado os conceitos que não são experimentalmente observáveis. Depois que Planck introduziu os quanta de ação, muitos conceitos novos foram filtrados no aparato conceitual da nova física que estava nascendo, entre eles a órbita do elétron, os saltos de uma órbita para outra dos elétrons, a duração das revoluções dos átomos, etc., fatos não comprovados por qualquer fenômeno experimental da época. Naquela reunião, Einstein questionou a proposta de Heisenberg de suprimir completamente as órbitas electrónicas, admitindo mesmo a existência de elétrons no interior do átomo, ao que Heisenberg respondeu, apelando às mesmas opções metodológicas do seu interlocutor, que tais órbitas não existem e que apenas conceitos observáveis experimentalmente poderiam ser introduzidos nas teorias científicas. Na construção de teorias científicas foi necessário dispensar os conceitos inobserváveis.

Nas explicações de Heisenberg é típico do homem tentar compreender algo com base em conhecimentos anteriores e nomear novos acontecimentos com referência aos anteriores. Para o caso da física quântica, não é possível utilizar a linguagem comum para se referir aos fenômenos que ocorrem nessa área, pois isso introduz uma ambiguidade impossível de superar. Portanto, Heisenberg deixou de lado tudo o que era inobservável para evitar essa ambiguidade de linguagem, e para ter uma teoria mais ajustada ao que os fenômenos lhe apresentavam. Nas palavras dele “quando, ao extrapolarmos a partir do mundo da experiência cotidiana, queremos concluir uma proposição universal, corremos o grande perigo de enunciar proposições vazias de conteúdo e de constituir ideias vazias”. Reforçando em outras passagens diz também que “falamos de órbitas electrónicas, ondas de matéria e

densidade de carga, energia e momento, etc., tendo sempre consciência de que estes conceitos apenas têm um raio de aplicabilidade muito limitado”. Assim, é mais conveniente limitar-nos a elaborar a teoria atômica com magnitudes verdadeiramente mensuráveis como energia, momento, mas não a localização e velocidade dos elétrons.

A regra para evitar o perigo da ambiguidade e de pronunciar proposições vazias e sem sentido é a distinção entre observáveis e não observáveis, acrescentando-lhe o método das definições operacionais. Este método segue a regra simples de que todo conceito científico deve ser observável, isto é, capaz de ser revelado por observações experimentais ou por experimentos mentais conceitualmente possíveis, ou seja, não são contrários a nenhuma lei física ou lógica. Todo conceito observável deve poder ser definido operacionalmente, isto é, especificar alguma operação física ou série de operações pelas quais poderíamos capturá-lo. As grandezas atômicas diretamente observáveis são a frequência e a intensidade das linhas espectrais, bem como os níveis de energia do átomo. Veremos então que nem os dados relativos à posição do elétron em função do tempo, nem as órbitas eletrônicas (seu diâmetro, excentricidade, curvatura) apresentam certa ligação com o que foi medido diretamente no experimento, portanto não podem ser chamados conceitos observáveis e, portanto, devem ser deixados de lado na explicação dos fenômenos. Morales (1964)

5.2 Relações da Incerteza

Para Heisenberg, somente a teoria determina o que pode ser observado. A teoria em nenhum momento determina trajetórias, assim, na confiança de que todo o aparato matemático estava correto, Heisenberg (1975) não foi a trajetória do elétron que foi observada dentro da câmara de nuvens. Talvez tenha sido menos do que realmente foi observado. Apenas gotículas de água isoladas podem ser percebidas na câmara, cujas dimensões são bem maiores que um elétron. Portanto, em vez da trajetória do elétron, apenas uma sucessão de estados do elétron poderia ser percebida, uma sucessão discreta e descontínua de lugares. O problema da trajetória do elétron na câmara de nuvens começava a ser resolvido, e isso era possível graças ao fato de que a questão que deveria ser formulada a partir da teoria havia sido formulada, já que “fazer a pergunta certa é frequentemente mais do que meio caminho andado”. para a solução “do problema”. Heisenberg (1987)

Desta forma, a questão não seria mais como formular a trajetória do elétron com o aparato matemático da mecânica quântica, seja mecânica matricial ou ondulatória, mas sim a seguinte: “Pode a mecânica quântica representar, uma situação em que aproximadamente - que isto é, com

uma certa imprecisão - um elétron é encontrado em um determinado lugar, e também aproximadamente - isto é, novamente com uma certa imprecisão - ele tem uma determinada velocidade, e essas imprecisões podem ser tão pequenas que nenhuma dificuldade será encontrada com o experimento?" Heisenberg (1975)

Os questionamentos levaram ao Heisenberg, após uma condensada análise matemática, a postular as relações de incerteza. Essas relações, descobertas em fevereiro de 1927 [Heisenberg (1927)] são a razão principal pela qual se revelou a impossibilidade de fundamentar uma teoria atômica sobre um modelo mecânico. O também chamado princípio de incerteza determina que é conceitualmente impossível determinar simultaneamente a posição e o momento do momento (o produto da massa e da velocidade) de uma partícula, ou de qualquer outro par de variáveis conjugadas. O produto das indeterminações das variáveis conjugadas não pode ser menor que o quantum de ação de Planck. Expressado matematicamente:

$$\Delta q \cdot \Delta p \geq h \quad (5.1)$$

Na qual q e p são variáveis conjugadas e h é o valor do quantum de ação de Planck. Esta fórmula é explicada a seguir. Suponha um determinado corpo; se admitirmos que ele sofre uma variação no impulso igual a Δq e outra na posição correspondente a Δp , a probabilidade de encontrá-lo em um instante correspondente a p , $(p + \Delta p)$ e q , $(q + \Delta q)$ será obviamente proporcional à probabilidade de encontrá-lo dentro da área $(\Delta q \times \Delta p)$, elementos diferenciais que podem ser tão pequenos quanto desejado. Isto enquanto falamos de mecânica clássica. As coisas mudam completamente assim que entramos nos domínios da mecânica quântica; aqui o produto $(\Delta q \times \Delta p)$ perde todo o significado quando se torna menor que o quantum de ação de Planck h . Chegamos assim ao facto de que este produto não pode ser inferior à chamada constante de Planck ($h = 6,55 \times 10^{-27} \text{ erg} \cdot \text{segundo}$).

Nas palavras do próprio Heisenberg: "Se procurarmos o efeito quantitativo desta perturbação, descobrimos que, em muitos casos, a precisão com que diferentes variáveis podem ser conhecidas simultaneamente não pode exceder um certo limite (...) Este limite da precisão com que diferentes variáveis podem ser conhecidas simultaneamente pode ser postulado como uma lei da natureza, na forma de relações de indeterminação"

Até aqui chega as ideias sobre física de Heisenberg. Na última parte é necessário entrar no terreno filosófico e tentar compreender o mais profundamente possível as interpretações filosóficas que o Heisenberg propõe deste novo princípio da física. É um princípio íntimo

das coisas, isto é, algo pertencente à própria essência da realidade? Não será antes uma dificuldade do conhecimento imperfeito do homem, ou ainda mais, do pouco conhecimento que temos da natureza e que ainda não nos permite penetrar na sua profundidade mais profunda? O princípio da causalidade falha? O que os físicos, incluindo o próprio Heisenberg, entendem por causalidade?

5.3 Interpretação filosófica das relações de Incerteza

O indeterminismo da física quântica trouxe consigo a necessidade inevitável de investigar uma nova imagem da realidade física de acordo com os níveis dessa mesma realidade a que se referia esse indeterminismo. A teoria quântica implicou necessariamente uma mudança profunda nos conteúdos e na imagem da natureza clássica Queraltó (1988). Heisenberg enfrentou o problema do que deveria ser entendido por realidade física, isto é, o que é natureza no sentido da física. Na nova física se observou o desenvolvimento de uma nova ideia da realidade física, da natureza. Por esta razão, a nova física é um problema filosófico e, em última caso, é um problema da ontologia da natureza. Assim, o princípio da indeterminação fornece o verdadeiro fundamento desta nova concepção do mundo físico. Dentre os muitos problemas filosóficos aos quais Heisenberg se questionou no novo campo da física, junto com muitos outros cientistas, resgatamos os mais interessantes, lembrando que Heisenberg não foi filósofo, senão físico. Existem diversas respostas inspirados em outros filósofos tais como Tomas de Aquino, o mais estudado de todos, mas este trabalho é baseado apenas nas ideias de Heisenberg.

5.3.1 Problema do Subjetivismo

Devido a impossibilidade teórica e prática de observar os fenómenos quânticos, as nossas ideias sobre a ciência e os seus fundamentos precisam ser alteradas: “As experiências do mundo atômico obrigar-nos-ão a renunciar até às mais radicais ideias antigas. De fato, a nossa forma habitual de “Descrever a natureza, e em particular a nossa crença na existência de leis rigorosas entre os fenómenos naturais, baseia-se na hipótese de que é possível observar os fenómenos sem influenciá-los significativamente.” Antes da postulação das relações de incerteza era possível observar os fenómenos sem levar em conta as variações que nele eram produzidas devido à interação entre o observador e o fenómeno. Com base em tal postulação, isto é completamente impossível. O observador estará sempre imerso no mundo do fenómeno observado, alterando-o e modificando-o sem poder

evitá-lo. Nas funções de probabilidade da mecânica quântica é representado o estado inicial do sistema, tendo em conta as relações de incerteza, mas também o nosso conhecimento dele, com as suas imprecisões e erros. Portanto, encontramos nele um aspecto de objetividade (o estado inicial e a tendência objetiva ou possibilidade da natureza se desenvolver no futuro) e um aspecto subjetivo (nosso conhecimento do sistema, que pode ser diferente daquele de outro observador). Estes dois aspectos da função de probabilidade impõem o tratamento de um novo problema: será a nova física moderna subjetiva? Para responder é necessário levar em conta o que Heisenberg pensa sobre a realidade, a natureza e a própria existência dos fenômenos quânticos.

5.3.2 A ontologia dos fenômenos quânticos

A partir das relações de incerteza encontradas graças à proposta dos quanta de ação de Planck na física quântica, coloca-se agora o problema da realidade ontológica que possuem, ou do que realmente são as coisas no mundo quântico. Que raízes filosóficas, inalienáveis para os seus defensores, a física determinista clássica carregava implicitamente? Tendo visto este problema, Heisenberg faz uma distinção sobre o significado do termo “realismo”. Ele propõe três tipos diferentes de realismo, que encontra na ciência clássica. Tudo vindo, como observa o próprio Heisenberg, do racionalismo moderno de Descartes:

- **Realismo Prático**, existem julgamentos que podem ser objetivados e que na verdade a maioria dos nossos julgamentos provenientes da experiência da vida cotidiana são objetificáveis. É por isso que é uma parte essencial da ciência.
- **Realismo Dogmático**, sustenta que não existem julgamentos sobre o mundo material que não possam ser objetivados. Assim, todo julgamento sobre o mundo material pode ser objetivado. Este realismo não é uma condição necessária para fundar a ciência. Contudo, a posição atual dos cientistas da física clássica mantém-na, uma vez que qualquer pessoa que faça investigação sente que está à procura de algo que seja objetivamente verdadeiro.
- **Realismo Metafísico**, Defende que as coisas “realmente existem”. A diferença entre o realismo metafísico e o anterior é que afirma a existência das coisas. Mas parece difícil distingui-los com maior precisão. Aparentemente os dois primeiros realismos parecem ser epistêmicos, enquanto este terceiro faz afirmações metafísicas. Ou seja, nos dois primeiros o termo realismo é utilizado no sentido de “objetivismo”,

enquanto o terceiro poderia verdadeiramente ser chamado de “realismo”. No objetivismo (qualquer um dos dois tipos) pareceria afirmar que as coisas são manifestadas ao sujeito, mas a importância é colocada no conhecimento que o sujeito tem delas. Não é necessário distinguir entre a sua existência ou a sua inexistência fora da sua manifestação. Enquanto no realismo a manifestação das coisas passa à sua existência, ou, em termos kantianos, do fenômeno ao *númeno*.

Sem dúvida, Heisenberg aceita o realismo prático como aquele que está presente em todas as ciências, sendo parte essencial delas, e que nunca deixará de estar presente, pois a única forma de comunicar os resultados de experimentos e observações é usar os termos comuns da linguagem cotidiana, isto é, a linguagem do realismo prático.

5.3.3 Problema da Linguagem

Outro problema levantado pela física quântica de Heisenberg é o que se refere à linguagem. Como devemos nos referir aos eventos atômicos? É notório que possuímos elementos em nossa linguagem habitual para descrever os fenômenos do nosso cotidiano. Mas quando chega a vez de nos referirmos a fenômenos que ultrapassam o nosso cotidiano, os elementos da linguagem ficam curtos, a única forma que temos é transformá-los para novas necessidades de comunicação. Heisenberg coloca este problema nos seguintes termos: todas as palavras ou conceitos com os quais designamos objetos físicos comuns, tais como posição, velocidade, cor, tamanho, temperatura, etc., tornam-se imprecisos e problemáticos se tentarmos referi-los a partículas mínimas. (...) O comportamento das unidades mínimas não pode ser descrito na linguagem comum de forma inequívoca; a linguagem matemática ainda permite que os fatos sejam confirmados inequivocamente. Heisenberg (1981). É impossível referir-se, por exemplo, ao movimento de um elétron dentro de um átomo de forma inequívoca, pois é algo que não pode ser observado. No máximo podemos nos referir aos fenômenos observados, por exemplo, em uma câmara de nuvens, e para isso precisaremos da linguagem comum da física clássica, mas para descrever com precisão esses fenômenos devemos recorrer à linguagem da física quântica: a Linguagem Matemática. Existe uma tensão quase insuportável para os físicos entre a necessidade de total clareza para se expressar e a inevitável insuficiência dos conceitos existentes na linguagem comum.

6 Conclusões

A física de Heisenberg se tornou decisiva no campo da física contemporânea. Os desenvolvimentos específicos de Heisenberg são necessários como o concretizado no seu princípio de incerteza. Não existe teoria física atual que dispense tal princípio. Cabe dizer que as relações de incerteza se tornou uma propriedade ontológica do mundo natural, levando ela a um status de lei natural.

Neste trabalho, como descrito desde a introdução, se levantou o problema do determinismo nas ações dos agentes naturais, da física do início do século XX e da interpretação de Heisenberg. Nesta interpretação, Heisenberg propôs uma visão da realidade mais dinâmica, elástica, complexa e analógica. Uma visão em que ato e poder eram Co-princípios da realidade, e a realidade não se reduzia apenas ao real. Se viu também como é possível justificar o método que Heisenberg utiliza para a sua ciência, a definição operacional, na própria natureza das coisas, para que não houvesse problemas em aceitar as suas conclusões físicas. Se analisou também a forma como os agentes naturais agem de acordo com a sua natureza, mais ou menos perfeita. Por fim, se tentou delinear as bases para uma interpretação filosófica da mecânica quântica, mostrando que as ideias de Heisenberg podem ser lidas à luz das doutrinas de Aristóteles sobre o ser analógico e os graus do ser.

Referências

- BERNOULLI, D. *Hidrodynamicam*. [S.l.]: Argentorati, 1738.
- BOHM, D. *Causality and Chance in Modern Physics*. [S.l.]: Routledge Kegan Paul, 1984.
- BOHR, N. On the constitution of atoms and molecules. *Philosophical Magazine*, 1913.
- BOHR, N. *Atomic Theory and the Description of Nature*. [S.l.]: OxBow Press, 1987.
- CAPRA, F. *Sabedoria incomum*. [S.l.]: Ed. Cultrix, 1995.
- EINSTEIN, A. Über einen die erzeugung und verwandlung des lichtetes betreffenden heuristischen gesichtspunkt. *Annalen der Physik*, 1905.
- EINSTEIN, A. Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? *Physical Review*, 1935.
- EINSTEIN, A. *Physics and Reality*. [S.l.]: World Scientific Publishing Company, 1999.
- GALILEI, G. *Diversi Fragmenti attenenti al trattato delle cose che stanno su l'acqua*. [S.l.]: Ed. Naz, 1685.
- HEISENBERG, W. Über den anschaulichen inhalt der quantentheoretischen kinematik und mechanik. *Zeitschrift für Physik*, 1927.
- HEISENBERG, W. *Diálogos Sobre Física Atômica*. [S.l.]: Verbo, 1975.
- HEISENBERG, W. *Física y Filosofía*. [S.l.]: UNB, 1987.
- HEISENBERG, W. K. *The physical content of quantum kinematics and mechanics*, *Zeitschrift für Physik*. [S.l.]: Princeton University, 1927.
- HEISENBERG, W. K. *Philosophic problems of nuclear science*. [S.l.]: New York: Philosophical Library, 1952.
- HEISENBERG, W. K. *Nuclear Physics*. [S.l.]: London: Methuen, 1953.
- HEISENBERG, W. K. *A imagem da natureza na física moderna*. [S.l.]: Livros do Brasil, 1981.
- HORSTMANN, H. E. *A Ontopsicologia como resolução ao problema crítico do conhecimento*. [S.l.]: Saber Humano, 2017.
- HUGHES, R. *The Structure and Interpretation of Quantum Mechanics*. [S.l.]: Harvard University Press, 1992.

- KUHN, T. S. *The Structure of Scientific Revolutions*. [S.l.]: University of Chicago Press, 1996.
- LAGRANGE, J.-L. *Mélanges de Turin*. [S.l.]: Imprimerie Royale, 1759.
- LAPLACE, P. S. *Théorie analytique des Probabilités*. [S.l.]: V.Courcier, 1812.
- LEIBNIZ, G. W. *Logical Papers*. [S.l.]: Oxford, Clarendon Press, 1966.
- MORALES, J. M. R. *Azar, ley, milagro*. [S.l.]: Biblioteca Autores Cristianos, 1964.
- PLANCK, M. *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft*. [S.l.]: Wentworth Press, 1900.
- PLANCK, M. *Scientific Autobiography and Other Papers*. [S.l.]: Philosophical Library, 1968.
- QUERALTÓ, R. Indeterminismo y racionalidad. en torno al problema de la causalidad en física. *Sapientia*, 1988.
- SCHRÖDINGER, E. An ondulatory theory of the mechanics of atoms and molecules. *Physical Review*, 1926.
- SELVAGGI, F. *Causalità e Indeterminismo*. [S.l.]: Pontificia Università Gregoriana, 1964.
- STOEGER, W. R. *Physics Philosophy and Theology: A Common Quest for Understanding*. [S.l.]: University of Notre Dame Press, 1988.
- WEINBERG, S. L. *Dreams of a final theory*. [S.l.]: Vintage, 1994.
- ZEITGEIST Conference. In: . [S.l.: s.n.], 210.