

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO, FILOSOFIA E
HISTÓRIA DAS CIÊNCIAS

SILVIA MARIA GOMES CALDEIRA

LENDO BOHR AO PÉ DA LETRA:

Análise de elementos conceituais em escritos de Niels Bohr

Salvador – Bahia

2007

SILVIA MARIA GOMES CALDEIRA

LENDO BOHR AO PÉ DA LETRA:

Análise de elementos conceituais em escritos de Niels Bohr

Dissertação apresentada ao Mestrado em Ensino, Filosofia e História das Ciências da Universidade Federal da Bahia e da Universidade Estadual de Feira de Santana, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Olival Freire Júnior.

Co-orientador: Prof. Dr. Osvaldo Pessoa Júnior.

Salvador - Bahia

2007

AGRADECIMENTOS

Meu filho que me inspira a ir em busca dos meus sonhos. Penso que aonde vamos chegar nem é tão importante assim. Que a viagem seja agradável e prazerosa, pois é exatamente aí, nesse espaço e tempo, que vivemos a felicidade.

Minha família, meus amigos e os meus colegas de trabalho Mauricio Espinheira e Ana Rosa Souza. Minha eterna gratidão pelo apoio.

Aos meus orientadores, Professor Olival Freire Júnior e Professor Osvaldo Pessoa Júnior, que se mostraram tão serenos diante das intempestivas mudanças de trajetória. Meu humilde muito obrigado.

À Professora Denise Coutinho que diligentemente me acompanhou na tarefa árdua de correção do texto, trazendo contribuições valiosas ao conteúdo. Um agradecimento especial.

Ao Professor Ramon Ferrer i Cancho que me estimula a continuar as investigações ressaltando erros e acertos, mostrando caminhos, e me apresentando as “tribos” da lingüística quantitativa.

Ao Professor José Garcia agradeço o apoio algorítmico dado ao meu trabalho.

Aos Professores Aurino Ribeiro Filho e José Fernando Moura Rocha pelas explicações pacientes dos fundamentos da Física Quântica.

RESUMO

A proposta deste trabalho é aplicar um instrumento computacional capaz de evidenciar as presenças, ausências, frequências e co-ocorrências das palavras em textos sobre as ciências, de uma forma simples, usando um modelo gráfico de apresentação dos dados capaz de auxiliar em sua leitura. Os pressupostos da análise encontram-se na análise de conteúdo, incluindo tópicos da análise de discurso de Michel Pêcheux, no que se refere à determinação das condições e processos de produção textual. Há contribuições da lingüística quantitativa, especificamente da teoria de redes complexas aplicada à análise da linguagem. O método consiste em quatro etapas, a saber: escolha dos textos; tratamento lingüístico, com eliminação de palavras gramaticais e eliminação de flexões verbais e nominais; automatização da representação da análise freqüencial simples e da co-ocorrência de palavras nos textos em formato de redes, utilizando o critério de co-ocorrência de palavras, com a geração dos gráficos; e, por último, a interpretação dos resultados, sempre buscando nos fatos históricos suporte para análise das configurações das estruturas das subredes montadas. Este método foi aplicado a textos escritos por Niels Bohr, durante o período de 1925 a 1957, e a interpretação de seus resultados baseada nas condições de produção encontradas em registros em livros de autoria de Bohr, de físicos que conviveram com ele e de historiadores da ciência.

Palavras-chave: análise de conteúdo, análise de discurso, rede de conceitos, lingüística quantitativa.

ABSTRACT

The proposal of this work is to apply a computational instrument capable to evidence the presences, absences, frequencies and co-occurrences of the words in texts on sciences, of a simple form, using a graphical model of presentation of the data capable to assist in its reading. The estimated ones of the analysis meet in the content analysis, including topical of the discourse analysis of Michel Pêcheux, related to the determination of the conditions and processes of textual production. It has contributions of the quantitative linguistics, specifically of the theory of complex network applied to language analysis. The method consists of four stages, to know: choice of the texts; linguistic treatment, with elimination of grammatical words and verbal and nominal flexion; automatization of representation frequencial analysis simple and the co-occurrence of words in the texts in format of network, with the generation of the graphs; finally, the interpretation of the results, always searching support for the outcome of the analysis of the network structures in the historical facts. This methodology was applied the texts written for Niels Bohr, during the period from 1925 to 1957, and the interpretation of its results based in the found conditions of production in registers in books of authorship of Bohr, physicists who had coexisted it and historians of science.

Keywords: content analysis; discourse analysis; concept network; quantitative linguistic.

SUMÁRIO

CAPITULO I.....	4
ABORDAGENS DE ANÁLISE DE TEXTOS	4
1.1 ANÁLISE DE CONTEÚDO.....	5
1.2 ANÁLISE DE DISCURSO	11
1.3 LINGÜÍSTICA QUANTITATIVA.....	15
1.4 REDES COMPLEXAS	17
1.5 CÁLCULO DOS PARÂMETROS DE REDES COMPLEXAS.....	20
1.6 CLASSIFICAÇÃO DAS REDES COMPLEXAS	24
1.7 LINGUAGEM E SISTEMAS COMPLEXOS	30
1.8 REDE DE PALAVRAS	34
CAPÍTULO II.....	38
METODOLOGIA DA PESQUISA.....	38
2.1 PANORAMA DOS RECURSOS EMPREGADOS NA PESQUISA	38
2.2 AMOSTRAGEM.....	39
2.3 PRÉ-TRATAMENTO.....	41
2.4 CONSTRUÇÃO DA REDE.....	49
2.5 VISUALIZAÇÃO DAS SUBREDES	51
2.6 METODOLOGIA DE ANÁLISE DOS TEXTOS	54
2.7 INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS POR INFERÊNCIA	57
CAPÍTULO III	60
ANÁLISE DE TEXTOS DE NIELS BOHR.....	60
3.1 A FÍSICA QUÂNTICA DE BOHR	60
3.2 EVOLUÇÃO TEMPORAL DE FREQUÊNCIA [PALAVRA ESCOLHIDA]	70
3.3 FREQUÊNCIA DE PALAVRAS.....	73
3.4 FREQUÊNCIA DE PARES DE PALAVRAS.....	77
3.5 SUBREDE DE PALAVRAS ESCOLHIDAS.....	81
3.6 COMPARAÇÃO DE SUBREDES DE TEXTOS DIFERENTES.....	87
CONSIDERAÇÕES FINAIS	96
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100
ANEXOS.....	106

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1 Esquema simplificado de uma rede</i>	18
<i>Figura 2 Esquema das sete pontes da cidade de Königsberg</i>	19
<i>Figura 3 Esquema Simplificado de grau de um nó ou vértice</i>	21
<i>Figura 4 Esquema Simplificado de Distribuição de Grau de uma rede</i>	21
<i>Figura 5 Representação dos vizinhos ϖ_1 e ϖ_2 do vértice v</i>	22
<i>Figura 6 Exemplo de cálculo do coeficiente de aglomeração de um vértice ou nó</i>	23
<i>Figura 7 Esquema simplificado mostrando o caminho entre dois nós</i>	23
<i>Figura 8 Diagrama ilustrativo do modelo de Watts de embaralhamento de redes regulares e o surgimento de redes SW e aleatórias</i>	28
<i>Figura 9 A distribuição rank-freqüência de palavras. (A) Livro de James Joyce; (B) Jornais americanos feita por Eldridge; (C) Curva ideal com decaimento negativo</i>	32
<i>Figura 10 Exemplo de segmentação do texto em unidades lexicais</i>	43
<i>Figura 11 Exemplo de todas as possibilidades de etiquetas que as palavras do texto analisado anteriormente podem receber, após aplicação do dicionário</i>	44
<i>Figura 12 Exemplo de uma construção de rede de palavras</i>	49
<i>Figura 13 Arquivo texto com a indicação dos pares das palavras</i>	50
<i>Figura 14 Rede construída pelo programa PAJEK</i>	51
<i>Figura 15 Rede construída com o programa PAJEK e exportada como SVG</i>	51
<i>Figura 16 Tela principal do PAJEK indicando o menu Draw</i>	52
<i>Figura 17 Formato padrão de desenho da rede no PAJEK</i>	53
<i>Figura 18 Menu para escolha do formato Kamada-Kawai com opção Free e o gráfico resultante</i>	53
<i>Figura 19 Configurações para exportação de imagem no formato SVG</i>	53
<i>Figura 20 Ocorrência das palavras analisadas em relação ao ano em que foi escrito o texto</i>	70
<i>Figura 21 Quadro da freqüência principal das palavras do texto 1A</i>	74
<i>Figura 22 Quadro da freqüência principal das palavras do texto 1B</i>	75
<i>Figura 23 Quadro de freqüência principal das palavras do texto 4D</i>	75
<i>Figura 24 Quadro de freqüência principal das palavras do texto 4E</i>	76
<i>Figura 25 Subrede da palavra mathematics Texto 1A [Raio=1 PesoMin=3]</i>	83

<i>Figura 26 Subrede da palavra theory. Texto 1A [Raio=2 PesoMin=10]</i>	84
<i>Figura 27 Subrede da palavra spectrum. Texto 1A [Raio=1 PesoMin=8]</i>	84
<i>Figura 28 Subrede da palavra quantum. Texto 1A [Raio=1 PesoMin=8]</i>	85
<i>Figura 29 Subrede da palavra correspondence. Texto 1A [Raio=1 PesoMin=3]</i>	85
<i>Figura 30 Texto 1A – (a) wave [Raio=2 PesoMin=5] e (b) particle [Raio=1 PesoMin=3].</i>	86
<i>Figura 31 palavras problem [Raio=1 PesoMin=5]e difficulty [Raio=1 PesoMin=3]</i>	87
<i>Figura 32 Subredes da palavra theory</i>	89
<i>Figura 33 Subredes da palavra correspondence</i>	90
<i>Figura 34 Subredes da palavra wave</i>	91
<i>Figura 35 Subredes da palavra particle</i>	92
<i>Figura 36 Subredes da palavra difficulty</i>	93
<i>Figura 37 Subredes da palavra phenomenon</i>	94
<i>Figura 38 Subredes da palavra complementarity</i>	95

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1 Exemplos de sentenças consideradas em análise de co-ocorrência de love e mother</i>	<i>10</i>
<i>Tabela 2 Exemplos de Estudos de Redes complexas (Fonte: Albert e Barabási, 2001)</i>	<i>18</i>
<i>Tabela 3 Recursos utilizados na pesquisa</i>	<i>39</i>
<i>Tabela 4 Relação dos textos submetidos à análise freqüencial evolutiva de palavra de interesse</i>	<i>40</i>
<i>Tabela 5 Textos utilizados nas outras análises</i>	<i>40</i>
<i>Tabela 6 Exemplo de redução de palavras a outras classes gramaticais</i>	<i>42</i>
<i>Tabela 7 Códigos gramaticais usuais.....</i>	<i>45</i>
<i>Tabela 8 Freqüência dos primeiros 50 pares do texto 1A.....</i>	<i>78</i>
<i>Tabela 9 Freqüência dos primeiros 50 pares do texto 1B.....</i>	<i>79</i>
<i>Tabela 10 Freqüência dos primeiros 50 pares do texto 4D</i>	<i>80</i>
<i>Tabela 11 Freqüência dos primeiros 50 pares de palavras do texto 4E</i>	<i>81</i>

APRESENTAÇÃO

O objetivo desta dissertação é apresentar uma técnica de análise do discurso baseado na metodologia de análise de conteúdo. Esta metodologia foi aplicada a textos escritos por Niels Bohr, importante pesquisador da Física Quântica do século XX, no período de 1925 a 1957, com a finalidade de identificar a evolução temporal do emprego do termo *Complementarity*.

Além disso, quatro textos, escritos em épocas diferentes (1925, 1927, 1932 e 1937), foram escolhidos para uma análise mais detalhada de seu conteúdo, objetivando determinar o seu tema e analisar outros conceitos como por exemplo, *wave, theory, correspondence principle, phenomenon*, e outros, tão importantes para a Física nos períodos examinados.

O capítulo I apresenta uma revisão bibliográfica sobre as principais abordagens de análise de texto que possuem interface com o trabalho desenvolvido nesta dissertação. Início com a apresentação da análise de conteúdo, que surgiu na década de 1940, e propunha identificar o sentido do discurso a partir de uma análise estatística de seus elementos. Em seguida, faço uma discussão sobre a análise automática do discurso, que na década de 1970 e início da década de 1980, foi proposta por Michel Pêcheux, para se contrapor à análise de conteúdo. Por último apresento considerações sobre a lingüística quantitativa, campo de pesquisa relativamente jovem, em que abordo os fundamentos das redes complexas e sua relação com a linguagem, trazendo a discussão de exemplos de trabalhos sobre o tema. Como se trata de uma pesquisa interdisciplinar, e a presente pesquisa teve sua origem em trabalho desenvolvido anteriormente por mim (CALDEIRA,2005), tornou-se necessário explicar as bases teóricas e metodológicas da construção das redes de textos, apesar de, neste trabalho específico, não usar parâmetros matemáticos para analisa-las.

Esse trabalho de investigação aqui proposto traduz, para mim, uma nova etapa de pesquisa, pois me afasto da caracterização de textos, onde buscava a universalidade de seu comportamento, e me aproximo de uma compreensão mais específica da validade do critério atribuído à estrutura da rede. Na pesquisa anterior, através de métodos de simulação foi proposto que a frequência das palavras era a responsável pela estrutura de rede complexa observada. A partir desta informação, surgiu a necessidade de constatar

se o comportamento de repetição das palavras, que é o cerne da estrutura, relaciona-se também com o sentido dos textos. Mantive a utilização dos métodos, porém agora com outro foco interpretativo.

No capítulo II está a descrição da construção do instrumento de análise dos textos, incluindo as escolhas lingüísticas e suas implicações no resultado. Neste capítulo apresento a metodologia de análise de discurso que utilizo para análise dos textos de Niels Bohr. A metodologia compõe-se de quatro etapas distintas. A primeira etapa refere-se à escolha do *corpus*, onde defino os critérios para a escolha dos textos para cada etapa da pesquisa. Na segunda etapa, é feito o tratamento lingüístico, a fim de identificar as palavras (elementos conceituais) que permanecerão na análise, discutindo os critérios lingüísticos que apoiaram esta escolha. Na etapa três, as co-ocorrências dos elementos conceituais foram mapeadas e contabilizadas, permitindo a construção das redes, a partir dos pares identificados em torno de conceitos escolhidos. E, por fim, a quarta etapa, onde faço a interpretação dos resultados, não automatizada, que baseia-se no método de inferência.

O capítulo III apresenta comentários a respeito da atuação de Bohr na Física Quântica no período compreendido entre 1925 a 1957. Este capítulo foi escrito para dar um panorama geral sobre os conceitos analisados com a metodologia proposta, sobretudo para pesquisadores sem familiaridade com a Física Quântica. Não tem a pretensão de trazer algum aspecto inovador sobre a história de Niels Bohr. Novamente a característica interdisciplinar desta pesquisa exigiu um esforço de construir este panorama sobre a Física Quântica. A leitura dos textos de Niels Bohr foi complementada por análises críticas realizadas por historiadores da ciência dedicados a sua obra. Deste modo, comentários e observações sobre o contexto histórico dos períodos em questão foram utilizados para dar sustentação a formulações que surgiram da análise dos resultados, também apresentados neste capítulo.

As tabelas e gráficos dos resultados de evolução temporal do conceito *complementarity* e da análise dos quatro textos empregando as técnicas de frequência de palavras e pares de palavras, além das redes e comparação das redes de palavras escolhidas (conceitos) foram apresentados e discutidos, considerando as condições e situações de produção, e empregando a técnica de raciocínio denominada inferência.

Finalizando este trabalho, proponho Considerações Finais sobre o emprego da metodologia, com uma discussão sobre sua validade e sobre as dificuldades encontradas, e apresento sugestões para trabalhos futuros.

CAPITULO I

ABORDAGENS DE ANÁLISE DE TEXTOS

Em 1913, Niels Bohr publica um modelo da estrutura atômica, base de toda a mecânica quântica. Em 1922, recebe o Prêmio Nobel de Física pelo desenvolvimento deste trabalho. Prossegue em suas investigações de forma obstinada buscando entender o *modus operandi* dos átomos, até que propõe o princípio da complementaridade, da maior importância para a Física, que diz que o comportamento como partícula e onda dos elétrons são mutuamente exclusivos, embora ambos sejam necessários para uma completa descrição dos fenômenos atômicos. A definição de Bohr sobre fenômeno, em que inclui o aparelho de medida, também foi revolucionária, inclusive para outros campos científicos.

O objetivo deste trabalho é propor uma metodologia para análise de textos escritos, com a aplicação de uma técnica computacional, a fim de verificar a relação entre a frequência de palavras conceituais e seu significado. Para tanto, busquei verificar a validade da análise de frequência e co-ocorrências na detecção de características relevantes relacionadas a elementos conceituais evocados pelo autor sobre determinados temas. Neste caso, trata-se de textos escritos por Niels Bohr, ao longo de um período de tempo: de 1925 a 1957, para o conceito *Complementaridade*, e de 1925 a 1937, para a análise mais geral de temas de interesse da teoria atômica.

A metodologia aqui desenvolvida partiu da análise de conteúdo, aplicando a técnica frequencial simples em textos singulares e com perspectiva temporal, e desdobrou-se na análise das relações entre palavras, implementada a partir da frequência de pares de palavras e subrede de palavras escolhidas (com análise de co-ocorrências de palavras em sentenças). Essa última abordagem possui referencial teórico na Linguística Quantitativa, com enfoque na relação da linguagem como sistema complexo, mais precisamente com as redes complexas.

Após o tratamento computacional do texto, a fase de interpretação dos resultados baseou-se nos pressupostos teóricos que o filósofo Michel Pêcheux utiliza em sua *Análise Automática do Discurso*. Esses pressupostos consideram as *condições de produção* do texto analisado, que se refere ao contexto histórico e social em que o discurso foi produzido e as *relações de sentido*, evidenciando as ligações dialógicas que

o texto analisado trava com os discursos precedentes. Logicamente, estes pontos abordados não fazem parte do escopo da Lingüística, indo além da análise de conteúdo.

A produção deste trabalho exigiu um constante diálogo com teorias relacionadas à investigação da linguagem, seja a análise de conteúdo, análise de discurso, como também a lingüística computacional baseada em sistemas complexos. Neste capítulo me proponho a descrever os fundamentos destas teorias, bem como sublinhar os pontos em que cada uma delas contribuiu para dar sustentação à proposta.

O processo de produzir informações sobre o texto analisado, baseado nas análises freqüenciais propostas, pressupõe uma última etapa, denominada de inferência, que podemos definir como: “Toda operação pela qual se admite uma proposição cuja verdade não é conhecida diretamente, devido a sua ligação com outras proposições já tidas por verdadeiras. *Inferência* é assim o termo mais geral, de que *raciocínio*, *dedução*, *indução* etc são casos especiais” (LALANDE, 1999, p. 565). Para Bunge (2002), há duas espécies de inferências: a dedutiva (lógica) e a atrativa (não lógica) e, de acordo com este autor, “somente as inferências dedutivas são rigorosas (logicamente válidas)” (BUNGE, 2002, p. 195). Ele argumenta ainda que nem uma nem outra provam absolutamente nada por não estarem sujeitas a regras estritas. Apesar disso, a inferência é utilizada tanto na análise de conteúdo quanto na de discurso. Retomaremos adiante a forma e limitação do uso da inferência nas análises textuais.

1.1 ANÁLISE DE CONTEÚDO

A busca por sentidos latentes nos textos escritos é uma prática antiga da humanidade. Exemplos disso são a Hermenêutica, com a interpretação dos textos sagrados, e a interpretação dos sonhos, cujos primeiros tratados remontam a Aristóteles. Um dos mais recentes métodos desenvolvidos com esta finalidade é a análise de conteúdo.

A análise de conteúdo, assim como a conhecemos hoje, atrelando dados quantitativos e categorizações como suporte às inferências da análise do discurso, surgiu e desenvolveu-se nos Estados Unidos, nos primeiros 40 anos do século XX. Nesse período, o rigor científico invocado é o da medida, e multiplicam-se os estudos quantitativos, principalmente sobre a comunicação jornalística. A superfície dos artigos,

o tamanho dos títulos, o estudo das propagandas no período de guerra, são exemplos do que se investigava.

Entretanto, a análise de conteúdo demonstrava potencialidades para ser empregada em outros domínios da produção textual. Da produção literária ao mapeamento da personalidade de uma mulher neurótica através de 167 de suas cartas, os analistas diversificavam o domínio de atuação da análise de conteúdo. Neste último caso, além das tradicionais técnicas quantitativas, o estudo de Baldwin foi a primeira tentativa de uma análise de contingência [*contingency analysis*] ou análise de co-ocorrências, que se ocupou das associações de duas ou mais palavras ou temas, assim como as ausências de palavras no texto. Essa técnica insere a análise de conteúdo no campo das análises qualitativas, desenvolvidas posteriormente por Osgood (BARDIN, 2004).

Nas décadas de 1940 e 1950, Berelson, juntamente com Lazarsfeld propuseram várias regras de análise de conteúdo, preocupando-se com a qualidade da amostragem, com a validação dos procedimentos e dos resultados, com a fidelidade dos codificadores e com a produtividade da análise. As exigências de rigor e objetividade estavam presentes em todos os trabalhos, definindo-se então metodologias específicas.

Porém, a legitimidade dos métodos e técnicas empregados na análise de conteúdo, apesar de todo o rigor metodológico, foi questionada até mesmo por seus defensores, em especial os propostos por Berelson, o principal formulador das regras científicas de análise dos textos. Seus críticos indicavam que suas exigências de rigor e objetividade podiam ser interpretadas como procedimentos obsessivos, encobrendo novas possibilidades e limitando as investigações. Questionamentos dessas regras limitantes também foram feitos a respeito da validade das descobertas da análise de conteúdo, inclusive pelo próprio Berelson, ao dizer que: “a análise de conteúdo, como método, não possui qualidades mágicas e raramente se retira mais do que nela se investe e algumas vezes até menos; no fim de contas, nada há que substitua as idéias brilhantes” (BERELSON *apud* BARDIN, 2004, p. 17).

Na década de 1960, no entanto, o advento do computador ajudou a revolucionar a análise de conteúdo, por sua capacidade em processar grandes volumes de informação (BARDIN, 2004; BIDERMAN, 2001). Nesta época, surge o *General Inquirer*, programa computacional projetado para a análise de conteúdo automática, idealizado por Philip J. Stone (BARDIN, 2004), que até hoje está disponível em seu site (<http://www.wjh.harvard.edu/~inquirer/>), inclusive para análises online.

As preocupações da análise de conteúdo se modificam e se sofisticam, incorporando atividade de ciências como Linguística e Computação. Problemas de reconhecimento, contextos de significação, regras de desambiguação, e preocupações tecnológicas de adaptação da máquina às operações da análise fazem parte do trabalho de investigação acadêmica.

Segundo Bardin (2004), a análise de conteúdo tem dois desafios sutis. O primeiro é a superação da incerteza, fornecendo elementos para que a interpretação da mensagem deixe de ser pessoal, e passe a ser válida, generalizável e compartilhada. O segundo refere-se ao enriquecimento da leitura, fornecendo elementos de significação que não se faziam presentes na leitura espontânea, não sistematizada.

Além disso, por ser um método eminentemente empírico, possui duas funções, identificadas por Bardin (2004). Uma função heurística, ampliando as possibilidades de se explorar o texto, aumentando a propensão a novas leituras; e uma função de ‘servir de prova’ para hipóteses feitas em forma de questões ou afirmações provisórias, e as duas funções podem coexistir de maneira complementar. A análise pode ser iniciada ‘às cegas’ (pelo método de tentativa e erro) numa tentativa exploratória usando procedimentos de inventário e classificação, podendo levar a hipóteses, que serão mais bem investigadas a posteriori, com técnicas mais indicadas para o que se deseja responder (*ibidem*, p. 26).

A análise de conteúdo conta com várias técnicas que podem ser escolhidas para uma investigação, não tendo uma ‘receita de bolo’ a ser seguida. Possui, porém, algumas regras básicas. Seu campo de investigação são as comunicações de um modo geral, como, por exemplo, pesquisas de opinião, textos jornalísticos, comunicações empresariais, revistas, jornais, livros e textos científicos. Pode ser analisado o léxico ou a temática, e normalmente inicia-se com um tratamento descritivo quantitativo. Pode ser precedido de um tratamento de categorização para fragmentar o texto, porém não é obrigatório o seu uso (*ibidem*).

As técnicas de análise de conteúdo mais conhecidas são dedução freqüencial e análise por categorias temáticas. A dedução freqüencial é o processo de recensear o número de ocorrências de um mesmo signo lingüístico (palavra) no interior de uma seqüência de texto fixada, utilizando em seguida a comparação com a freqüência das mesmas palavras em outras seqüências de texto. O método de análise por categorias temáticas consiste em estabelecer uma relação entre a ocorrência de determinados termos e classes

mais genéricas de sentido ou sentimento. Em seguida, faz-se a etiquetagem de determinados trechos do texto com os rótulos dessas classes, partindo então para o recenseamento. O passo final da análise é a inferência da intenção do autor a partir de tais frequências. A fragilidade maior desse método é sua estreita vinculação à subjetividade do codificador (*ibidem*, 2004).

A análise de conteúdo empregando a técnica frequencial simples é feita em três etapas distintas: a) pré-análise, etapa de organização onde é feita uma leitura prévia e superficial do material a ser analisado, a fim de proceder à escolha dos documentos a serem submetidos à análise. Na pré-análise ainda está prevista a formulação das hipóteses, afirmações provisórias a serem verificadas, e dos objetivos, finalidade geral proposta para a análise; b) Exploração do material – caso a pré-análise seja bem feita, esta etapa será apenas para administrar decisões tomadas anteriormente; c) Tratamento dos resultados obtidos e interpretação – resultados brutos podem ser tratados por operações estatísticas, gerando tabelas, gráficos, figuras e modelos, que condensam e tornam mais palatáveis as informações obtidas.

A técnica mais antiga e mais utilizada na prática é a análise categorial que não trabalha com o texto bruto, realizando uma inferência sobre classes de significado (categorias) que podem ser definidas previamente, sendo a categorização definida como

uma operação de classificação de elementos constitutivos de um conjunto, por diferenciação e, conseqüentemente, por reagrupamento segundo o gênero (analogia), com os critérios previamente definidos. As categorias são rubricas ou classes, que reúnem um grupo de elementos sob um título genérico, agrupamento esse efetuado em razão dos caracteres [características] comuns destes elementos. O critério de classificação pode ser semântico (categorias temáticas: por exemplo, todos os temas que significam desonestidade ficam agrupados na categoria 'desonestidade'), sintático (os verbos, os adjetivos), lexical (classificação das palavras segundo o sentido, com emparelhamento dos sinônimos e dos sentidos próximos) e expressivo (por exemplo, categorias das perturbações da linguagem) (BARDIN, 2004, p 111).

Outras técnicas citadas por Bardin (2004) são: a análise de avaliação, da enunciação, da expressão, das relações e do discurso. Irei ater-me às explicações das duas últimas pela relação que mantêm com o presente trabalho.

A análise das relações, também chamada de análise das co-ocorrências ou análise de contingências, visa identificar as presenças simultâneas de dois ou mais elementos no texto. Além disso, a ausência de co-ocorrências tidas como ‘normais’ em determinado texto também se constitui em elemento importante da análise (*ibidem*).

A primeira aplicação da análise das relações foi implementada por Osgood, em 1959, cujo procedimento proposto foi: a) escolha de palavras-chave (palavras escolhidas), podendo ser seguida de categorização, se necessário; b) escolha das unidades de contexto e a decomposição do texto em fragmentos; c) codificação: presença ou ausência das palavras escolhidas em cada unidade de contexto; d) cálculo das co-ocorrências (matriz de contingência). Comparação com o acaso; e) representação e interpretação dos resultados.

Desde então, foram criados outros softwares especializados em análise de co-ocorrência, tais como o WORDS (IKER & HARWAY, 1969) que utiliza abordagem estatística de co-ocorrência; o CATPAC[®] (WOELFEL, 1993, 1997; WOELFEL & FINF, 1980), que inicialmente utilizou a mesma abordagem do WORDS, mas que hoje se vale das redes neurais, que permitem ao computador ‘aprender’ sobre a linguagem a partir do uso repetido do software. O TEXTANALYST (SULIVAN apud KRIPPENDORF, 2003) também utiliza a abordagem de estatística de co-ocorrência, porém especializando-se como ferramenta de negócios, propondo uma perspectiva prática às pesquisas da linguagem baseadas nesta técnica. Além dessas tentativas de análise de conteúdo baseadas na co-ocorrência de unidades textuais, hoje encontramos também as redes semânticas como técnica para análise de conteúdo, que diferem das citadas até agora porque exigem mais de um tipo de ligação binária entre seus elementos (KRIPPENDORFF, 2003).

A análise de contingência baseia-se na hipótese de que conceitos fortemente associados cognitivamente também estarão relacionados entre si. A análise de conteúdo tem aplicado com sucesso esta técnica para autores individuais, para grupos sociais com conceitos comuns e compromissos ideológicos, e para produções textuais de culturas permeadas por estereótipos culturais e convenções (*ibidem*).

Um modo de verificar a validade semântica de uma análise de conteúdo é criar um contra-exemplo, técnica bem estabelecida na Lingüística. Apoiando-se nesta técnica, em discussões sobre seu método de análise de contingência, Osgood utilizou esta estratégia para reduzir as expectativas em torno de sua hipótese (*ibidem*). Sua argumentação foi

construída com o exemplo da co-ocorrência das palavras *love* e *mother*, na seguinte sentença: *I love my mother*, e em outras com significado bem diverso da primeira, como mostra a Tabela 1. Os dados dessa tabela indicam as prováveis falhas que ocorrem quando consideramos apenas a co-ocorrência sem considerar o sentido do contexto.

Tabela 1 – Exemplos de sentenças consideradas em análise de co-ocorrência de *love* e *mother*

Item	SENTENÇA	INSENSIBILIDADE DO MÉTODO
1	I loved my mother more than anyone else;	Qualificação verbal (intensidade)
2	Mother loved me;	Não distingue entre voz ativa e passiva
3	I don't love my mother;	negação
4	Have I always loved my mother? – Hell no!	ironia
5	My beloved father hated mother	construções gramaticais

Ao usar esta argumentação para se referir a seu próprio método, Osgood obviamente não o fez para criticá-lo, e sim para apontar que as associações estatísticas, e não lógicas, entre pares de conceitos estão presentes em quem produz o registro textual. Assim, mesmo dois conceitos em negação, por exemplo, quando co-ocorrem, devem ser considerados evidência de que eles têm algum tipo de relação entre si. No método proposto neste trabalho, apenas a ocorrência do item 5 não seria considerada, pois o tratamento computacional construído é capaz de diferenciar construções gramaticais como esta.

A última técnica que Bardin (2004) analisa é a análise do discurso, mais precisamente aquela proposta por Michel Pêcheux, filósofo e historiador das ciências, e cujo interesse por tecnologias computacionais como instrumento da Linguística configura-se como referência para esta dissertação. O próximo tópico traz uma descrição dos motivos que levaram Pêcheux a propor uma Análise Automática do Discurso e sua contribuição ao presente trabalho.

1.2 ANÁLISE DE DISCURSO

O termo foi citado pela primeira vez num artigo, em 1952, escrito por Harris, lingüista americano, de origem ucraniana. A análise do discurso é uma disciplina relativamente recente que pode ser compreendida tanto como a análise restrita ao próprio discurso, como a análise associada à relação entre texto e contexto. Esta última definição é a base deste trabalho, e seu surgimento ocorreu na década de 1960, tendo como principal representante o filósofo francês Michel Pêcheux, também considerado seu fundador (CHARAUDEAU & MAINGUENEAU, 2006).

Michel Pêcheux estudou Filosofia no período de 1959 a 1963 na *École Normale Supérieure*, estando entre seus professores Louis Althusser e Georges Canguilhem. A carreira de Pêcheux começou dentro desse clima intelectual embalado pelas discussões a respeito da epistemologia bachelardiana, que lhe despertou a atenção para o contexto prático e histórico dos conceitos científicos e descobertas. Seus primeiros trabalhos já o direcionavam para a análise do discurso. O problema é que questões referentes ao significado dos textos eram sistematicamente excluídas da análise lingüística, pois, embora a Lingüística tenha se estabelecido como uma ciência a partir de uma epistemologia saussureana, ela tinha ‘esquecido’ de desenvolver uma teoria adequada sobre a produção do significado no discurso (HELSLOOT & HAK, 2007).

As descobertas de Saussure foram possíveis pelo caráter metodológico de sua análise, que considera a língua como um sistema composto de elementos abstratos, definíveis com base em suas funções estruturais e não em seu aspecto fonético. Apesar de tão precoce produção, somente a sua obra póstuma, *Cours de linguistique générale*, ganhou representatividade no estudo lingüístico, trazendo conceitos largamente aceitos, tais como *langue* (língua) e *parole* (fala), e a noção de entidade lingüística como sistema de signos (SAUSSURE, 2004).

É necessário entender essa diferença entre língua e fala para poder situar em que contexto está o presente trabalho. Para Saussure, a linguagem tem um lado individual e um lado social, sendo impossível conceber um sem o outro. Ao estudar a produção da linguagem sob esses dois aspectos ao mesmo tempo teríamos um objeto de estudo muito complexo, como um “aglomerado confuso de coisas heteróclitas, sem liame entre si” (*ibidem*, p. 16).

Então, para Saussure, a Lingüística deveria ocupar-se do aspecto social da linguagem, a língua. A parte psíquica seria parcialmente abordada, já que os processos associativos dos signos ao conceito “é sempre individual e dela o indivíduo é sempre senhor” (*ibidem*, p. 21). Além desse aspecto individualizado de associações de significação, acrescento que o ato da fala, no contexto do discurso, possui um aspecto singular referente à escolha das palavras (signos) que irão compor o discurso, inclusive a freqüência com que estas são escolhidas.

Tanto um sistema cuja existência depende da relação entre seus elementos, quanto o fruto de uma atividade humana em suas relações sociais, a linguagem apresenta-se como um objeto adequado para experimentos de investigação de seu funcionamento interno e também como um elemento que reflete as condições externas de sua produção (GADET & HAK, 1993).

O projeto de Pêcheux era único por duas razões intimamente relacionadas: ele desejava estabelecer uma teoria científica social do ‘discurso’, e enfatizava a necessidade de desenvolver um instrumento capaz de produzir resultados experimentais. Essa ênfase no instrumento levou Pêcheux a realizar um estudo aprofundado sobre a Lingüística de Saussure, buscando espaço para conceitos de significado e discurso.

O AAD-69, instrumento idealizado por ele, surgiu como uma contraposição às formas tradicionais de análise de conteúdo e análise de textos (PÊCHEUX, 1969a apud GADEK & HAK, 1993). Tal análise pressupõe um sujeito (o analista ou codificador) capaz de ‘ler’ o significado de um texto. Pêcheux queria evitar essa confiança sobre um sujeito leitor, porque isso iria, inevitavelmente, produzir uma leitura ideológica (HELSLOOT & HAK, 2007).

Por outro lado, o método que Pêcheux apresenta apesar de todo o rigor nas atividades propostas para a automação da preparação do texto, não evita, de nenhuma forma, a interferência de um sujeito. Isto porque, ao final, o resultado produzido por seu instrumento deveria ser interpretado para que o processo de análise do discurso fosse considerado como finalizado.

Como já dito anteriormente, o discurso possui um caráter singular. Mas não é somente esse caráter singular de produção textual que deve ser considerado em uma análise. As circunstâncias ou mecanismos formais que levaram à produção do discurso devem também ser estudados, e referem-se à posição dos protagonistas do discurso e o

contexto e a situação nas quais o discurso ocorre. As variações específicas (semânticas, retóricas e pragmáticas) ligadas ao processo de produção do discurso, e o estudo da ligação entre as circunstâncias, ou seja, suas condições de produção, devem ser elementos da análise do discurso. Decididamente, as questões levantadas por Pêcheux e as soluções que ele sugere não fazem parte do escopo da Linguística, já que para ele

os fenômenos lingüísticos de dimensão superior à frase podem efetivamente ser concebidos como um funcionamento, mas com a condição de acrescentar imediatamente que este funcionamento não é integralmente lingüístico, no sentido atual desse termo, e que não podemos defini-lo senão em referência ao mecanismo de colocação dos protagonistas e do objeto de discurso, mecanismo que chamamos “condições de produção” do discurso (PECHEUX *apud* GADET & HAK, 1993, p. 78).

O discurso possui *relações de sentido* que devem ser consideradas (*ibidem*). Quem escreve, ou fala, irá tomar de empréstimo partes de discursos precedentes. O discurso poderá, inclusive, ser criado a partir de um esforço em se esclarecer ou refutar algum texto ou fala anterior. Irei ater-me à produção de um texto científico para esclarecer suas condições de produção. No caso, por exemplo, de uma apresentação preparada para um Congresso, a audiência, a época em que o texto foi escrito, os protagonistas das discussões científicas travadas na comunidade a que o autor pertence, as ideologias teóricas vigentes no período, tudo isso influencia o que será escrito. Todos esses aspectos fazem parte das condições de produção do discurso e devem ser considerados.

Michel Pêcheux trabalha o caráter dialógico do texto, especificando que o conceito de diálogo não se refere apenas à troca de mensagens entre duas pessoas, mas sim entre “lugares determinados na estrutura de uma formação social, lugares dos quais a sociologia pode descrever o feixe de traços objetivos característicos” (*ibidem*, p. 82).

Pêcheux é um filósofo de formação, porém um filósofo fascinado por máquinas, ferramentas, instrumentos e técnicas. Ele é um filósofo convencido de que a prática tradicional da filosofia referente às ciências está desprovida de sentido, pois pretende legislar em matéria de ciência, de cientificidade, de legitimidade epistemológica e coisas semelhantes. Mais especificamente, suas críticas são em relação às ciências sociais, que ele próprio não considera como ciência, e sim como ideologia. Mesmo assim, para ele, as críticas feitas às ciências só são válidas se partirem do terreno ou do domínio que elas próprias ocupam (*ibidem*, p. 18).

Seu objetivo principal era “abrir uma fissura teórica e científica no campo das ciências sociais” (*ibidem*, p.14). Com a análise automática do discurso, pretendia fornecer às ciências sociais “um instrumento científico de que elas tinham necessidade, um instrumento que seria a contrapartida de uma abertura teórica em seu campo” (*ibidem*, p. 15). Seus pressupostos eram que as ciências sociais estavam num nível pré-científico e que para o estabelecimento de uma ciência são necessários instrumentos.

De acordo com seu pensamento, após a mutação teórico-conceitual no campo ideológico, que produz uma determinada ciência, há o momento da ‘reprodução metódica’ que é de natureza conceitual e experimental. Nesse momento, os instrumentos (inclusive os matemáticos) passam a ter uma função determinante, e passam a ser procurados nas práticas científicas preestabelecidas ou nas práticas técnicas, ligadas ao processo de produção.

Um instrumento necessita de uma teoria que o explique ou que, ao menos, conduza à teoria. O que for tomado de empréstimo para construir o instrumento deve ser reinventado, “apropriado” pela teoria que o suporta. Cada vez que um instrumento ou experimento é transferido de um ramo de ciência para outro, ou de uma ciência para outra, estes precisarão ser reinventados. Além disso, “as ciências colocam suas questões, através da interpretação de instrumentos, de tal maneira que o ajustamento de um discurso científico a si mesmo consiste, em última instância, na apropriação dos instrumentos pela teoria” (PÊCHEUX *apud* GADET & HAK, 1996, p. 17).

O capítulo final do livro de Bardin (2004) é dedicado a uma avaliação crítica detalhada da Análise Automática do Discurso (AAD) proposta por Michel Pêcheux, em 1969. A sua intenção é defender a hipótese de que o “empreendimento de Pêcheux pertence a este tipo de análise [de conteúdo]” (2004, p. 207). Para ela, são três as razões por que pode fazer esta afirmação: a) o procedimento proposto por Pêcheux tem como procedimento também fazer inferências sobre os processos de produção a partir dos efeitos de superfície do texto, tal qual outros métodos da análise de conteúdo; b) a técnica de Pêcheux inscreve-se numa sociologia do discurso e procura estabelecer ligações entre a situação (condições de produção) na qual o sujeito se encontra e as manifestações semântico-sintáticas da superfície discursiva; c) a AAD pretende ‘destruir’ a análise de conteúdo, substituindo-a. Logo, pode-se supor que a AAD procura responder a mesma função através de meios diferentes.

1.3 LINGÜÍSTICA QUANTITATIVA

O interesse em entender a linguagem escrita através da linguagem matemática não é um fato novo na ciência, podendo ser registrado, desde meados do século XIX estudos na Alemanha, Rússia e França, com estudos freqüenciais como um método de descrição lingüística. Somente em 1913 houve o primeiro estudo ultrapassando a mera intenção descritiva da linguagem para proposição de uma teoria matemática da linguagem, pelo matemático russo A. A. Markov. Seu modelo foi pouco utilizado pela Lingüística, porém é considerado como ponto de partida para um novo campo de pesquisa, a Lingüística Quantitativa.

Enquanto a Lingüística, utiliza métodos da matemática qualitativa (álgebra, teoria de conjuntos) e a lógica para modelar as propriedades estruturais da linguagem, a Lingüística Quantitativa estuda a multiplicidade de propriedades quantitativas que são essenciais para a descrição e entendimento do desenvolvimento e funcionamento do sistema lingüístico e seus componentes. Porém seus objetivos são os mesmos, apresentando apenas diferenças no ponto de vista ontológico, pois a Lingüística Quantitativa considera a linguagem como um conjunto de sentenças com estrutura própria, um sistema sujeito a processos evolutivos, tal qual os organismos biológicos (KOHLER & ALTMANN apud ALTMANN ET AL, 2005).

Um sistema é definido como um conjunto de elementos que mantêm relações entre si. Um elemento é uma unidade primitiva que a cada instante está em um dentre vários estados possíveis. Diferentes elementos possuem relações entre si quando o estado de um condiciona o estado do outro, em um mesmo instante ou em um instante posterior. Na prática, tais relações e estados nem sempre são bem definidos (PESSOA JR, 1996).

A classificação de um sistema como complexo refere-se à determinação de medidas sistêmicas, ou seja, propriedades do sistema, e que podem ser quantificadas ou não. Não há, porém, um consenso entre a definição mais adequada para essas propriedades, que são normalmente citadas como “ordem”, “complexidade” ou “organização”. Segundo Pessoa (1996), muitas são as definições para as medidas sistêmicas e citaremos algumas:

Organização enquanto condicionalidade ou restrição - Essa definição baseia-se na condicionalidade entre os elementos do sistema, focalizando sua estrutura sem levar em consideração a sua finalidade;

Organização enquanto adaptabilidade – A organização de um sistema segundo essa definição indicará o grau de eficiência no cumprimento de metas, sua boa adaptação ao ambiente e a conservação ou otimização das variáveis essenciais que garantem a sobrevivência do sistema enquanto tal;

Ordem como regularidade – relaciona-se à existência de regularidades no espaço ou no tempo, ou de padrões que permitam a descrição de um sistema complicado em termos de poucas variáveis;

Ordem enquanto confiabilidade – um sistema que permanece ou retorna a um mesmo estado macroscópico após alterações aleatórias em seus elementos possui alta confiabilidade, resistência a erros, inércia ante modificações;

Complexidade enquanto número de elementos – empregada na engenharia de sistemas, essa definição leva em conta o número de componentes do sistema, considerando as suas interconexões;

Complexidade enquanto beira do caos – a complexidade estaria associada a um meio-termo entre a ordem do cristal e o caos da fumaça. Admite a existência de um ponto crítico entre eles, onde haveria um regime de máxima evolutibilidade em sistemas vivos, e que surgiria espontaneamente como no regime de criticalidade auto-organizada.

A partir das definições de organização, ordem e complexidade expostas acima, um texto escrito, então, poderia ser caracterizado como um sistema complexo. Somente do ponto de vista com o qual estamos analisando os textos, ou seja, tomando a sentença como a menor unidade de significado, já seria possível defini-lo como complexo, pois um texto é composto de um grande número de unidades (significantes), que interagem entre si em pequenos grupos (sentenças). Os significantes, que aqui simplesmente chamaremos de palavras, podem apresentar significados diferentes, dependendo de sua relação com os outros significantes a que estão ligados.

Existem muitas maneiras de conhecer como as coisas são e como funcionam. Pode-se prever o comportamento de um objeto, fazendo relacionamentos com outros objetos similares, ou com representações deste, quando utilizamos a analogia, uma maneira indireta de aprender que se vale de igualar um fenômeno novo com um fenômeno já conhecido, e predizendo seu comportamento, a partir do modelo escolhido.

Esses modelos podem ser baseados em fenômenos ou objetos escolhidos como referência para o estudo de um outro fenômeno, encontrados na natureza, ou podem ser

construídos especialmente para o propósito cognitivo. O modelo escolhido para representar o mundo dependerá de nossas crenças, pois estas determinarão nossas visões sobre o próprio mundo.

Os modelos podem ser criados de duas maneiras. Podemos escolher entre construir mecanismos que analogamente imitem um fenômeno, ou apenas conhecer as suas características sem criar nenhum mecanismo de imitação deste. Aos primeiros é dado o nome de *modelo de simulação*, onde o objetivo é conhecer como os processos ocorrem em sua totalidade ou em partes. Os modelos que possuem como objetivo investigar as características de um sistema, sem, no entanto, criar mecanismos que reproduzam seu funcionamento, são denominados *modelos de caracterização*.

Na pesquisa dos sistemas complexos, podemos utilizar os seguintes exemplos dos dois tipos de modelos: autômatos celulares, modelos de crescimento, equações diferenciais (simulação), e mapas logísticos, fractais/multifractais (caracterização). As redes complexas podem ser utilizadas com as duas finalidades, e este foi o modelo escolhido para o nosso estudo.

1.4 REDES COMPLEXAS

Durante seus estudos sobre as redes sociais, em 1998, Duncan Watts e Steve Strogatz (WATTS, 1999) desenharam pontos representando pessoas e interligaram esses pontos com linhas, representações de suas relações de amizade. Tentavam descobrir como o fenômeno dos ‘seis graus de separação’ ocorre. Como é que seis bilhões de pessoas poderiam estar distantes uma das outras, com não mais do que seis ligações entre elas. Porém, devo salientar que os autores não são os pioneiros nos estudos sobre redes sociais. Estudos iniciais datam de 1930 (SCOTT, 2000). Os autores propuseram novos parâmetros de caracterização das mesmas.

A partir daí, nos últimos sete anos, sociólogos, físicos, biólogos e outros cientistas têm proposto inúmeras conexões inesperadas entre o funcionamento do mundo humano e o funcionamento de outras coisas aparentemente sem relação, desde uma célula e o ecossistema global até a Internet e o cérebro humano, utilizando o modelo de redes complexas.

Os sistemas complexos são estruturas que, de uma maneira simplificada, podem ser representadas como uma rede complexa, formada por elementos que se interligam a partir de regras de relacionamento, como mostrado na Figura 1.

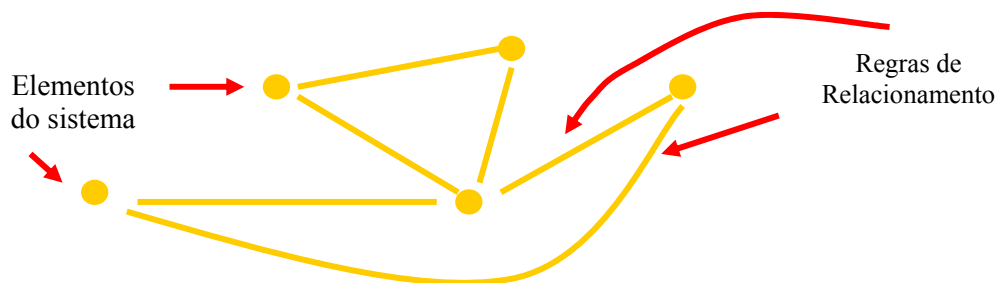


Figura 1 – Esquema simplificado de uma rede

Utilizadas como modelos que representam sistemas reais, as redes complexas geraram estudos em diversas áreas de conhecimento, principalmente pela disponibilidade atual dos bancos de dados com informações apropriadas a esse propósito (ALBERT e BARABÁSI, 2002). A Tabela 2 traz um resumo de estudos nessa direção.

Tabela 2 – Exemplos de Estudos de Redes complexas (Fonte: Albert e Barabási, 2001)

Tipo de Rede	Total nós	Referência
WWW	153.127	Adamic, 1999
Internet	3.015 – 6.209	Yook et al., 2001
Atores de hollywood	225.226	Watts and Strogatz, 1998
MEDLINE co-autoria	1.520.251	Newman 2001a, 2001b, 2001c
SPIRES co-autoria	56.627	Newman 2001a, 2001b, 2001c
Co-autoria entre	70.975	Barabási et al., 2001
Cadeia alimentar	154	Montoya e Solé, 2000
Co-ocorrência de palavras	460.902	Ferrer i Cancho e Solé, 2001
Rede energia elétrica	4.941	Watts e Strogatz, 1998
Sinônimos	22.311	Yook et al, 2001

O modelo de redes complexas é um marco conceitual idôneo para o estudo de estruturas não-lineares, abertas, descentralizadas, dinâmicas e capazes de auto-organização, caracterizadas pela sua horizontalidade, isto é, pelo modo de interrelacionar os elementos sem hierarquia. A formulação desses padrões ocorreu originalmente em estudos de matemática pura, com a *Teoria dos Grafos*. Os primeiros fundamentos da Teoria dos Grafos surgiram em meados do século XIX, quando Eüler se dispôs a

responder o enigma das sete pontes. O problema consistia em responder se havia um caminho para cruzar as sete pontes de sua cidade natal, Königsberg (Figura 2), passando apenas uma vez por cada uma delas (NEWMAN, 2003).

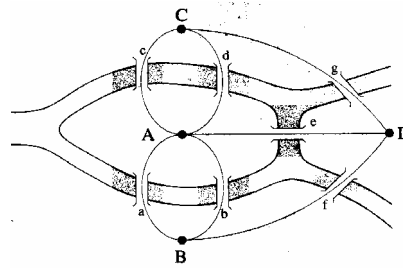


Figura 2 – Esquema das sete pontes da cidade de Königsberg (Fonte: Barabási, 2003)

Partindo de um estudo matemático, Eüler não apenas provou a inexistência de tal caminho, como fundou a teoria dos grafos, que veio a se tornar a base para os estudos sobre redes. O grande mérito de Eüler foi visualizar as pontes da cidade como um grafo, uma coleção de nós conectados por ligações, e concluir que a existência, ou não, do caminho desejado era uma *propriedade* do grafo (BARABÁSI, 2003).

A forma como uma notícia se difunde num grupo de pessoas que se encontram pela primeira vez numa festa é um bom exemplo de problema para a teoria dos grafos. Também podemos citar outros, independentemente da natureza dos nós e ligações, tais como: computadores ligados por linhas telefônicas, moléculas ligadas em nosso corpo por reações bioquímicas, células nervosas conectadas por axônios.

Os grafos são estruturas matemáticas ideais para o estudo e representação das redes complexas, manipulam grandes quantidades de dados, permitindo cálculos de parâmetros que caracterizam suas diversas topologias. Alguns fatores contribuíram significativamente para o avanço da metodologia de estudo de redes:

- Automatização da aquisição de dados em todos os campos de conhecimento, contribuindo para o surgimento de grandes bancos de dados sobre a topologia de várias redes;
- O aumento da capacidade de processamento que permite investigar redes contendo milhões de nós, explorando questões que nem haviam sido previstas antes (ALBERT e BARABÁSI, 2002; KOPPEL *et al*, 2003);

- A lenta, porém visível, ruptura dos limites entre as disciplinas, que oferece o acesso de pesquisadores a diversos bancos de dados, permitindo descobrir as propriedades genéricas dos sistemas complexos;
- Finalmente, a necessidade cada vez maior de mover-se além das aproximações reducionistas, e tentar entender o comportamento do sistema como um todo.

Segundo Watts (1999), uma rede complexa pode ser descrita a partir de um grafo G , que consiste em um conjunto não vazio de elementos chamados vértices, e uma lista de pares não ordenados desses elementos, chamado de ligações. Essa estrutura topológica de representação de elementos conectados por algum tipo de regra definidora permite vários cálculos matemáticos capazes de caracterizar as redes em vários tipos de estruturas.

Nesta dissertação, abordamos três tipos de estruturas: 1) redes aleatórias; 2) redes de mundo pequeno; 3) redes livres de escala.

Alguns parâmetros são utilizados para caracterizar essas estruturas, tais como Grau Médio, Distribuição de Grau, Coeficiente de Aglomeração, Caminho Mínimo Médio, Diâmetro. Esta caracterização foi objeto de minha pesquisa no Mestrado Interdisciplinar em Modelagem Computacional (CALDEIRA, 2005).

Apesar de neste trabalho não utilizar esses parâmetros, pois a minha intenção não é mais a caracterização, retomei essas informações para fornecer uma visão ampla do que são as redes complexas e de que forma são abordadas. Além disso, vários estudos feitos sobre a linguagem, e que cito aqui, fazem referências a esses valores das redes.

1.5 CÁLCULO DOS PARÂMETROS DE REDES COMPLEXAS

O conjunto de vértices do grafo G é chamado de conjunto vertex de G , denotado por $V(G)$, e seus elementos são chamados de vértices ou nós. A lista de ligações é denotada por $E(G)$, e seus elementos são chamados de Arestas. Se ν e ϖ são vértices de G , então uma ligação na forma de $\nu\varpi$ indica que há uma aresta, ou seja, uma relação de adjacência entre ν e ϖ . O número de vértices em $V(G)$ é denominado ordem do grafo (n), e o número de ligações em $E(G)$ é chamado de tamanho do grafo (M). No exemplo acima, a ordem seria igual a 2, e o grau do vértice ν seria igual a 1 (um).

- **Grau Médio ($\langle k \rangle$)**

Sendo o Grau (k) a quantidade de arestas de cada nó, o Grau Médio refere-se à média desse valor. Na Figura 3 temos um exemplo de cálculo do Grau de um único vértice da rede. Essa mesma determinação é feita para todos os nós da rede e em seguida é calculado o valor médio.

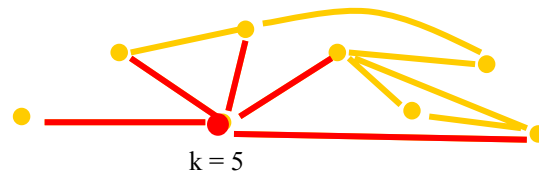


Figura 3 – Esquema Simplificado de grau de um nó ou vértice

O valor do Grau Médio pouco informa sobre as características da rede, porém a distribuição de graus é fundamental para caracterizá-la como aleatória ou não.

- **Distribuição de Grau**

Redes aleatórias apresentam uma distribuição de graus do tipo Normal, já que o número de ligações que os nós terão é definido por uma probabilidade de conexões. Já as redes livres de escala apresentam formato em lei de potência, conforme Figura 4.

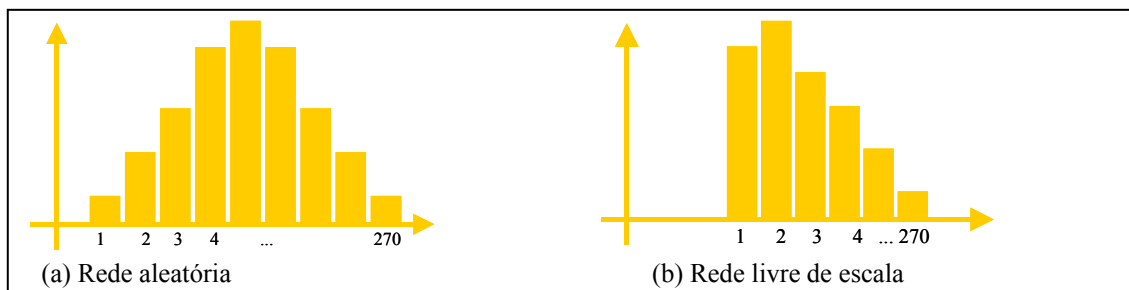


Figura 4 – Esquema Simplificado de Distribuição de Grau de uma rede

- **Vizinhança de Vértices**

Para grafos totalmente conectados, o conceito de vizinhança é importante, pois serve para calcular o Coeficiente de Aglomeração. Segundo Boaventura Netto (2003), vizinho ou vértice adjacente de um vértice v , é todo vértice w que participa de uma ligação com v , e é denotado $I(v)$, como mostra a Figura 5.

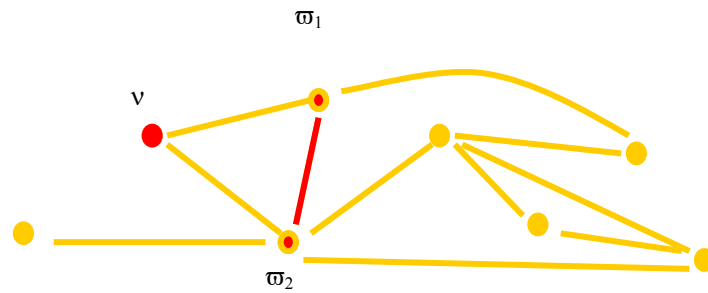


Figura 5 – Representação dos vizinhos w_1 e w_2 do vértice v .

A vizinhança $\Gamma(v)$ de um vértice v é o conjunto dos vértices adjacentes a v (não incluindo o próprio vértice v).

- **Coefficiente de Aglomeração Médio (CAM)**

Um grafo que possui uma ligação associada a cada par de vértices, ou seja, possui todas as arestas possíveis, é chamado grafo completo. Se analisarmos, porém, não o grafo inteiro, mas apenas uma subestrutura desse grafo, a esta ocorrência chamamos de clique (BOAVENTURA NETTO, 2003). Um clique indica que todos os vizinhos do nó analisado estão conectados entre si, e este comportamento constitui-se numa ocorrência comum em redes sociais, representando círculos de amigos, onde cada membro conhece todos os outros. Essa tendência inerente à aglomeração é quantificada pelo Coeficiente de Aglomeração (WATTS e STROGATZ, 1998 *apud* ALBERT e BARABÁSI, 2002), definido como a relação entre número de arestas existentes entre nós vizinhos ao nó analisado e número máximo de arestas possíveis entre esses mesmos nós (Equação 0.1).

$$CA_i = \frac{2E_i}{k_i(k_i - 1)}, \text{ onde:} \quad (0.1)$$

CA_i é o Coeficiente de Aglomeração do nó i ;

E_i é o número de arestas existentes entre os nós vizinhos ao nó analisado e

$\frac{k_i(k_i - 1)}{2}$ é o número máximo de arestas possíveis entre os nós vizinhos.

No exemplo da Figura 6, o vértice analisado possui dois vizinhos e entre eles existe uma ligação. Para que eles formem um clique deveria existir uma ligação apenas. Logo, o Coeficiente de Aglomeração desse nó é igual a um. Já no exemplo da Figura 6, o nó analisado (azul) possui 3 vizinhos e para que eles formem um clique deveriam existir 3

O maior caminho mínimo médio é denominado de Diâmetro da rede. E representa, em média, a maior distância entre os pontos mais distantes entre si.

Aos estudos de Eüler, que deram início à teoria dos grafos, foram acrescentadas, durante os dois séculos seguintes, contribuições importantes para o entendimento das características das redes, principalmente a partir do trabalho de dois matemáticos húngaros: Paul Erdős e Alfréd Rényi. A fim de responder à questão de como as redes se formam, seus estudos levaram à teoria das redes aleatórias. Além desta, outras topologias de rede foram propostas em estudos posteriores buscando esclarecimento dos fenômenos naturais que não eram explicados por esta teoria. (BARABÁSI, 2003).

1.6 CLASSIFICAÇÃO DAS REDES COMPLEXAS

Veremos agora o que diferencia cada uma das estruturas e as implicações para sua topologia.

- **Redes aleatórias**

Os estudos desenvolvidos por Erdős-Rényi sobre como as redes são formadas culminaram na hipótese de comportamentos universais referentes à sua estrutura, levando-os a propor um modelo para explicar a estrutura das redes na natureza. Segundo esse modelo, bastava apenas uma única ligação por nó de uma rede para que em um determinado momento, denominado de transição de fase ou percolação, emergisse um gigante aglomerado composto por todos os seus elementos.

Para responder perguntas fundamentais como essa, cientistas procuram encontrar a resposta plausível mais simples possível. Segundo Erdős e Rényi (BARABÁSI, 2003), a melhor forma de explicar o mecanismo de construção das redes seria conectar os nós aleatoriamente.

Para eles, uma rede surge a partir de um grupo inicial de elementos, aos quais conexões vão sendo acrescentadas aleatoriamente. No início, quando só há poucas conexões, são formados pares entre os elementos. Com o acréscimo de ligações, inevitavelmente alguns desses pares serão conectados entre si, formando aglomerados [*clusters*]. Com a continuidade de acréscimo de ligações, de tal ordem que cada nó tenha uma média de uma ligação, subitamente emergirá um único e gigantesco aglomerado. Dessa forma, a

partir de qualquer nó, podemos alcançar qualquer outro nó, navegando através de suas ligações (BARABÁSI, 2003).

Os matemáticos chamam esse fenômeno de ‘emergência de um componente gigante’. Os físicos chamam-no de percolação e dirão que se trata de uma transição de fase, similar ao que ocorre quando a água congela. Os sociólogos dizem que os indivíduos formaram uma comunidade. Apesar de usar termos diferentes, acreditam que quando aleatoriamente acrescentamos ligações conectando pares de nós juntos em uma rede, alguma coisa de especial ocorre: a rede, após alcançar um número crítico de ligações, drasticamente se modifica (*ibidem*).

Erdős e Rényi disseram que basta apenas uma ligação por nó para que esse aglomerado surja. Porém, esse valor mínimo é ultrapassado freqüentemente nas redes que encontramos na natureza. A constatação desses dois matemáticos não se tornou importante por conta da predição do valor mínimo de conexões médio por nó para que surgisse o grande aglomerado. Sua importância está nas possibilidades abertas para analisar redes bem maiores e com estruturas bem mais complexas do que as redes regulares que, até então, eram os únicos objetos de estudo da teoria dos grafos aleatórios (*ibidem*).

Uma das maneiras de identificar se uma rede é aleatória é fazer uma medida de quantos nós possuem uma, duas, três até k ligações e depois traçar o histograma, que, no caso de uma rede aleatória, seguirá uma distribuição de Poisson. A distribuição de Poisson tem um pico proeminente, indicando que a maioria dos nós possui o mesmo número de ligações próximo de um valor médio. Dos dois lados do pico a distribuição diminui exponencialmente, tornando desvios significativos da média extremamente raros. O autor complementa:

A teoria de redes aleatórias de Erdős e Rényi tem dominado o pensamento científico sobre redes desde sua introdução em 1959. Criou vários paradigmas que estão, consciente ou inconscientemente, impressos nas mentes dos que lidam com redes. Equiparou a complexidade com a aleatoriedade. Se uma rede era muito complexa para ser capturada em termos simples, isso incitava-nos a descrevê-la como aleatória¹ (*ibidem*, p. 23).

¹ Tradução livre do texto: The random network theory of Erdős and Rényi has dominated scientific thinking about networks since its introduction in 1959. It created several paradigms that are consciously or unconsciously imprinted on the minds of everyone who deals with networks. It equated complexity with randomness. If a network was too complex to be captured in simple terms, it urged us to describe it a random.

Hoje, observando criticamente alguns modelos de rede, relacionados a fenômenos reais, podemos estranhar essa explicação da aleatoriedade do surgimento das redes, pois vemos claramente que deve haver um princípio organizativo que as distingue das redes aleatórias.

- **Redes de Mundo Pequeno [Small World]**

O fenômeno *small world* formaliza a lenda segundo a qual você está afastado a somente ‘seis graus de separação’ de qualquer outra pessoa do planeta (WATTS, 1999). Essa lenda, coincidentemente, teve sua origem na Hungria, a partir de uma história de autoria do escritor Karinthy, em 1929. Ele traçou uma rede de relacionamentos em que estavam ligados entre si, por exemplo, ele próprio, o rei Gustavo e Henri Ford, através de conhecidos intermediários, previstos serem da ordem de 6 (BARABÁSI, 2003).

Essa história foi redescoberta por Stanley Milgram (MILGRAM, 1967), que realizou um experimento com o objetivo de determinar a *distância* entre duas pessoas quaisquer nos Estados Unidos escolhidas aleatoriamente. O experimento consistiu na escolha de duas pessoas, as destinatárias. A primeira residia em Cambridge e era esposa de um estudante. A segunda era um corretor da bolsa de valores que trabalhava em Boston e morava em Sharon, Massachusetts. Estas pessoas seriam os alvos de cartas enviadas a partir das cidades de Wichita no Estado de Kansas e Omaha, no Estado de Nebraska.

As cartas enviadas continham explicação do objetivo da pesquisa, o nome, endereço e uma fotografia da pessoa a ser alcançada, e instruções que esclareciam que se a pessoa conhecesse pessoalmente a pessoa da carta deveria reenviá-la diretamente para ela no endereço indicado. Porém, caso não a conhecesse, deveria reenviar a carta para uma pessoa conhecida sua que pudesse conhecê-la. Em pouco tempo, 46 das 160 cartas enviadas chegaram a seu destino, exibindo um valor médio de 5.5 intermediários, coincidentemente muito próximo do número encontrado por Karinthy em sua história fictícia (BARABÁSI, 2003).

Quem nunca esteve conversando com alguma pessoa desconhecida, que encontrou em um lugar público, e após alguns minutos de conversa descobriu que possuem um amigo comum? Nesses momentos, costumamos exclamar: “Que mundo pequeno!”. Esta é a origem do nome para o fenômeno estudado por Duncan Watts², em relações sociais, e

² Físico formado pela University of New South Wales, na Austrália, e atualmente professor do Departamento de Sociologia da Columbia University nos EUA.

que, após sua formalização, tornou-se um dos principais parâmetros de caracterização de redes complexas, associado às descobertas de Albert e Barabási (2002) sobre a identificação de redes de escala livre.

Algumas pesquisas possíveis podem ser citadas: (1) emergência e evolução de comportamento cooperativo em grandes organizações, cuja natureza estrutural permite variações; (2) qualquer tipo de propagação, desde os vírus de computador até doenças sexualmente transmissíveis; (3) o processamento da informação em redes espacialmente estendidas e conectadas irregularmente tais como o cérebro humano (WATTS, 1999; BUCHANAN, 2002; BARABÁSI, 2003).

Um exemplo contemporâneo de aplicação de pesquisa sobre redes sociais, usando o conceito de *small world*, é o sistema denominado *Orkut*, de propriedade da *Google*. Este sistema pretende construir a rede de relacionamentos se não de todas as pessoas do planeta, pelo menos daquelas que têm acesso ao computador e que representavam menos de 1% entre os países latino-americanos e não mais de 20% da população das 10 maiores economias mundiais em 1999 (TAKAHASHI, 2000).

A teoria de Watts diz que uma rede pode ser representada pelas conexões existentes entre seus elementos, tratando todas as conexões como iguais e simétricas. A pesquisa de Watts sobre o fenômeno *small world* não responde quais as características que uma rede deve possuir a fim de exibi-lo, e sim determina se este fenômeno ocorre em algum ponto de transição entre a ordem e a desordem, e em que tipo de sistemas ocorre, determinando a independência do fenômeno ao modelo usado.

Para efeito do estudo sobre redes de mundo pequeno [*small world*], Watts (1999) fez algumas restrições sobre que tipo de grafos poderiam ser analisados, com precisão dos resultados referentes ao fenômeno *small world*. Os grafos devem apresentar as seguintes características:

- **Não direcionado** – as ligações entre os elementos do grafo não devem possuir um direcionamento, implicando que qualquer desses relacionamentos será representado como simétrico;
- **Não ponderado** – às ligações não são atribuídas nenhum peso *a priori*. Portanto, qualquer importância que algumas ligações possam ter em relação a outras não será levada em consideração;

- **Simple** – múltiplas ligações entre os mesmos pares de vértices, ou ligações que unam um vértice a ele mesmo serão desconsideradas;
- **Disperso** – para um grafo não direcionado, o tamanho máximo (M) de $E(G) = n(n-1)/2$, corresponde a um grafo totalmente conectado ou completo. A dispersão implica que $M \ll n(n-1)/2$;
- **Conectado** – qualquer vértice pode ser alcançado por qualquer outro vértice, cruzando um caminho composto de um número finito de ligações.

Uma rede de mundo pequeno apresenta um valor de CMM pequeno e um elevado CAM, podendo apresentar distribuição de frequência num traçado Normal, que caracteriza redes aleatórias. Isso porque a rede de mundo pequeno é intermediária entre uma rede aleatória e uma rede regular.

Watts (1999) propôs um modelo de construção de redes de mundo pequeno onde, a partir de uma rede regular³, fosse escolhido, aleatoriamente, algum nó e também de forma aleatória, se definisse a qual outro nó da rede este se conectaria. Se continuamente isso for feito com todos os nós da rede, surgirá uma rede completamente aleatória (Figura 8).

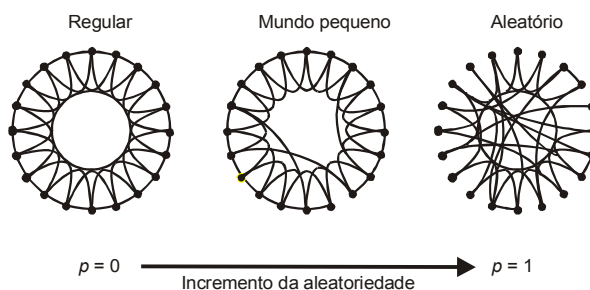


Figura 8 – Diagrama ilustrativo do modelo de Watts de embaralhamento de redes regulares e o surgimento de redes SW e aleatórias (Fonte: Watts, 1999, p. 68).

- **Redes Livres de Escala [*Scale free*]**

Os diversos tipos de redes, sejam naturais, tecnológicas ou sociais, apresentam uma característica comum, importante para explicar comportamentos como rápida difusão de informação através delas, resistência à falha em caso de quebra de grande parte de sua estrutura, ou até mesmo vulnerabilidade a ataques coordenados.

³ Rede cujos vértices possuem o mesmo número de ligações.

Esse comportamento das redes construídas a partir de fenômenos naturais ou sociais está associado à sua estrutura, onde existe, de um lado, um número relativamente pequeno de nós que apresentam um grande número de conexões a outros nós, e de outro, uma grande quantidade de nós com pouquíssimas ligações a outros nós. Esses nós altamente conectados são chamados conectores, e essas redes denominadas livres de escala, pois o número de suas conexões (k) não pode ser representado por um valor médio que a caracterize, como no caso das redes aleatórias, onde o número de ligações de cada um dos nós difere muito pouco dos outros.

Ao contrário do modelo proposto por Erdős-Renyi, essas redes não podem ser consideradas como aleatórias, justamente por essa característica de desigualdade do número de conexões entre os nós que compõem a rede. As redes livres de escala, que são construídas acrescentando aleatoriamente os novos nós aos já existentes, são chamadas de redes não democráticas já que os nós não terão o mesmo número de links, seguindo uma distribuição em lei de potência. As redes aleatórias, por sua vez, são redes democráticas, já que, em média, cada vértice possui número de ligações iguais, apresentando uma distribuição de Poisson.

Em 1999, os pesquisadores Réka Albert, Albert Barabási e Hawonng Jeong (ALBERT *et al*, 1999), realizaram o mapeamento da rede de ligações das diversas páginas web, a fim de detectar sua topologia. Qual não foi a surpresa desses pesquisadores, quando, ao invés de uma distribuição de Poisson, como supunha o modelo utilizado para explicar as redes naquela época, encontraram uma distribuição de graus dos nós como uma lei de potência, onde mais de 80% das páginas tinha pouco mais de quatro links, e uma pequena percentagem destas (cerca de 0,01%) tinha mais de mil links.

O modelo de Erdős-Renyi não foi capaz de explicar o comportamento dessa rede analisada porque a forma prevista para seu crescimento difere do que ocorre no mundo real em dois pontos. O primeiro é que a construção da rede aleatória inicia já com o total de nós da rede final, pressupondo um crescimento médio gradativo. Na prática, o que temos são redes que começam com pouquíssimos nós, e que de um momento para o outro sofrem um crescimento acelerado, alcançando um número extraordinário de nós.

O segundo ponto de divergência do modelo de Erdős-Renyi são as justificativas para os novos nós “escolherem” outros nós aos quais ele “deseja” ligar-se. No modelo da teoria dos grafos, todos os nós são basicamente iguais; logo, não ocorrem preferências de escolhas. Na prática, o que vemos é uma ligação preferencial, onde, no processo de

crescimento da rede, há sempre uma preferência dos novos nós a se ligarem aos mais antigos que tenham mais links. Talvez por serem famosos, no caso dos atores de Hollywood ou dos cientistas de uma área de investigação, ou fáceis de serem encontrados pelos internautas, como no caso dos sites *Google* e *Yahoo*, ou até mesmo para que tenham o acesso facilitado em nossa memória, no caso das palavras lexicais que dão sentido a um texto escrito.

1.7 LINGUAGEM E SISTEMAS COMPLEXOS

Tomando como base o conceito de sistemas complexos que, segundo Nussenzveig (2003), trata-se daqueles sistemas cujas partes não podem ser devidamente identificadas e caracterizadas, podemos dizer que o uso da linguagem humana também é complexo, já que um texto escrito é formado por um grande número de unidades (palavras) que interagem entre si em pequenos grupos, através das construções sintáticas (frases). O comportamento dessas unidades, em suas inter-relações, faz surgir propriedades emergentes (propriedades de mundo pequeno e livre de escala).

Um dos mais simples experimentos a serem feitos, para definir se um sistema é complexo ou não, é a determinação da distribuição de frequência dos seus elementos, com o intuito de identificar se essa distribuição é normal ou apresenta uma lei de potência. Um dos primeiros cientistas a detectar o comportamento em lei de potência em experimentos com a linguagem foi o lingüista George K. Zipf.

- **Lei de Zipf**

Zipf (1972) realizou estudos sobre a linguagem humana, considerando-a como um conjunto de ferramentas, especificamente o vocabulário. Ele fez uma analogia, conjecturando que usamos a linguagem para interagir com o mundo externo, conseguindo obter aquilo de que necessitamos, como fazemos com qualquer ferramenta criada como extensão de nosso corpo. Em seu estudo ele faz uma distinção entre o uso da palavra e a comunicação. Para ele, o estudo sobre as palavras oferece uma chave para o entendimento do processo completo da linguagem, enquanto que o estudo do processo da linguagem abrirá caminhos para o entendimento da personalidade e da dinâmica biossocial.

Para Zipf (1972), ao utilizar a fala, os seres humanos o fazem para conseguir algo. Desta maneira, pode-se considerar a linguagem como um conjunto de ferramentas utilizadas para alcançar objetivos. A partir dessa afirmação, a abordagem sobre o uso das ferramentas e o princípio do menor esforço podem ser aplicados também à fala humana.

Considero neste trabalho apenas as palavras lexicais (as que nos provocam uma representação, seja de seres, ações, qualidade de seres ou modos de ações – ver 2.3). Então, podemos supor que existe uma maneira de combinar essas palavras com seus significados de uma forma mais ou menos econômica, tanto do ponto de vista de quem fala quanto do ponto de vista de quem escuta. Quem fala terá o trabalho de selecionar não somente o significado a ser transmitido, mas também a palavra que será usada para representá-lo; sem dúvida alguma seria conveniente se pudesse usar apenas uma palavra que significasse tudo o que desejasse dizer. Logo, se tivesse que transmitir m significados, esta palavra teria m significados ligados a ela. Dessa maneira, o falante pouparia o esforço de adquirir e armazenar um grande vocabulário e selecionar palavras particulares ao desejar a comunicação.

Mas, do ponto de vista do ouvinte, um vocabulário de uma única palavra iria representar o ápice do trabalho verbal, já que teria que determinar o significado da palavra para cada contexto em que fosse usada. Dessa maneira, concluímos que, do ponto de vista do ouvinte, o ideal seria um vocabulário extenso, com cada palavra tendo apenas um significado, sem ambigüidades. Zipf conclui que a fala então seria o resultado dessas duas forças opostas, e chamou-as de força de unificação e força de diversificação respectivamente.

Um dos estudos empíricos de Zipf foi a contagem das palavras do livro *Ulysses*, de James Joyce, num total de 260.430 palavras diferentes. Em seguida, traçou o gráfico correlacionando o *rank*, posição da palavra na lista decrescente de frequência com que ocorrem no texto, e a própria frequência das mesmas, encontrando uma lei de potência (Figura 9). Nesse trabalho, Zipf (1972) demonstra, a partir das duas curvas oriundas de análises de dados reais (Curvas A e B), o quão próximas estão da curva ideal com decaimento de 45 graus (Curva C). Zipf usou um livro denso, em que o autor inventa novas palavras, e recortes de jornais, representando a linguagem mais coloquial. Ambas as produções apresentaram características similares quanto à frequência das palavras.

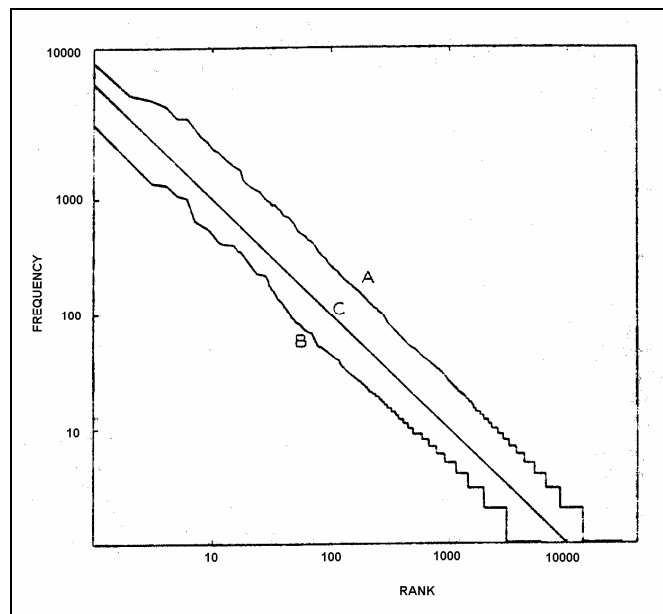


Figura 9 – A distribuição rank-freqüência de palavras. (A) Livro de James Joyce; (B) Jornais americanos feita por Eldridge; (C) Curva ideal com decaimento negativo (Fonte: Zipf, 1972, p. 25).

Além desse trabalho com palavras, Zipf estendeu suas observações a outros comportamentos humanos, como, por exemplo, o processamento simbólico da mente, a geografia das cidades em relação à densidade populacional, além de conflitos e interações entre nações, sempre usando como base explicativa a lei do menor esforço.

Hoje, sabe-se que em sistemas que apresentam comportamento de freqüência como lei de potência, por exemplo, no caso específico da lei de Zipf aplicada às palavras, essa característica pode ser um prévio indicativo de sua complexidade.

Outros pesquisadores se ocuparam do estudo da linguagem como sistema complexo. É o caso do pesquisador Herbert A Simon (1955), que fez um estudo sobre as classes de função de distribuição, e uma de suas pesquisas foi realizada com exemplos de textos, especificamente sobre a distribuição de palavras por sua freqüência de ocorrência. Do meu ponto de vista, esse trabalho é muito significativo, pois traz referências às diferentes maneiras de se tratar textos escritos para análise. O autor cita outras pesquisas como a de Yule (1944) e a de Thorndike (1937 *apud* SIMON, 1955), que reduziram as formas flexionadas das palavras às suas formas canônicas antes de realizar a contagem, sendo que o primeiro só trabalhou com os substantivos.

Além dessa referência ao tratamento prévio que os textos recebem, Simon também cita exemplos de pesquisadores que trabalharam com uma grande amostra composta de textos individuais reunidos, como no caso da pesquisa de Dewey, Eldrige e Thorndike

(1937 *apud* SIMON, 1955), indicando também que outros trabalharam com a análise de textos individuais.

Por conta dessa diversidade de tratamentos, Simon faz uma crítica à interpretação dos resultados encontrados e, logo em seguida, levanta uma suspeita de que pode estar enganado:

Eu consideraria essa heterogeneidade como uma evidência maior de que a explicação deve ser procurada em um mecanismo da probabilidade, do que em características mais específicas da língua; mas, ao mesmo tempo, a heterogeneidade complica a tarefa de especificar o mecanismo de probabilidade em detalhes⁴ (SIMON, 1955, p. 433).

Simon utilizou um modelo estocástico para a explicação da distribuição da frequência. Se esse modelo descreve corretamente a seleção de palavras, então as palavras em um livro não podem ser consideradas como um exemplo aleatório tirado de uma população com uma distribuição anterior.

Analisando um único texto, o *Ulysses* de James Joyce, Simon postulou que as suposições anteriores podem explicar o processo de crescimento do mesmo, porém fez objeções a essa possibilidade:

um autor escreve não somente pelo processo de associação – isto é, fazendo uma amostragem dos segmentos das seqüências de palavras que escreveu anteriormente – mas também pelo processo de imitação – isto é, fazendo uma amostragem dos segmentos de seqüências de palavras de outros trabalhos que ele tenha escrito, de trabalhos de outros autores, e, é claro, de seqüências que ele tenha ouvido. O modelo anterior aparentemente permite somente as associações, e exclui as imitações (1955, p. 434).

Marcelo Montemurro (2001) propôs uma revisão sobre a utilização da lei de Zipf para diferentes tamanhos de amostra, pois, segundo o autor, esta lei somente pode descrever o comportamento de amostras relativamente pequenas, e não se aplica à análise de grandes *corpora*. Na análise desenvolvida por Montemurro foram encontrados dois valores de α , sendo 1.05 e 2.3. A existência de duas faixas de valores em grandes *corpora* já havia sido descoberto por Ferrer i Cancho & Solé (2001).

⁴ Tradução livre do excerto: I would regard this heterogeneity as further evidence that the explanation is to be sought in a probability mechanism, rather than in more specific properties of language; but at the same time the heterogeneity complicates the task of specifying the probability mechanism in detail.

Montemurro e Pury (2002) fizeram uma análise da estrutura fractal de grande quantidade de textos, mapeando-os como uma série temporal.

Dorogovtsev e Mendes (2001) propuseram um modelo teórico para explicar o desenvolvimento da linguagem humana baseado no conceito de ligações preferenciais, tomando como referência os trabalhos de Herbert Simon e Barabási. Eles encontraram dois expoentes da lei de potência diferentes para distribuição de conectividade: 1.5 e 3.

Um programa chamado Automap©, desenvolvido por Lewis, Diesner e Carley (LEWIS *et al*, 2001), faz um tratamento lingüístico interessante, pois de forma automática e *online* oferece vários parâmetros estatísticos do texto fornecido para análise, inclusive com um pré-tratamento do mesmo, reduzindo as palavras à sua forma canônica. O objetivo da aplicação é construir um mapa de conceitos, que iremos chamar de primeira ordem. Ou seja, é feito um agrupamento das palavras em torno de macro-conceitos.

Outro exemplo de aplicação de Lingüística computacional é o trabalho de Koppel, Argamon e Shimoni (KOPPEL *et al*, 2003), em que um grande *corpus* é analisado e determina-se exatamente o que difere no estilo da escrita de homens e mulheres. Segundo os pesquisadores, foi identificado que os homens utilizam mais substantivos para construir os seus textos, enquanto que as mulheres fazem maior uso de negações, pronomes e algumas preposições. Essa pesquisa incentivou minha decisão de trabalhar individualmente com os textos, pois entendo que existem características individuais que podem emergir dessa maneira, ao invés de tratar os textos como um grande conjunto e tentar definir padrões globais.

1.8 REDE DE PALAVRAS

O estudo da linguagem como uma rede complexa já apresenta um grande volume de experimentos, abordando a questão da linguagem sob diferentes perspectivas. Revisarei alguns estudos de construção de redes com metodologias variadas, buscando um relacionamento entre tais investigações e esta pesquisa, apontando convergências e divergências entre eles.

O trabalho de Motter *et al* (2002) consistiu em correlacionar as palavras que aparecem em um dicionário com 30.000 entradas, com uma média de 100 palavras sinônimas para cada entrada. As palavras foram conectadas a partir da referência cruzada. A rede

resultante dessas conexões evidenciou propriedades de mundo pequeno e de livre escala, com valor de Coeficiente de Aglomeração elevado ($CAM = 0,53$) e valor de Caminho Mínimo Médio baixo ($CMM = 3.16$); além disso, a distribuição de probabilidade $P(k)$ tem um traçado exponencial.

Os autores argumentam que o caráter associativo da linguagem, que muito bem representaram construindo a rede a partir de um dicionário de sinônimos, está diretamente associado à forma de representação dos conceitos no cérebro humano. Como se existisse uma relação de um para um entre os conceitos, ou seja, pressupõem que nós armazenamos o dicionário em nosso cérebro e as palavras estão diretamente relacionadas entre si.

Pesquisas realizadas por Cancho e Solé (2003, 2001) abordaram a linguagem humana do ponto de vista da frequência de palavras e consideraram a co-ocorrência dentro de sentenças. Na pesquisa da co-ocorrência, porém, somente consideraram as palavras que estavam a uma distância de até duas palavras quando definiram as ligações entre elas, desprezando todas as co-ocorrências das sentenças com distância maior. Eles chamaram a co-ocorrência até duas palavras de co-ocorrência significativa. A pesquisa foi referente à análise de 10.000.000 de palavras do *British National Corpus*.

Uma outra hipótese que levantaram é a existência de dois tipos de vocabulário: (1) o básico e (2) o especializado. A partir da análise das redes construídas foi identificada a existência de dois conjuntos distintos de palavras chamadas de dicionário básico e dicionário especializado. Os valores encontrados para os parâmetros de análise de rede, para cada uma delas foram: Rede do vocabulário básico ($CAM_1 = 0.687$ e $CMM_1 = 3.03$) e a rede do vocabulário especializado ($CAM_2 = 0.437$ e $CMM_2 = 3,06$), confirmando as características de mundo pequeno desta rede.

Em 2004, os dois pesquisadores uniram-se a Köhler (CANCHO *et al.*, 2004) e publicaram o trabalho *Patterns in syntactic dependency networks*, em que realizam pesquisa similar para as línguas checa, alemã e romena.

Há uma divergência metodológica entre o trabalho realizado por Cancho e Solé (2003, 2001) e a minha pesquisa anterior (CALDEIRA, 2005), pois considereei que todas as palavras presentes na sentença possuem uma correlação, já que entendo que ao construir a sentença desejamos expressar um pensamento que está contido nela. Considerei, então, todas as palavras de uma sentença para correlacionar.

Wentian Li publicou dois trabalhos fazendo uma análise crítica sobre a importância da lei de Zipf como um indicio de organização de sistemas complexos. No primeiro (LI, 1992) ele construiu textos aleatórios e provou que também estes apresentam uma lei de potência, com expoente próximo de 1. O segundo trabalho trata de uma prova matemática de que a lei de Zipf pode ser considerada mais como uma lei de transformação do que uma lei de sistemas complexos (LI, 1996).

O artigo de Luciano da F. Costa (COSTA, 2004) sugere que a linguagem pode ser um reflexo do processo associativo que ocorre no cérebro. A investigação consistiu em um procedimento psicofísico, em que uma palavra é apresentada ao indivíduo, e lhe é solicitado que associe uma outra palavra àquela que está sendo mostrada. Após a coleta dos dados, foi montada a rede fazendo-se um grafo direcionado, com a frequência de cada associação tratada como o peso da respectiva ligação.

Somente a primeira palavra do experimento é sugerida. As outras, usadas para solicitar associação, são as próprias palavras que o indivíduo falou ao longo do processo. A investigação durou uma semana, e foi feita com um único indivíduo, quando foram apresentadas 305 palavras diferentes, e um total de 1930 associações registradas. Apesar de o experimento ter sido realizado com um único sujeito, o autor indica uma série de características que foram identificadas com o estudo. Por exemplo, algumas características de dinâmicas caóticas, características de rede de mundo pequeno, além da lei de potência para a distribuição de graus das palavras correlacionadas.

Esses são exemplos de pesquisa que se baseiam na representação dos textos escritos como redes. Cada um possui uma proposta diferente de tratamento dos textos, de acordo sua finalidade. Espera-se que pesquisadores desta área, por conta dos conceitos e métodos que estudam e utilizam, desenvolvam habilidades para perceber elementos, fenômenos ou propriedades referentes à linguagem que não se pode esperar de um pesquisador em lingüística tradicional, justamente pelos métodos puramente matemáticos que emprega. O método aqui apresentado utiliza a estrutura de construção do discurso em sentenças, usando símbolos de finalização para determinar a regra de associação entre elementos, palavras. Porém admite que seus elementos não podem ser interpretados no nível da própria frase. Por isso a proposição da representação do texto como uma rede.

Um pré-tratamento dos textos é sugerido, para eliminar as flexões nominais e verbais, porém respeitando as classes gramaticais a que pertencem as palavras, para auxiliar no

tratamento das ambigüidades. Por último, com a finalidade de analisar os conceitos utilizados pelo autor, foram eliminadas as palavras gramaticais, aquelas que somente possuem significado no próprio texto. Esses são os pontos lingüísticos utilizados para fazer a adequação dos textos à metodologia, fundamentada basicamente na contagem dos elementos escolhidos no texto e no estudo das correlações entre os mesmos. Essa forma de estudo é a base da análise de conteúdo, porém o método propõe ir além quando também considera a estrutura em rede apreendida nos fragmentos de texto analisados considerando a freqüência dos elementos escolhidos, as palavras lexicais.

A abordagem de construção de redes de palavras gerando gráficos de fácil manipulação visual foi proposta em trabalho anterior (CALDEIRA, 2005). Como se trata de uma junção de técnicas apropriadas de outras ciências, inclusive da Sociologia, da qual extraí o método de construção das redes sociais, dediquei o próximo capítulo a demonstrar as preocupações metodológicas da técnica.

CAPÍTULO II

METODOLOGIA DA PESQUISA

Neste capítulo encontra-se uma descrição detalhada de todas as etapas da metodologia, abrangendo uma discussão sobre os critérios de amostragem, o pré-tratamento dos textos, a escolha das palavras que permanecem na análise (os conceitos), as técnicas propostas para a análise dos textos. Dois tópicos da análise ganham destaque por sua importância. A construção das redes e o método de inferências a partir da relação entre os resultados obtidos e o contexto. São demonstrados todos os recursos utilizados, seja de caráter computacional ou analítico.

Em trabalho anterior (CALDEIRA, 2005), identifiquei que o texto escrito pode ser analisado como um sistema complexo, pois apresenta características topológicas passíveis de ser analisadas matematicamente, permitindo a afirmação da existência de uma ordem subjacente. Esta ordem, como já foi dito no capítulo I, refere-se à existência de regularidades no espaço ou no tempo, ou de padrões. O resultado daquele trabalho ratificou a hipótese de que o modo como escolhemos as palavras para construir um texto não é aleatório, e está relacionado à frequência com que as palavras são utilizadas.

A partir da constatação (CALDEIRA, 2005) de que há uma tendência à repetição de palavras quando escrevemos textos, propus-me a identificar e analisar as palavras que se repetiam. Algumas perguntas me ocorreram, indicando o caminho a ser percorrido: Essas palavras referem-se ao tema central do texto? A partir do inventário das palavras, pode-se concluir alguma coisa sobre o sentido do texto? Além disso, usando o recurso topológico das redes, somos capazes de inferir sobre a intenção do autor a respeito de determinado conceito? Para o presente estudo, utilizei a metodologia de construção das redes para verificar se há uma correlação entre sua topologia e as características singulares de sentido, considerando ainda a intenção do autor em manipular certos conceitos na ausência e/ou presença de outros.

2.1 PANORAMA DOS RECURSOS EMPREGADOS NA PESQUISA

Na Tabela 3, encontra-se um resumo dos recursos empregados na análise dos textos de Bohr, através das técnicas propostas, e os recursos empregados em cada uma delas.

Tabela 3 - Recursos utilizados na pesquisa

Etapas	Recursos
Amostragem	Definição da importância do texto para o estudo do conceito <i>complementarity</i>
Pré-tratamento e escolha das palavras que farão parte do estudo (os conceitos)	Programas UNITEX (modificados) e Programa AMBISIN
Técnicas de Análise	
Análise temporal da frequência	Processador Word e Planilha Excel
Frequência das Palavras e Pares	Programa NetPalFreq
Subrede de palavras escolhidas	Programa SubRede
Construção e visualização das subredes	Programa NetPal e Software Pajek
Análise dos resultados	Inferência

Cada um dos recursos será mais bem explicado a seguir.

2.2 AMOSTRAGEM

A técnica de evolução temporal de frequência exigiu uma quantidade maior de textos para termos uma visão mais consistente se o conceito sofreu ou não uma modificação em sua frequência de uso ao longo do tempo. Para as outras técnicas, por serem mais trabalhosas envolvendo os detalhes de seu conteúdo, escolhi textos representativos para o desenvolvimento dos conceitos mais importantes da Física Quântica.

- **Análise temporal da frequência**

A análise da evolução temporal da frequência de uso da palavra *complementarity* e de palavras similares, ou que de alguma forma se relacionam com o conceito escolhido, foi feita nos textos dos volumes I (identificação começa com o número 1) e II (identificação começa com o número 2) da coleção “The Philosophical Writings of Niels Bohr” identificados na Tabela 4.

Tabela 4 – Relação dos textos submetidos à análise freqüencial evolutiva de palavra de interesse

Marca	Ano	Título
1A	1925	Atom Theory and Mechanics
1B	1927	The Quantum Postulate and the Recent Development of Atom Theory
1C	1929	The Quantum of Action and the Description of Nature
1D	1929	The Atomic Theory and the Fundamental Principles underlying the Description Of Nature
2A	1932	Light and Life
2B	1937	Biology and Atomic Physics
2C	1938	Natural Philosophy and Human Cultures
2D	1949	Discussion with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics
2E	1954	Unity of Knowledge
2F	1955	Atoms and Human Knowledge
2G	1957	Physical Science and the Problem of Life

- **Outras análises**

As técnicas de freqüência das palavras e dos pares, da subrede de conceitos e da comparação das redes foram aplicadas nos textos da Tabela 5.

Tabela 5 – Textos utilizados nas outras análises

Identificação	Ano	Nome do Texto
1A	1925	Atomic Theory and Mechanics
1B	1927	Development of Atomic Theory
4D	1935	Can Quantum Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?
4E	1937	Causality and Complementarity

Para esse conjunto de procedimentos foram escolhidos quatro textos (Tabela 5), por representarem quatro momentos distintos e importantes para o estudo da construção do conceito de complementaridade a partir dos textos de Bohr. O artigo de 1925, aqui identificado como **1A**, refere-se ao período pré-complementaridade, pois Bohr ainda não havia proposto esse termo para se referir ao comportamento dual de onda/partícula dos elétrons. Ainda às voltas com questões referentes ao princípio da correspondência e fazendo a primeira apresentação do formalismo matricial da mecânica quântica de Heisenberg, esse texto demonstra o pensamento prévio de Bohr ao tema.

O texto de 1927, identificado como **1B**, é o registro da primeira vez que Bohr referiu-se publicamente ao termo *complementarity*, numa conferência em Como, na Itália. Trata-se então do marco inicial da construção do conceito.

No texto **4D**, temos uma amostra da controvérsia de Bohr com Einstein sobre a incompletude da teoria quântica para explicar os fenômenos atômicos. O experimento proposto por Einstein é exaustivamente discutido por Bohr, com a finalidade de provar que este procedimento, ao contrário do que Einstein afirmava em artigo anterior, não demonstra a contradição do princípio da complementaridade. Neste texto a discussão conceitual some, dando lugar a uma enfática discussão sobre o fenômeno.

Uma revisão conceitual é o que apresenta o texto **4E**, onde Bohr altera seu *quadro* conceitual referente à *complementaridade*, inclusive trazendo para seu arsenal de argumentação tópicos da teoria da relatividade de Einstein.

2.3 PRÉ-TRATAMENTO

Esta etapa pressupõe que nem todas as palavras são necessárias para a definição do tema, nem para o entendimento dos significados contextuais dos conceitos escolhidos para a análise. Os textos passaram por um tratamento prévio, para, por exemplo, eliminar as palavras gramaticais e reduzir as palavras à sua forma canônica, a fim de gerar uma estatística do texto mais significativa.

Os programas para pré-tratamento e escolha de palavras foram construídos a partir de alterações no programa UNITEX, pois ele segue a filosofia GPL, disponibilizando os códigos do programa para quem desejar utilizá-lo de forma livre. Além disso, construí outros programas para tratar questões pertinentes à metodologia, como tratamento de ambigüidades, eliminação das palavras gramaticais e seleção da forma canônica.

- **Limpeza dos Textos**

A limpeza dos textos compreende duas etapas. A primeira foi feita de forma manual, e consistiu em reduzir algumas palavras à classe gramatical correspondente, evitando distorções na contabilização da frequência. É o caso, por exemplo, da palavra *mechanical* que foi substituída pela palavra *mechanics* ao longo de todo o texto. Na Tabela 6, outros exemplos de redução de palavras ao mesmo radical substituindo adjetivos por substantivos correlatos.

Tabela 6 - Exemplo de redução de palavras a outras classes gramaticais

PALAVRA ORIGINAL	REDUZIDA A
Mechanical	Mechanics
Spectrum	Spectra
Mathematical	Mathematics
Atomic	Atom
Experimental	Experiment

Cada texto passou por uma avaliação prévia para identificar as variações das palavras que pudessem causar desvios na contagem de ocorrência. Construí previamente a rede e analisei o arquivo de saída, contendo as palavras já separadas em ordem alfabética. Com um editor de textos simples, como o Bloco de Notas, executei o comando ‘substituir’ indicando a palavra que deveria ser substituída e a que deveria ficar em seu lugar.

- **Normalização de Separadores**

Eliminação dos separadores usuais excedentes, como a tabulação, retorno de linha (*enter*) e espaço. Trata-se de um outro requisito técnico do sistema escolhido, e propõe-se a preparar o texto para que seja facilmente tratado pelo algoritmo de identificação das palavras e da segmentação das sentenças.

- **Segmentação em Sentenças**

Permite a definição de unidades de processamento lingüístico. Nesse processo é acrescido o símbolo {S} ao final de cada sentença. Este é um requisito metodológico

deste estudo da rede dos textos escritos, pois estabeleci a sentença como a menor unidade para análise dos significados expressos nos textos. Cada palavra isoladamente pode adquirir um significado que somente será identificado a partir do contexto. Esse contexto, para a pesquisa, é a sentença em que a palavra participa.

- **Segmentação em unidades lexicais**

Coloca a unidade lexical (em sua maioria palavras), uma em cada linha do arquivo gerado. Essa nova ordenação do texto é necessária para que seja feita a análise de cada palavra individualmente em relação à classe gramatical a que pertence, além de permitir a geração de informações estatísticas sobre o texto. Tomando como exemplo um pequeno texto formado por duas sentenças, podemos ver o resultado na Figura 10.

Ex.: **Chove lá fora e meu coração transborda. A alegria me contagia.**

Chove
lá
fora
e
meu
coração
transborda
.
A
alegria
me
contagia

Índice	0	1	2	1	3	1	4	1	5	1	6	1	7	1	8	1	9	1	10	1	11	1	12	1	8
	Chove		lá		fora		e		meu		coração		transborda		.		A		alegria		me		contagia		.

Figura 10 - Exemplo de segmentação do texto em unidades lexicais.

- **Normalização de formas não ambíguas**

Esse processo decompõe as palavras derivadas em suas formas originais. (e.g.: A palavra DESSE será decomposta em DE+ESSE). O aspecto analítico dessa etapa é que dá condição posterior para que as palavras analisadas sejam etiquetadas de acordo com a classe gramatical a que pertencem.

- **Aplicação dos dicionários**

Nesta etapa foi feita a análise de cada palavra, com base no léxico (dicionário) da língua escolhida, armazenado no programa UNITEX. A partir desse dicionário, identifica-se a forma canônica correspondente à unidade lexical analisada, além da(s) classificação(ões) gramatical(is). Na Figura 11, temos um exemplo de etiquetagem típica de palavras constantes em uma sentença. O símbolo {S} aparece no final da sentença. Após a palavra transcrita como encontrada no texto, é colocada a sua forma canônica, seguida da classificação gramatical sugerida pelo programa.

```

chove,chover.V:P3s:Y2s
lá,.ADV
fora,.ADV
fora,.N:ms
fora,.PREP
fora,ir.V:Q1s:Q3s
fora,ser.V:Q1s:Q3s
e,.CONJ
e,.N:ms
meu,.N:ms
meu,eu.PRO+Pos:1ms
coração,.N:ms:fs
transborda,transbordar.V:P3s:Y2s
{S}
a,.ABREV:ms
a,.N:ms
a,.PREP
a,ele.PRO+Pes:A3fs
a,o.DET+Art+Def:fs
a,o.PRO+Dem:fs
alegria,.N:fs
me,.ABREV:fs
me,eu.PRO+Pes:O1ms:A1ms:D1ms:R1ms:O1fs:A1fs:D1fs:R1fs
contagia,contagiar.V:P3s:Y2s
{S}
a,.N:ms
a,.PREP
a,ele.PRO+Pes:A3fs
a,o.DET+Art+Def:fs
a,o.PRO+Dem:fs
alegria,.N:fs
me,.ABREV:fs
me,eu.PRO+Pes:O1ms:A1ms:D1ms:R1ms:O1fs:A1fs:D1fs:R1fs
contagia,contagiar.V:P3s:Y2s
{S}

```

Figura 11 - Exemplo de todas as possibilidades de etiquetas que as palavras do texto analisado anteriormente podem receber, após aplicação do dicionário.

Mas o dicionário, por melhor qualidade que tenha, não possui todas as palavras de uma língua, a exemplo dos neologismos. Para contemplar esta característica da língua e não perdermos informações relevantes para a análise, foi necessário fazer uma modificação

no programa original do UNITEX, pois as palavras não registradas no dicionário eram retiradas do arquivo de saída. A partir dessa modificação, as palavras passaram a constar na lista geral das palavras, etiquetadas com o indicador ‘NOTFOUND’.

Na Figura 11, temos a saída das palavras analisadas no item anterior, composta da palavra como se encontra no texto, seguida de sua forma canônica e de sua classificação gramatical. Note a incidência de palavras com várias classificações gramaticais, cujo tratamento será abordado ainda nesta seção. A etiquetagem das palavras é feita a partir das informações do programa UNITEX. Os dicionários fornecidos com o UNITEX contêm as descrições das palavras simples e compostas. Essas descrições indicam a categoria gramatical de cada entrada, eventualmente seus códigos de flexões, assim como as informações semânticas diversas.

Os dicionários eletrônicos do UNITEX usam o formalismo[?] DELA – Dicionários Eletrônicos do LADL (REDE RELEX BRASIL, 2002), que possibilita descrever as entradas lexicais de uma língua associando opcionalmente informações gramaticais, semânticas ou flexionais⁵. A Tabela 7 mostra os códigos gramaticais usados nos dicionários do UNITEX para identificar a análise gramatical e que foram utilizados para tratar o problema da ambigüidade.

Tabela 7 - Códigos gramaticais usuais

Código	Significado	Exemplos
A	<i>Adjective</i>	<i>Fabulous, broken-down</i>
ADV	<i>Adverb</i>	<i>Actually, years ago</i>
N	<i>Noun</i>	<i>Evidence, group theory</i>
V	<i>Verb</i>	<i>Overeat, plug-and-play</i>
CONJS	<i>Subordinating conjunction</i>	<i>Because</i>
DET	<i>Determiner</i>	<i>Each</i>
INTJ	<i>Interjection</i>	<i>Eureka</i>
PREP	<i>Preposition</i>	<i>Without</i>
PRO	<i>pronoun</i>	<i>you</i>

- **Escolha das palavras para compor a rede**

Aqui nos deparamos com o que Pêcheux chamou de “apropriação” dos instrumentos, neste caso da Lingüística, para a construção de um dispositivo que permita examinar um

⁵ Para mais detalhes, consultar o manual do UNITEX.

texto apenas pelos conceitos que ele expressa, sem considerar a construção sintática e gramatical do mesmo.

O sintagma ‘elementos conceituais’, empregado até agora para designar as partes do texto consideradas na análise, necessita de uma explicação teórica, fundamentada na Lingüística. E é desse tema que trata essa seção. Qual a natureza desses elementos conceituais? Como identificá-los no texto?

Os questionamentos a respeito dos conceitos remontam a Platão, em suas discussões sobre a natureza da piedade, da virtude, do conhecimento e da justiça. Num desses questionamentos, Sócrates sugere que Euthyphro não sabe sobre o que ele está falando, por que não sabe o que é piedade. Sócrates quer dizer que Euthyphro tem a palavra ‘piedade’, mas não o conceito de piedade. Não é minha intenção tecer maiores discussões sobre o que exatamente é um conceito ou do que ele é composto e como é construído. Trata-se de um assunto ‘aberto’ e de riquíssimas discussões (WEITZ, 1988; THAGARD, 1992). Ressalto, apenas, o papel, diria até fundamental, da palavra na construção do conceito.

Por palavra, tomo a definição proposta pelo *Dicionário de Análise do Discurso* (CHARADEAU & MAINGUENEAU, 2006), na qual o termo palavra “remete a muitos recortes nocionais” (*ibidem*, p. 357), porém possui um sentido habitual “fortemente impregnado pela tradição tipográfica, que a utiliza para designar um segmento gráfico (que pode ser composto por uma ou várias letras) isolado por espaços em branco” (*ibidem*, p. 357). Segundo os autores, algumas classificações são possíveis para o lexema palavra, dependendo de que referencial teórico usarmos. Na Lingüística, palavra pode ser classificada como simples ou complexa, considerando sua morfologia. Numa perspectiva semântica, a classificação ocorre diferenciando palavra-plena ou palavra-instrumento. As primeiras evocam uma realidade mesmo fora de qualquer emprego em um enunciado, enquanto que o sentido das segundas não evoca nenhuma realidade distinta para os locutores (*ibidem*).

As palavras-pletas e palavras-instrumento recebem outras denominações, a depender do autor e do campo que as utiliza. No livro *Introdução à Estilística*, Martins esclarece o conceito de léxico, pontuando a diferença entre palavra gramatical e palavra lexical (MARTINS, 2003). Baseando-se no estudo de Josette Rey-Debove (*apud* Martins, 2003), a autora discrimina três definições de léxico:

- a) conjunto de morfemas de uma língua, sendo os morfemas unidades significativas mínimas, presas ou livres, de natureza lexical ou gramatical. Exemplo: cant-aremos (2 morfemas);
- b) conjunto de unidades ou palavras de classe aberta de uma língua, podendo-se considerar essas unidades os morfemas ou palavras lexicais;
- c) conjunto de palavras de uma língua.

Esse último é o conceito tradicional, e o que considerarei neste estudo, sendo o termo ‘palavra’ empregado conforme a definição dada anteriormente. As palavras do léxico de uma língua podem ser classificadas em gramaticais ou lexicais. As palavras gramaticais também podem ser denominadas palavras-formas, palavras vazias e instrumentos gramaticais (ou não-palavras). Segundo Martins,

sua significação só é apreendida no contexto lingüístico, daí dizer-se que é intralingüística ou interna. Diz-se também que são palavras sinsemânticas, por serem significativas quando acompanhadas de outras, em oposição às autossemânticas – as lexicais, que têm significação por si mesmas. [...] Sua função pode estar relacionada com o ato de enunciação, com a organização do discurso ou texto, ou com a estruturação da frase (*ibidem*, p. 72).

As palavras gramaticais são pouco numerosas (em torno de 100), mas de altíssima frequência nos enunciados, a saber: preposições, pronomes, artigos, numerais, advérbios, conjunções e interjeições. As palavras gramaticais têm a clara função de organizar o texto, seguindo regras mais ou menos fixas. Como quase nunca trazem um conceito, uma idéia associada, por não se referirem a fenômenos e objetos do mundo real, se fizerem parte da rede irão provocar resultados equivocados, principalmente por ocorrerem com alta frequência. Conservar as palavras gramaticais no inventário de palavras do texto impediria a visualização de noções conceituais, sobrepondo-se às palavras ditas com significação e borrando o foco desta investigação.

Já as palavras chamadas lexicais ou nocionais, reais, plenas ou lexicográficas, mesmo isoladas, fora da frase, produzem representação mental, seja de seres, de ações, de qualidade de seres ou modos de ações. Martins acrescenta:

diz-se que elas têm significação extralingüística ou externa, visto que remetem a algo que está fora da língua e que faz parte do mundo físico, psíquico ou social. São em número muito grande, indeterminável, pois constantemente se formam

novas palavras ou se tomam emprestadas palavras de outras línguas (*ibidem*, p. 77).

Essas palavras formam o maior percentual do léxico de uma língua e apresentam crescimento rápido, principalmente os substantivos, pois é necessário sempre criar novos nomes para representar as coisas do mundo real, em constante mutação.

Os substantivos, adjetivos, advérbios e verbos que exprimem ação ou algum processo mental (excluídos, portanto, os auxiliares e os de ligação, que são palavras gramaticais) podem permanecer e, enfim, fazer parte da rede de palavras. Porém, ressalto mais uma vez que a intenção do trabalho é construir a subrede dos conceitos que o autor evoca na formulação de sua teoria. Por isso, ficaram de fora algumas palavras gramaticais, pois não correspondem a conceitos específicos da teoria quântica e, portanto, poderiam criar uma rede não-representativa.

A eliminação das palavras gramaticais também encontra apoio no trabalho de Maria Tereza Biderman, que faz uma diferenciação entre vocábulos, e se refere ao tipo mais freqüente de palavras, dizendo que: “[n]a ordem de distribuição das palavras das mais altas às mais baixas freqüências, verifica-se que as formas usadas mais frequentemente são os vocábulos gramaticais (2001, p. 10). Trata-se, portanto, de um assunto controverso, em que os autores, estilos e métodos de tratá-lo se multiplicam tanto quanto são os campos que se ocupam da linguagem.

Com vistas a tornar mais efetiva a contabilização das palavras (elementos conceituais) que aparecem nos textos, com a finalidade de produzir informações que estão além do texto em si, as palavras foram transformadas para a sua forma canônica, eliminando as flexões verbais, de gênero e número.

O programa *Ambisin* recebe como parâmetro o arquivo *Ambisin.gra*, contendo as classes gramaticais que devem ser eliminadas, no caso as palavras gramaticais classificadas como PRO, DET, PREP, ABREV, INTJ e CONJ.

Qualquer palavra registrada com uma das classes citadas acima é excluída do arquivo. Em seguida, esse mesmo texto passa por outra análise, agora verificando a presença das palavras contidas no arquivo *Ambisin_e.can*. Essas palavras são substantivos, verbos, adjetivos e advérbios e que, apesar de serem consideradas palavras nocionais ou conceituais, não possuem qualquer significado para a definição conceitual da Física Quântica. O arquivo *Ambisin_e.can* é um arquivo editável, podendo ser adaptável a

qualquer autor ou tema. Na lista resultante (*dlf.txt*) existem, agora, somente as unidades lexicais que interessam para compor a subrede dos conceitos utilizados pelo autor.

2.4 CONSTRUÇÃO DA REDE

O arquivo de saída da etapa anterior foi processado pelo programa *NetPal*, que efetuou a ligação dos pares das palavras que aparecem juntas em sentenças. A Figura 13 traz um esquema do que ocorre até esta etapa do tratamento computacional dos textos. Esse método de construção das redes foi aplicado tanto para as redes de textos completos como na construção das subredes.

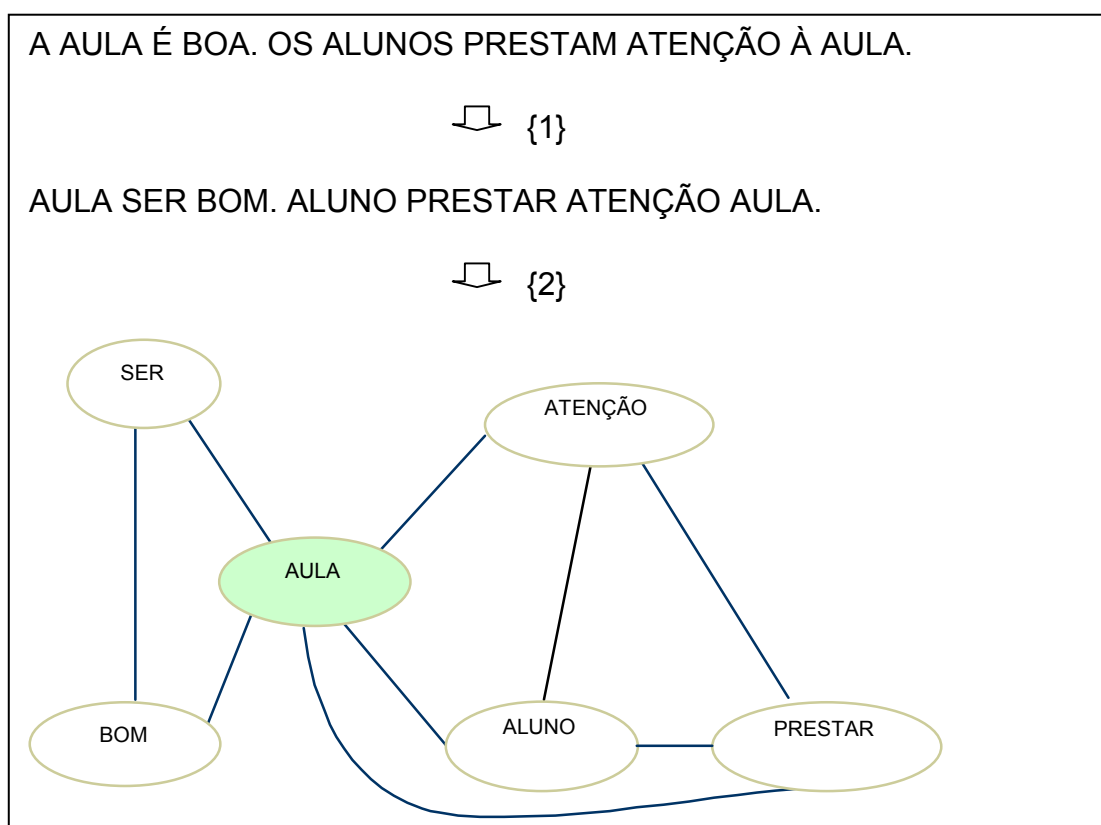


Figura 12 - Exemplo de uma construção de rede de palavras

{1} – Pré-tratamento e análise do texto. Dessa maneira, temos a representatividade das idéias que o autor está expressando.

{2} Construção da Rede.

Todas as palavras que co-ocorrem numa sentença estão ligadas, formando cliques⁶ individuais. Cliques individuais de cada sentença são formados, ligando todas as palavras de uma sentença entre si. Porém, caso ocorra uma palavra numa sentença que

⁶ Clique – uma rede ou sub-rede que possui todos os seus vértices interligados entre si. No caso específico de nossa análise, todas as sentenças formam um clique.

já tenha sido referenciada em sentença anterior, então não é repetida a palavra e, sim, todas as outras da sentença nova serão ligadas à palavra já referenciada no texto. No exemplo da Figura 12, a palavra aula foi repetida, e por isso se tornou o elo de ligação entre as duas sentenças. A essas palavras, dá-se o nome de *hubs* ou conectores, pois, através delas, podemos alcançar as outras palavras do texto, por caminhos mais curtos. Elas aproximam as palavras entre si.

Nessa etapa de construção das redes, foi gerado um arquivo com o formato PAJEK, contendo uma listagem de todos os vértices ou nós (palavras) que compõem a rede, numerados. Logo após essa lista de palavras numeradas, aparecem os relacionamentos representados por pares de números correspondentes às das palavras que estão sendo referenciadas nas sentenças do texto (Figura 13).

O formato PAJEK para construção de redes foi definido por Vladimir Batagelj e Andrej Mrvar, da University of Ljubljana, na Slovenia⁷. Trata-se de um formato livre, que permitiu tanto a construção quanto a análise posterior das redes pelos programas *NetPal* e *NetAll*. Eles também desenvolveram um programa com o mesmo nome, PAJEK (aranha em esloveno). Este programa⁸ é responsável por representar graficamente as redes criadas com o formato descrito acima, e é muito utilizado para análise de redes sociais. Nesta pesquisa será utilizado para a visualização gráfica das redes de palavras.

```
*Vertices 6
1 "chover"
2 "lá"
3 "coração"
4 "transbordar"
5 "alegria"
6 "contagiar"
*Edges
5 6
6 5
3 4
4 3
2 4
4 2
2 3
3 2
1 4
4 1
1 3
```

Figura 13 - Arquivo texto com a indicação dos pares das palavras

⁷ <http://vlado.fmf.uni-lj.si/pub/networks/pajek/>

⁸ Trata-se de um programa gratuito.

2.5 VISUALIZAÇÃO DAS SUBREDES

Para a visualização da subrede foi utilizado o programa PAJEK que, a partir da matriz adjacente representando as co-ocorrências das palavras, gera gráficos simples como o da Figura 14 ou mais sofisticados como o da Figura 15. Para conseguir uma subrede com essas características de *layout*, utilizam-se as configurações das opções de exportação como na Figura 19. O programa PAJEK baseia-se nos sociogramas, representações gráficas de estruturas de grupo. É uma maneira mais fácil de entender essas estruturas sem precisar de maiores explicações, por conta do seu forte apelo visual e sua clareza conceitual (NOOY, 2005).

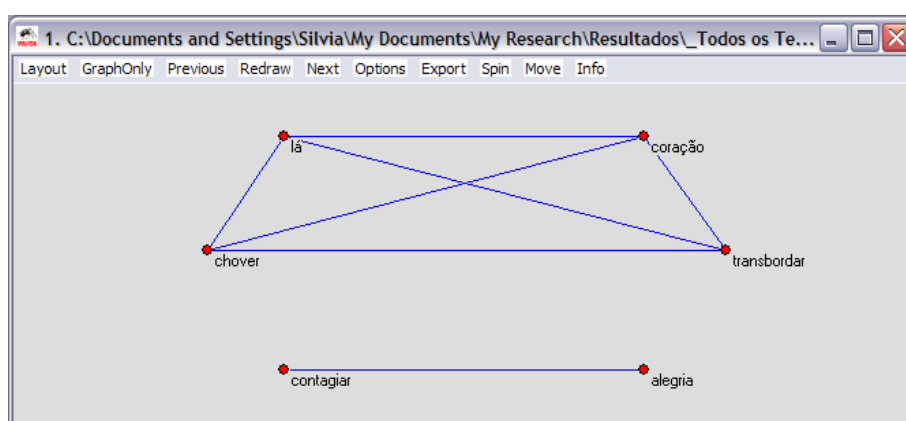


Figura 14 - Rede construída pelo programa PAJEK

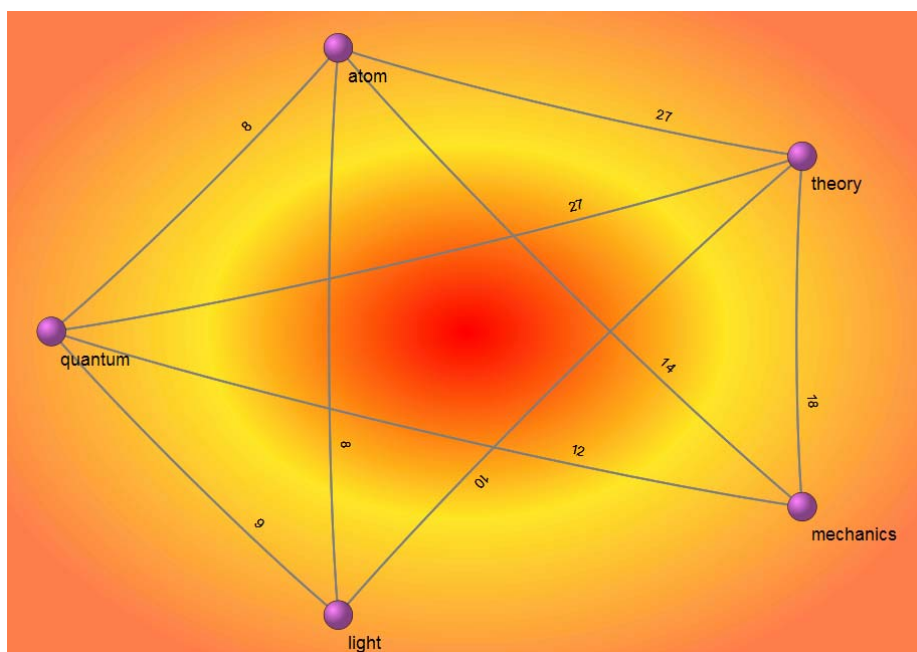


Figura 15 - Rede construída com o programa PAJEK e exportada como SVG

Normalmente os vértices representados no centro do gráfico são os que possuem maior frequência. Porém esse não é o único critério para definir a centralidade dos vértices.

Outro importante critério é o tipo dos vértices que se ligam a ele. Assim, os vértices centrais são aqueles que estão ligados a outros vértices com alta frequência também, o que em sociometria é a medida da popularidade. Assim, fazendo uma analogia, os vértices mais centrais são os que estão ligados aos vértices mais ‘populares’ (*ibidem*). Dessa forma, pode-se afirmar que um simples levantamento da frequência dos vértices – no nosso caso, palavras – não revela essa outra informação, ou seja, a qualidade das outras palavras ligadas a esta, conferindo às redes um importante papel na análise do conteúdo do texto.

O PAJEK oferece várias opções para a construção de uma rede. Para ser aberto, o arquivo deverá ter extensão .NET. Em seguida, o menu *Draw* (Figura 16) permite escolher a forma de traçar o gráfico da rede.

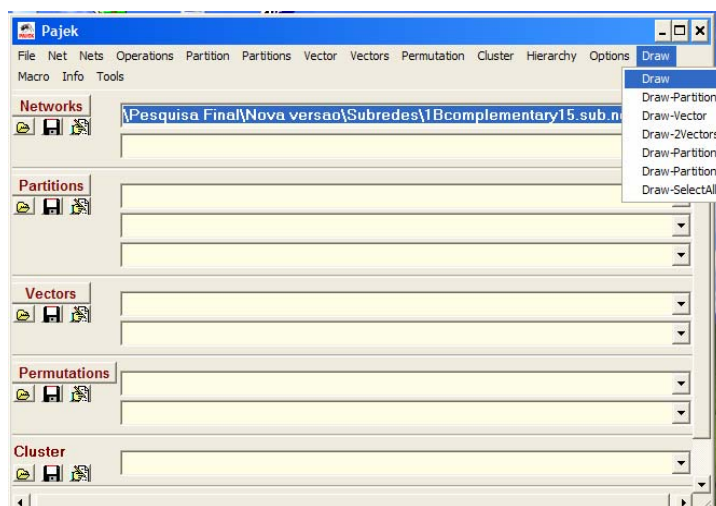


Figura 16 - Tela principal do PAJEK indicando o menu Draw

O formato padrão de rede do PAJEK é circular, conforme pode ser visto na Figura 17. Outra opção muito usada de formato de gráfico é o *Energy*. O comando *Layout > Energy* movimenta os vértices para posições que minimizam a variação do comprimento das linhas. Uma representação de fácil entendimento é imaginar que as linhas são elásticos que mantêm os vértices juntos, contudo nunca muito próximos. Os comandos *Energy* ‘arrastam’ os vértices para uma melhor posição, até que estejam em um estado de equilíbrio. Em todos os gráficos de subrede dessa pesquisa utilizei o formato *Kamada-Kawai* que é uma opção do comando *Energy* (Figura 18).

A opção *Kamada-Kawai* produz resultados com distâncias mais regulares, especialmente em redes pequenas, que é o caso das nossas subredes de palavras. Seus resultados são os mais estáveis das opções automáticas. Utilizei a opção *Free*, para

eliminar qualquer fonte de interferência externa ao resultado da rede, deixando que o programa decidisse automaticamente qual a palavra que iria ser colocada no centro do gráfico. Usar procedimentos automáticos para desenhar as subredes é o modo mais eficiente para traçá-las, pois os resultados estão mais independentes dos preconceitos e dos equívocos porventura cometidos pelo pesquisador.

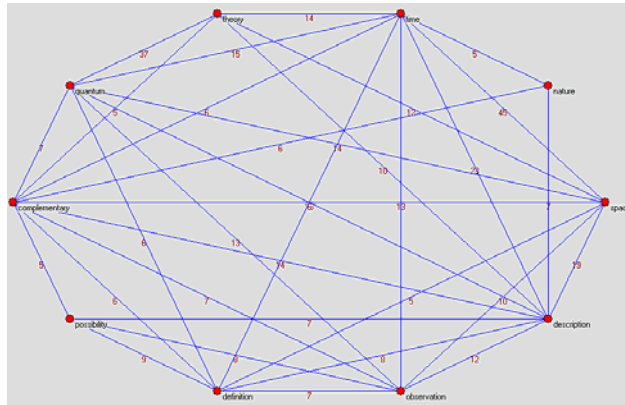


Figura 17 - Formato padrão de desenho da rede no PAJEK

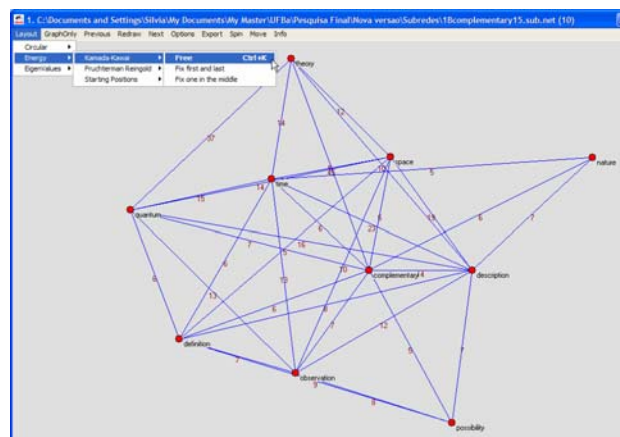


Figura 18 - Menu para escolha do formato Kamada-Kawai com opção *Free* e o gráfico resultante

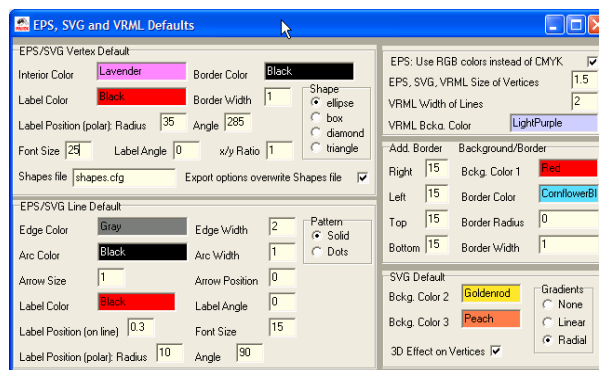


Figura 19 - Configurações para exportação de imagem no formato SVG

2.6 METODOLOGIA DE ANÁLISE DOS TEXTOS

Existem críticas quanto à eficiência da análise pura e simples da frequência de unidades lexicais e alguns autores afirmam que tal análise não é capaz de evidenciar o conteúdo do texto (PECHEUX *apud* GADET & HAK, 1993; CHARADEUUAU & MAINGUENEAU, 2006). Esses autores fundamentam sua crítica em dois aspectos. O primeiro diz respeito à não biunivocidade da relação significante-significado, ou seja, uma unidade lexical possui mais de um significado numa língua (ambigüidade) e, desta maneira, a repetição não necessariamente é indicativa de que há presença do mesmo conteúdo de pensamento.

A segunda crítica de Pêcheux quanto ao método freqüencial para a identificação do conteúdo do texto repousa sobre a incapacidade deste método de dar conta da complexidade do texto:

Mesmo que se multiplicassem as deduções freqüenciais, nem mesmo assim se daria conta da organização do texto, das redes de relações entre seus elementos: tudo se passa como se a superfície do texto fosse uma população na qual pudessem ser efetuados, assim, recenseamentos diferenciais; obtém-se uma descrição da população, tão fina quanto se deseja, mas os efeitos do sentido que constituem [seu] conteúdo são negligenciados (*ibidem*, p. 64).

Porém, Pêcheux admite a validade de “procedimentos prévios de decifração estatística” (*ibidem*, p. 153) para a demarcação inicial do campo das hipóteses. Assim, é nesse espaço que as investigações freqüenciais foram feitas neste trabalho. Serão empregadas várias técnicas freqüenciais, desde a mais simples, que corresponde à contagem de palavras do texto, até a contagem de pares de palavras. Irei especificar cada uma delas. Já a construção das subredes, para investigar as intenções do autor em relação a determinados conceitos, não pode ser considerada uma mera análise freqüencial, mesmo sendo baseada na frequência dos pares de palavras. A sofisticação metodológica de construção das subredes fornece informações difíceis de detectar numa simples contagem de palavras, ou até mesmo da frequência de pares de palavras.

- **Evolução temporal da frequência de palavra escolhida**

Tratou-se aqui de determinar a frequência de palavras de interesse, como por exemplo *complementarity* e *complementary*⁹, nos textos indicados no item 2.2, além de outros vocábulos relacionados, com a finalidade de identificar características indicativas da evolução do pensamento de Niels Bohr, a respeito da dualidade onda/partícula, registrado em alguns de seus textos sobre Física e Epistemologia.

Utilizando um processador de texto como o *Word*, fiz uma busca da palavra escolhida no texto, contando as ocorrências. Repeti essa operação com as palavras escolhidas e todos os textos, registrando em uma tabela no Excel todos os dados. Ao final, construí os gráficos de barra para serem analisados.

- **Frequência de palavras**

A primeira etapa da análise do texto com o intuito de determinar seu conteúdo foi o cálculo da frequência das palavras restantes após os tratamentos indicados até aqui. Trata-se de realizar o inventário das palavras do texto. Posteriormente, fiz um corte das primeiras 20 palavras que foram utilizadas na tentativa de identificação do significado do texto. A pergunta que guiou este procedimento foi: Podemos saber de qual assunto trata o texto, a partir desse inventário? O cálculo foi feito executando a linha de comando abaixo:

`NetPalFreq < arquivo entrada.txt> -net < arquivo saida.txt>`, onde:

`NetPalFreq` => nome do programa que calcula a frequência das palavras;

`<arquivo entrada.txt>` => esse arquivo é o resultado da etapa anterior de geração do arquivo da subrede, e seu nome original é `dlf.txt`;

`-net` => extensão de saída do arquivo final gerado (opções: `-txt`, `-xls`);

`<arquivo saida.txt>` => nome do arquivo final com as frequências calculadas.

O arquivo de saída contém todas as palavras do texto associadas à frequência. As informações registradas neste arquivo também poderão ser utilizadas para a análise da Evolução temporal da frequência de palavras escolhidas.

- **Frequência de pares de palavras**

⁹ Os textos analisados foram textos originais escritos na língua inglesa, portanto, os termos serão referenciados em inglês.

Mais um recurso quantitativo com a finalidade de melhor apreender as intenções do autor. Realizei o inventário dos pares de palavras, pois a co-ocorrência das palavras é mais elucidativa do sentido. Como os pares são formados a partir da presença das palavras em uma mesma sentença, a co-ocorrência traz um componente contextual para a análise. Trata-se de um recurso auxiliar para a inferência do tema, no texto analisado.

- **Subrede de palavras escolhidas**

O modelo computacional que escolhi para representar a construção dos textos foi o de redes complexas. À medida que construímos um pensamento a ser transcrito para o papel ou para a tela do computador, escolhemos palavras, que se ligam às anteriormente escolhidas, formando uma rede, como um reflexo aproximado dos significados que queremos transmitir.

A partir dessa premissa, propus outro método de análise de conteúdo dos textos que é a construção das subredes a partir de palavras específicas, com o objetivo de conhecer seus pares, ou seja, as palavras que co-ocorrem com a palavra escolhida nas sentenças.

Não interessa aqui obter a rede do texto completo, pois a intenção nesta etapa foi realizar uma demonstração visual da estrutura, em torno de palavras de significado especial para a matéria estudada, no caso a Física Quântica, tais como *wave*, *particle*, *complementarity*. Por isso, utilizei um programa capaz de, a partir de uma palavra fornecida, construir a subrede em torno dessa palavra.

Existe também a opção de indicar qual a frequência mínima que deve ter o par de palavras para que ela apareça na subrede. Essa opção evita a construção de subredes muito grandes, e que seriam pouco significativas para os conceitos referenciados, partindo-se do pressuposto de que palavras que co-ocorrem apenas uma vez não informam nada a respeito da importância de uma para a outra na construção conceitual do autor. Além disso, trabalhei com a possibilidade de escolher qual o diâmetro da subrede que me interessava a esta pesquisa. Em alguns tipos de subrede, a indicação das palavras que estão ligadas à palavra escolhida em segundo nível acrescenta informações importantes sobre o conceito que está sendo analisado. Devo dizer que não encontrei nenhuma referência bibliográfica sobre análise de conteúdo feita a partir da análise visual de redes construídas com base na frequência de palavras que co-ocorrem em sentenças.

Para construir a subrede, executei a seguinte linha de comando

SubRede <Original> <Saida> [nó] [Raio] [PesoMin] <ArqParesPesos>

SubRede => nome do programa que constrói a subrede;

<Original> => nome do arquivo original que se deseja estudar a subrede;

<Saida> => nome arquivo de saída com dados da subrede. (extensão .net);

[nó] => indicar a palavra de interesse (ex.: *wave*);

[Raio] => qual o tamanho do caminho máximo da subrede desejada;

[PesoMin] => quantidade mínima de ligações. As palavras com número de conexões abaixo do valor especificado não foram exibidas na subrede;

<ArqParesPesos> arquivo com o cálculo da frequência dos pares das palavras (extensão DAT ou XLS).

- **Comparação de subredes**

Após a construção das subredes de palavras escolhidas para cada texto especificado, fiz a comparação entre elas. As informações fornecidas por essas comparações foram de grande valor para o entendimento dos textos. Conceitos que demonstraram centralidade em um texto aparecem, por exemplo, na periferia da subrede de um outro texto indicando a importância diferenciada que o autor dava aos conceitos em textos diferentes.

Todos os métodos de análise aqui apresentados, evolução temporal de frequência, frequência de palavras e pares, subrede de palavras e comparação de subredes, possuem uma etapa final em comum referente à interpretação dos resultados numéricos e gráficos por inferência.

2.7 INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS POR INFERÊNCIA

Nem o lingüista que opera com Análise de Discurso nem o ouvinte leigo, têm acesso direto ao significado pretendido pelo falante ao produzir uma enunciação; frequentemente, ele tem que utilizar um processo de inferência para realizar uma interpretação das enunciações ou da conexão entre elas (CHARAUDEAU & MAINGUENEAU, 2006).

A noção de inferência é encontrada na lógica formal, que emprega esse termo para designar a operação de considerar verdadeira uma proposição em razão de seu laço com outras proposições verdadeiras. A inferência é uma atividade de raciocínio que possui como casos particulares a dedução e a indução. A dedução é o processo de particularizar um comportamento ou característica, a partir da constatação dos mesmos de forma generalizada. Por exemplo, se dissermos que todos os brasileiros falam português, logo, deduzo que Maria, que mora no Brasil, também fala português. A inferência indutiva, pelo contrário, é o processo de prever comportamentos ou características generalizadas a partir de observações mais restritas. Por exemplo, se afirmo que todos os meus vizinhos falam português, logo, induzo que todos os habitantes da minha cidade também falam português.

Para Krippendorff (2006), ainda existe uma terceira forma de inferência, a abdução, que faz a relação entre comportamentos e características de um tipo particular para outro tipo particular. O autor indica que este tipo de inferência é o mais importante para a análise de conteúdo, onde a relação é feita entre o texto e as respostas às perguntas do analista, de forma restrita.

Para a filosofia da linguagem, a comunicação humana é intencional e nem sempre as enunciações têm sentido explícito. Os envolvidos no processo de comunicação produzem inferências que permitem de um lado acrescentar sentidos implícitos aos enunciados, e de outro separar os sentidos implícitos individuais da leitura e interpretação feita, ao estabelecer uma relação entre os enunciados e os dados do contexto e da situação da enunciação (CHARAUDEAU & MAINGUENEAU, 2006).

Quando se trata da análise do discurso, as inferências vão além dos dados estritamente lingüísticos e tentam “integrar ao cálculo inferencial os dados da situação de comunicação e de um saber interdiscursivo, [...] centrando-se no estudo do ‘subentendido’” (CHARAUDEAU & MAINGUENEAU, 2006, p. 275). A inferência, então, é o “processo interpretativo que consiste em colocar em relação o que é dito explicitamente com outra coisa além desse dito” (CHARAUDEAU & MAINGUENEAU, 2006, p. 277) e, a depender da natureza desta outra coisa, pode ser do tipo inferência contextual – a análise considera os outros enunciados; inferência situacional – a análise considera os dados da situação, além do texto; inferência interdiscursiva – a análise mobiliza um saber pré-construído que se encontra na ‘memória conceitual’.

Estes foram os procedimentos metodológicos utilizados na pesquisa. Além da tecnologia computacional desenvolvida para o tratamento dos textos, abordei as preocupações teóricas quanto aos aspectos lingüísticos que utilizei na pesquisa. Em especial a diferenciação entre palavras gramaticais e lexicais, e a preocupação em considerar a forma como construímos o texto segmentando-o em sentenças, para definir o critério da co-ocorrência. Outra preocupação minha neste capítulo foi demonstrar que a computação somente não é capaz de produzir uma análise do discurso. Há de se valer do gênio humano aplicando a técnica de raciocínio da inferência para se conseguir informações que estão além do texto. Seja na análise de conteúdo como na análise de discurso.

Em seguida, farei a demonstração da aplicação da metodologia desenvolvida para esta pesquisa mas antes me proponho a discutir as suas condições de produção, analisando os textos em seu contexto e a situação existente na época em que foram produzidos.

CAPÍTULO III

ANÁLISE DE TEXTOS DE NIELS BOHR

Esta pesquisa não tem a pretensão de trazer novidades a respeito do trabalho desenvolvido por Niels Bohr na construção da Mecânica Quântica, nem de levantar fatos históricos relevantes sobre o período. A intenção é construir um instrumento capaz de retirar dos textos produzidos por Bohr informações relevantes, através da análise de sua estrutura, usando o modelo de redes para representá-los. Apresento aqui considerações sobre a atuação de Bohr em seu percurso como físico, e especificamente sobre os períodos em que os textos foram produzidos, a fim de fornecer um panorama das condições de produção das relações de sentido de seus textos. Em seguida, demonstro os resultados alcançados com a aplicação das técnicas propostas.

3.1 A FÍSICA QUÂNTICA DE BOHR

Apelidado de ‘mentor da teoria quântica’, por Arnold Sommerfeld, em 1921, Bohr teve dois momentos importantes em sua história de físico proeminente nos estudos do comportamento dos átomos. Um, em 1913, quando complementou o modelo de Rutherford que propunha que os elétrons giravam em torno do núcleo atômico em órbitas bem definidas, os estados estacionários, indicando que eles se movimentavam de um estado para o outro através dos saltos quânticos. Conhecendo-se a órbita inicial e a órbita final, e medindo-se as características da emissão de radiação ocorrida em cada salto, Bohr foi capaz de identificar o elemento analisado. Seu estudo inicial foi feito com o átomo de hidrogênio, cuja estrutura atômica é formada por apenas um elétron, sendo mais fácil tirar conclusões dos experimentos.

Após essa descoberta inicial, que lhe rendeu o prêmio Nobel, muitos outros experimentos foram realizados neste campo, baseando-se nas proposições matemáticas feitas por Bohr, com o intuito de identificar os elementos a partir de seus espectros de radiação emitida ou absorvida, dependendo do experimento.

À medida que estes elementos apresentavam estruturas mais complexas, ou mesmo quando havia interação de mais de um elemento, as conclusões já não pareciam tão claras como ocorrera em relação ao átomo do hidrogênio. Essa situação mais complexa

deu lugar a dificuldades em associar os dados experimentais às proposições matemáticas utilizadas para descrever os estados estacionários e os saltos quânticos que os elétrons apresentavam de um estado para outro, associando-os às linhas espectrais. Essas dificuldades levaram os físicos a novas proposições teóricas como a feita por Louis de Broglie, em 1923, sugerindo que o elétron poderia também se comportar como uma onda, numa relação inversa ao sugerido por Einstein para o fenômeno da luz, tratada até então como uma onda e que foi descrita como partícula (fóton). Porém, de Broglie não deu provas matemáticas do que estava sugerindo. A formulação matemática desta proposição somente surgiu em 1925, quando Heisenberg apresentou a sua teoria da Mecânica das Matrizes.

Vale a pena averiguar com maiores detalhes o período entre 1924-25, pois o horizonte da Física Atômica estava um tanto quanto nublado, com muitos dados experimentais sendo produzidos e cujas explicações teóricas nem sempre eram possíveis.

No ano de 1924 Bohr dedicou-se, praticamente, à ampliação do Instituto que fundou em Copenhague como um centro especializado para a discussão da Física Teórica e Experimental, e que atraía físicos do mundo inteiro. Em busca de financiamento internacional, Bohr realizou várias viagens, principalmente aos Estados Unidos, onde conseguiu a verba desejada para a ampliação do centro, junto ao *International Education Board*. Ele era o mentor do grupo, “no sentido daquele que dá a direção, não somente por suas próprias pesquisas, mas também pela inspiração a outros pesquisadores” (PAIS, 1993, p. 269). Tanto que nos anos de 1925 e 1926, Bohr não gerou nenhuma das idéias que o interessou apaixonadamente, e que se tornaram os fundamentos da nova teoria quântica. Mas ele continuava sendo o guia dos novos físicos que visitavam o Instituto em Copenhague.

Em 1924, conflitos entre as novas regras quânticas e a teoria clássica tornaram-se evidentes. A crítica às órbitas atômicas era uma constante, pois havia uma contradição latente na suposição de que os elétrons descreviam órbitas bem definidas em volta do núcleo. Isso porque se realmente essas trajetórias fossem seguidas pelos elétrons, com o tempo haveria perda de energia, fazendo com que eles se aproximassem cada vez mais do núcleo até chocarem-se, provocando uma ‘catástrofe atômica’. Essa conclusão, baseada nos princípios da Física clássica, sugeria uma instabilidade do átomo que, decididamente, não era observada. O átomo era estável (*ibidem*, p. 270-2).

O desconforto entre os físicos era de tal ordem que podemos constatá-lo num comentário feito por Pauli, uma espécie de despedida à velha teoria quântica: “A Física está... muito difícil para mim e eu desejei estar num filme de comédia ou algo assim e que nunca tivesse ouvido qualquer coisa sobre a Física! Agora eu espero que Bohr nos salve a todos com uma idéia nova. Eu peço, urgente, que ele faça isso” (*ibidem*, p. 275).

O ano de 1924 também significou a primeira estada de Heisenberg no Instituto em Copenhague. Com apenas 23 anos de idade, ele já possuía 20 artigos publicados sobre a teoria quântica, como autor ou co-autor juntamente com Sommerfeld e Max Born. Chegou em setembro de 1924 e em abril do ano seguinte estava de volta à Alemanha. Após a experiência enriquecedora de estar em contato com Bohr e Kramers, trabalhando com a formulação matemática dos estudos de Bohr sobre a polarização da luz fluorescente, Heisenberg dedicou os três meses seguintes à ‘criação da Mecânica Quântica’.

Um mês após a publicação do artigo de Heisenberg, Bohr faz uma conferência no *Scandinavian Mathematical Congress*, em Copenhague, onde realiza um apanhado da situação da Física Quântica até o ano de 1925, evidenciando as dificuldades que os físicos estavam enfrentando com as inadequações entre a teoria e os resultados encontrados com os espectros atômicos. Neste artigo, a intenção de Bohr é propor a teoria de Heisenberg como uma explicação racional da Mecânica Quântica. Trata-se do primeiro artigo analisado nesta pesquisa, o texto **1A** – “Atom Theory and Mechanics”.

Em 1927, no Congresso Internacional de Físicos em Como, Itália, na comemoração do centenário de morte de Alessandro Volta, Bohr apresenta pela primeira vez a palavra Complementaridade como conceito que iria dirimir dúvidas sobre a interpretação do comportamento dual do elétron evidenciado pelas teorias de Heisenberg, com a sua mecânica das matrizes, e de Schrödinger, com sua equação de onda. Logo após o Congresso, Bohr publica o artigo intitulado “The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Theory”, que se constituiu em nosso segundo texto de análise, o texto **1B**.

O texto **4D** – “Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be considered Complete?” foi publicado em 1935, como resposta a artigo com mesmo nome, escrito por Einstein, Podolsky e Rosen. O próprio resumo constante no artigo indica as intenções de Bohr ao escrever essa resposta:

It is shown that a certain “criterion of physical reality” formulated in a recent article with the above title by A. Einstein, B. Podolsky and N. Rosen contains an essential ambiguity when it is applied to quantum phenomena. In this connection a viewpoint termed “complementarity” is explained from which quantum-mechanical description of physical phenomena would seem to fulfill, within its scope, all rational demands of completeness¹⁰ (Bohr *apud* FAYE & FOLSE, 1998, p. 73).

Esse texto marca o final do diálogo travado entre Bohr e Einstein, porém a controvérsia durou até o fim da vida de ambos. As dificuldades de interpretação sobre o tema se estendem até os dias atuais, e trata-se de um assunto que está longe de sua resolução completa.

O texto **4E** – “Causality and Complementarity” foi o primeiro ensaio filosófico de Bohr após o evento do EPR, intitulado “Causalidade e Complementaridade”, e foi apresentado no Segundo Congresso Internacional para a Unidade da Ciência, ocorrido em junho de 1936 e publicado no ano seguinte em inglês, alemão e dinamarquês. Nesse texto, ele primeiro revisa com mais clareza sua visão de ‘desordem’, cuja interpretação foi sugerida por ele próprio na década de 1920, onde as relações de incerteza eram meramente limitação epistemológica naquilo que pode ser chamado de ‘interação incontrolada’ sobre o objeto de investigação (FAYE & FOLSE, 1998).

Não está claro se Bohr era inclinado a concordar com a visão anterior, porém, após o EPR, ele aceitou que “as situações da Física Atômica privam de todo significado tais qualidades inerentes que a idealização da Física clássica atribuía a tais objetos” (FAYE & FOLSE, 1998, p. 3).

A seguir serão mostradas algumas condições históricas, sociais e técnicas referentes ao período em que os textos analisados foram escritos. Pretendo levantar as condições de produção dos textos com o intuito de subsidiar a posterior análise dos textos com a técnica aqui apresentada.

- **Considerações sobre o contexto do texto 1A**

¹⁰ Tradução: Demonstra-se que certo "critério de realidade Física" formulado em um artigo recente com o título acima de A. Einstein, B. Podolsky e N. Rosen contém uma ambigüidade essencial quando aplicado aos fenômenos quânticos. Nesta conexão um ponto de vista denominado "complementaridade" é explicado, a partir do qual a descrição mecânica-quântica de fenômenos físicos pareceria cumprir, dentro de seu escopo, todas as condições racionais de completude.

O texto, como já foi dito, faz um balanço da Física Quântica até então. Evidencia a importância do princípio da correspondência, que pretende correlacionar as variáveis medidas no mundo quântico ao mundo macroscópico, mas ao mesmo tempo traz à tona as dificuldades que esse princípio encontra ao tentar explicações do comportamento de suas medidas para átomos com vários elétrons. Toda essa reflexão tem como base dados experimentais, ou seja, os espectros dos elementos.

Se considerarmos que no início de um texto o autor faz uma apresentação dos objetivos que deseja alcançar, podemos concluir, a partir da leitura do texto 1A, que Bohr tinha intenções de discutir a importância da mecânica clássica não só para o desenvolvimento da própria Física como para o desenvolvimento da matemática pura. Obviamente, ele visava a uma conexão entre o seu campo de conhecimento e o da audiência, os matemáticos. Este foi o mote para a construção de seu discurso. Mas a intenção última para o texto era discutir o princípio da correspondência, apresentando suas dificuldades e a superação das mesmas, a partir do novo horizonte que estava se descortinando com a descoberta da equação de Heisenberg, que ele denomina de nova mecânica quântica.

- **Considerações sobre o contexto do texto 1B**

O ano de 1926, anterior àquele em que Bohr propôs o princípio interpretativo dos resultados experimentais da Física Quântica, foi-lhe muito profícuo. Na ocasião, o Instituto de Copenhague recebeu visitantes famosos por suas descobertas referentes à Física Quântica, que contribuíram com grandes discussões sobre o tema. Apesar de não existir nenhum texto desse período na coletânea analisada, torna-se necessário analisar o ano de 1926, pois as discussões citadas anteriormente contribuíram para a formulação de Bohr do princípio interpretativo proposto no ano seguinte.

Em setembro, Dirac visitou o Instituto e, apesar das divergências epistemológicas, caracterizadas pelo método indutivo de Bohr e o estilo matemático de Dirac (PAIS, 1993, p. 296), tiveram frutíferas discussões, para ambos, sobre a mecânica quântica.

Outro visitante que contribuiu para o amadurecimento das idéias de Bohr sobre o modo de interpretar o material experimental quântico foi Heisenberg, que permaneceu no Instituto no período de maio de 1926 a junho de 1927 quando desfrutou de grande intimidade com Bohr. Ele participou, quase até o final, do processo de busca de Bohr pela explicação do material experimental que havia surgido das pesquisas de Heisenberg e Schrödinger, sem descartar nenhuma delas.

Por fim, a presença de Schrödinger em outubro de 1926, marcou o começo de uma “nova fase na vida científica de Bohr: sua luta com a linguagem da Física Quântica que o levaria ao conceito *complementarity*” (*ibidem*, p. 300).

Essa sucessão de acontecimentos foi considerada por Pais (*ibidem*) como o prelúdio para a noção de Complementaridade, bem representada por um trecho de carta escrita para Kramers, onde Bohr adverte sobre a necessidade de tomar cuidado no uso da linguagem ao expressar conceitos da mecânica quântica:

São poucas as palavras que usamos e que são apropriadas para explicar os fatos empíricos, exceto quando aplicadas na maneira modesta característica da teoria da correspondência. Por isso eu busco uma teoria que permita um uso consistente da própria teoria em harmonia com o postulado fundamental da teoria atômica, por hora, onde eu tenho em mente uma explicação dos aspectos mais filosóficos e mais axiomáticos da teoria quântica¹¹ (BOHR *apud* PAIS, 1993, p. 300).

Schrödinger, Heisenberg e Dirac estiveram presentes no Instituto de Copenhague em 1926, e todas as discussões desta época giravam em torno da “noção não digerida da dualidade onda-partícula” (HEISENBERG *apud* PAIS, 1993, p. 301). Essa dualidade foi constatada no fenômeno da luz, quando Einstein, em 1905, notou que “sob certas circunstâncias a luz se comportava como um conjunto de partículas, fótons, e sob outras se poderia usar a descrição mais familiar da luz em termos de onda, pois esta continuava a ser irrefutável” (PAIS, 1993, p. 296).

Além disso, foi proposto por de Broglie, em 1923, que a matéria também apresentava a mesma dualidade, sendo posteriormente descoberta a mecânica de matriz partindo das partículas, por Heisenberg, e, finalmente, em 1926, Schrödinger propôs sua versão da mecânica quântica, partindo da teoria ondulatória.

Mas a dúvida ainda mantinha-se em Bohr. E as discussões sobre a interpretação Física da mecânica quântica, mais precisamente sobre o comportamento do elétron, continuaram até 1927, tendo agora somente Heisenberg como seu interlocutor.

¹¹ How little the words we all use are suitable in accounting for empirical facts except when they are applied in the modest way characteristic for the correspondence theory. By that I mean a theory which allows for a consistent use of the theory in harmony with the fundamental postulate of the atomic theory. For some time I have had in mind an account of the more philosophical and axiomatic aspects of the quantum theory.

Havia duas explicações matemáticas com incrível sucesso na descrição do comportamento do elétron: de um lado a mecânica de onda de Schrödinger; e de outro a mecânica de matriz pela adoção do quadro de partículas de Heisenberg. Porém, o paradoxo permanecia. O que estava faltando então?

Segundo Pais, esse paradoxo estava no centro das preocupações de Bohr e ele não podia imaginar que alguém pudesse encontrar-lhe uma resposta, mesmo tendo o melhor esquema matemático do mundo (PAIS, 1993, p. 302). Para Bohr, as explicações matemáticas não ajudavam em nada. Era importante primeiro entender como a natureza permitia contradições. Ele buscava uma forma de aceitar a existência simultânea dos conceitos, de onda e partícula, pois, embora mutuamente exclusivos, eram ambos necessários para uma completa descrição dos processos atômicos.

O que estava faltando era uma palavra. Uma palavra capaz de explicar essa existência simultânea dos dois conceitos, onda e partícula. Uma palavra que deixasse clara a necessidade de produzir os dois experimentos para explicar completamente os processos atômicos, porém sem que fossem realizados ao mesmo tempo, pois eram mutuamente exclusivos. Ou se analisava o átomo como partícula ou se analisava o átomo como onda, em cada uma das observações experimentais realizadas.

Conforme indiquei acima, a palavra *complementarity* foi citada publicamente pela primeira vez por Bohr, em setembro de 1927, numa Conferência realizada na Itália, por ocasião do centenário de morte de Alessandro Volta, e que gerou o segundo texto do volume I da coletânea analisada neste trabalho.

Naquele período, os métodos da mecânica quântica tinham alcançado um alto grau de perfeição em diversas aplicações no entendimento da Física atômica. Porém, havia grande divergência em como interpretar seus resultados. De um lado, a mecânica das matrizes explicava o comportamento do elétron como uma partícula. De outro, o grande sucesso da equação de onda de Schrödinger, que havia reacendido as esperanças dos físicos na descrição dos fenômenos atômicos de forma similar às teorias clássicas, sem introduzir ‘irracionalidades’ à explicação.

Tais irracionalidades eram indesejadas, apesar do postulado fundamental da indivisibilidade do *quantum* de ação ser ele próprio um elemento de irracionalidade, do ponto de vista clássico, que requer o abandono da descrição causal dos fenômenos, por causa da ligação entre o fenômeno e sua observação. Tal contradição forçou os físicos a

adotarem um novo modo de descrição chamado de *complementar* no sentido de que qualquer aplicação de um conceito clássico impediria o simultâneo uso de outro conceito clássico, sendo que ambos, em diferente conexão, são igualmente necessários para a elucidação do fenômeno.

O objetivo principal do artigo, segundo Bohr, é mostrar que

essa característica de complementaridade é essencial para uma consistente interpretação dos métodos teóricos quânticos. Heisenberg já havia introduzido esta questão quando demonstrou a conexão entre a limitada aplicabilidade de conceitos mecânicos e o fato de que qualquer medida que objetive traçar os movimentos das partículas elementares introduz uma inevitável interferência com o curso do fenômeno e assim inclui um elemento de incerteza que é determinado pela magnitude do quantum de ação (Texto 1A, p.11).

- **Considerações sobre o contexto do texto 4D**

A década de 1930 foi a mais profícua para Bohr, produzindo as três maiores contribuições para a Física nuclear. Ele desenvolveu uma nova teoria das reações nucleares, lançou um programa experimental em seu instituto para desenvolver a Física nuclear, e deu importantes contribuições à teoria da fissão nuclear. Além das contribuições para a Física nuclear, Bohr estava envolvido com aplicações experimentais na biologia, construção de um novo acelerador de partículas, levantamento de recursos para essas pesquisas e com a ajuda aos colegas cientistas expulsos da Alemanha.

A proposta de Bohr para a interpretação da dualidade onda-partícula não foi aceita com bons olhos pelos físicos da época, causando um grande rebuliço também entre os filósofos. Havia um sentimento de que essa interpretação era irracional e só poderia existir por causa de sua incompletude. Em 1935, Einstein fez o que pode ser chamado de contraproposta à complementaridade. Sua alternativa, que denominou ‘realidade objetiva’, foi apresentada em um artigo escrito conjuntamente com Boris Podolsky e Nathan Rosen, e que ficou conhecido como EPR.

Para Abraham Pais (1993), porém, a capacidade deste artigo em refutar o conceito de complementaridade era limitada, pois o EPR havia simples e corretamente concluído que sua definição de ‘realidade objetiva’ era incompatível com a hipótese de que a mecânica quântica é completa, e por isso este artigo é perfeito do ponto de vista da

lógica. Esse texto enfureceu Bohr, mas este sentimento não durou mais do que 24 horas. Na manhã seguinte, sorridente, dizia que tinha entendido a forma esperta da redação do trabalho e já planejava a resposta.

Três meses depois, Bohr submeteu uma crítica ao EPR para publicação. Sua refutação às críticas de Einstein não adicionaram nenhum argumento à concepção de complementaridade. Bohr não acreditava que o artigo EPR anunciava qualquer mudança na interpretação da mecânica quântica. Esse artigo marca o fim da controvérsia entre Bohr e Einstein, que permaneceu cético em relação ao princípio da complementaridade de Bohr até o fim de sua vida (PAIS, 1993).

Nesse artigo, Bohr evidencia a inadequação de aplicar o conceito de ‘realidade objetiva’ proposto no EPR aos fenômenos quânticos. Por outro lado, ele defende que o conceito de complementaridade é capaz de preencher todas as demandas de completude, explicando os fenômenos físicos, da mesma maneira que é usado para explicar os processos atômicos.

Bohr sinaliza que o conceito de ‘realidade Física’ não pode ser definido a priori por concepções filosóficas, mas sim a partir da relação direta com os experimentos e medidas. O instrumento de medida passa a ser integrante do fenômeno. Esse uso de Bohr para a palavra ‘fenômeno’ era inaceitável para Einstein, que acreditava que se devia encontrar uma formulação que permitisse a descrição dos fenômenos independentemente das condições da observação experimental.

- **Considerações sobre o contexto do texto 4E**

Bohr pode ser citado como criador da nova Física, diretor de pesquisa, fundador de um instituto, captador de financiamento, ajudante de refugiados, orquestrador da ciência experimental e difusor da ciência. Além disso, não podemos deixar de cita-lo como um dos maiores filósofos do século XX. Bohr publicou mais de 50 artigos científicos até 1927, ano da publicação do artigo sobre a complementaridade. Dessa data em diante até o final de sua vida, foram mais de 100 contribuições, sendo que 30 delas foram dedicadas à complementaridade, a sua maior contribuição à filosofia.

As primeiras preocupações filosóficas de Bohr não foram direcionadas às investigações da Física, mas sim considerações epistemológicas gerais sobre a função da linguagem na experiência de comunicação e de como evitar a ambigüidade. Essas preocupações

filosóficas fizeram parte de toda a vida de Bohr, e em muitas ocasiões ele incluiu em suas conjecturas filosóficas considerações sobre o tema da vida e do funcionamento da mente. Em 1932, Bohr publica o texto “Light and Life” onde, pela primeira vez formula a questão que o acompanhará até a sua morte: “É possível ‘forçar’ a análise dos processos vivos ao limite onde possam descritos em termos de pura Física e química?” Bohr retoma este tema no texto de 1937, ao dizer que “os novos desenvolvimentos na Física atômica podem ajudar-nos a decidir sobre questões como ‘visão mecanicista ou vitalista’ em favor de um ou de outro” (BOHR apud PAIS, 1993, p. 443).

Além das questões referentes à biologia, Bohr preocupava-se neste período em estender o conceito da complementaridade a outros campos do conhecimento humano tais como a psicologia, e a cultura. Em todas as suas considerações filosóficas, desde a sua adolescência até a sua morte, Bohr demonstra a necessidade do uso não ambíguo das palavras no ato da comunicação. A linguagem foi sempre o seu interesse, e pode ser resumida em suas próprias palavras:

De que os seres humanos dependem? Dependemos de nossas palavras. Estamos suspensos na linguagem. Nossa tarefa é comunicar experiências e idéias aos outros. Devemos nos esforçar continuamente para estender o escopo de nossa descrição, mas de tal modo que nossa mensagem não perca com isso seu objetivo ou caráter não ambíguo (BOHR apud PAIS, 1993, p. 446).

O ajuste de Bohr de suas afirmações filosóficas para essa formulação mais semântica, que rejeita a noção ‘metafísica’ do real, mas desconhece as propriedades dos objetos, está certamente em simpatia com a perspectiva positivista, e conduz Bohr a uma ‘virada lingüística’ na expressão da complementaridade. Refletindo essa mudança em sua perspectiva, daí em diante, Bohr altera suas últimas citações das relações de incerteza de Heisenberg de ‘relações de incerteza’ para a expressão ‘relações de indeterminação’ em suas publicações do pós-guerra (FAYE & FOLSE, 1998).

Essas são as considerações preliminares, com a intenção de demonstrar as condições de produção dos textos escolhidos para análise. As informações aqui levantadas serão retomadas à medida que forem sendo demonstrados os resultados da evolução temporal de frequência de palavra escolhida, análise frequencial de palavras e de pares de palavras e as subredes de palavras escolhidas.

3.2 EVOLUÇÃO TEMPORAL DE FREQUÊNCIA [PALAVRA ESCOLHIDA]

O objetivo nesta etapa do trabalho foi identificar a evolução da frequência de uso do termo *complementarity*, fazendo uma simples contagem das ocorrências da palavra nos textos escritos no período de 1925 a 1957. Além desse termo, a palavra *complementary* de mesma origem etimológica, foi usada como auxiliar na análise, pois *complementarity* não era utilizada no campo da Física¹² até então, sendo necessário uma similar que demonstrasse a evolução do uso do vocábulo como um conceito da Física Quântica.

Os textos analisados indicados na Tabela 4 fazem parte dos Volumes I a II da coleção “The Philosophical Writings of Niels Bohr”, escritos entre 1925 e 1957. O volume I é composto de um prefácio – descartado do estudo por ter sido escrito posteriormente e por não trazer contribuição para a análise do comportamento da unidade lexical ao longo do tempo – e quatro textos, escritos em 1925, 1927 e 1929 (2 textos escritos no mesmo ano). No volume II, encontramos o prefácio (também descartado pelos mesmos motivos) e sete textos escritos em 1932, 1937, 1938, 1949, 1954, 1955 e 1957. Assim, o volume I gerou quatro textos, denominados **1A** (1925), **1B** (1927), **1C** (1929) e **1D** (1929). O mesmo foi feito com o volume II, sendo acrescentadas as letras A, B, C, D, E, F e G após o número 2 para identificá-los, gerando sete textos para análise quantitativa.

Nesta análise prévia dos textos, apresento as frequências das unidades lexicais destacadas, ou seja, *complementary* e *complementarity*, nos 11 textos analisados, buscando correlacionar com eventos externos ao texto que expliquem tais comportamentos da frequência.

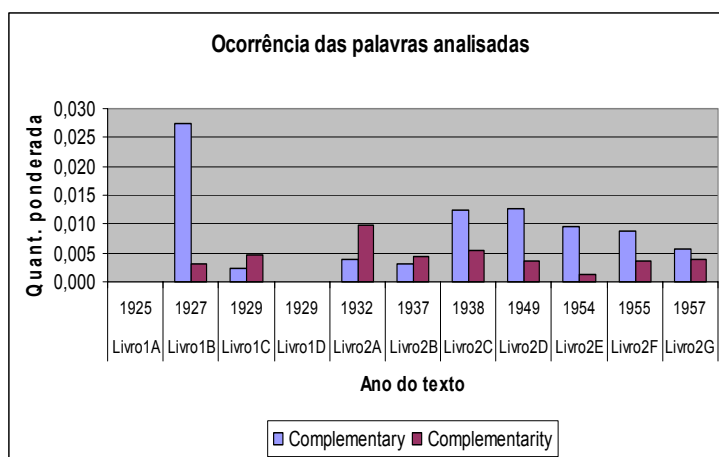


Figura 20 - Ocorrência das palavras analisadas em relação ao ano em que foi escrito o texto.

A Figura 20 mostra o valor ponderado (número de Ocorrência / número de unidades de Palavras do texto) da ocorrência das unidades lexicais *complementary* e *complementarity* utilizadas nos textos de Bohr escritos no período de 1925 a 1957.

Para análise dos resultados, serão confrontadas informações sobre fatos históricos relacionados aos períodos analisados, presentes no livro de Pais (1993) sobre a vida de Niels Bohr, e os textos de autoria de Bohr dos volumes I e II da coletânea *The Philosophical Writings of Niels Bohr*.

No texto escrito em 1925, cujo título original é “Atomic Theory and Mechanics” não é encontrada nenhuma ocorrência das unidades lexicais analisadas. Atribuo este comportamento ao fato de Bohr, nesta época, ainda não ter proposto o termo *complementarity* para descrever o comportamento peculiar dos experimentos físicos observados. O ano de 1925 foi justamente o ano em que foi formulada e apresentada a mecânica quântica. Ou melhor, segundo Pais, a mecânica quântica nasceu duas vezes: a primeira em 1925, com a mecânica quântica matricial de Heisenberg; e a segunda em 1926, com a versão ondulatória de Schrödinger (PAIS, 1993).

A palavra *complementarity* foi citada publicamente pela primeira vez por Bohr, em setembro de 1927. Esse texto foi o que apresentou a maior frequência do termo *complementary*, e duas ocorrências do termo principal de nosso estudo, *complementarity*. Como se trata de um novo conceito, Bohr usou o recurso de citar com frequência o termo *complementary*, a fim de criar uma referência conceitual com um termo já conhecido e poder, dessa maneira, introduzir o novo conceito.

Como explicitado no capítulo I, sobre abordagens de análise de textos, irei também analisar a ausência da palavra em estudo como um fator significativo para a análise. Assim, em 1929, temos outro momento em que essas unidades lexicais não aparecem, como mostrado no gráfico da Figura 20. A princípio, pareceu que o fator que explicaria essa ausência das unidades lexicais poderia ser a audiência para quem ele fez essa palestra e o objetivo da mesma. O artigo “The Atomic Theory and the fundamental principles underlying the Description of Nature” foi apresentado no Encontro Escandinavo de Cientistas Naturais, e tinha a finalidade de analisar o papel da teoria atômica na descrição da natureza.

12 O termo em francês surgiu em 1907, o adjetivo *complementar* aparece em gramática (1803), em ótica (1816), em geometria (1863), em aritmética (1869), e depois em pintura (REY, 1993)

A intenção de Niels Bohr nesse texto era mostrar a possibilidade de incluir a mecânica quântica como uma teoria capaz de explicar as leis características da vida. Porém, o conceito *complementarity* aplicado aos fenômenos naturais macroscópicos não era fácil de ser assimilado pela audiência. Bohr inicia o texto falando da instabilidade e variabilidade dos fenômenos naturais ao serem experimentados pelos nossos sentidos, e atribui às partículas atômicas a responsabilidade por esta instabilidade, não passível de percepção imediata por conta do diminuto tamanho do átomo.

Ora, falar do caráter hipotético da teoria atômica e argumentar que o avanço dos instrumentos de medida tem proporcionado a constatação experimental das teorias atômicas parece ser assimilável para o público alvo desta conferência. Porém, explanar sobre a dualidade dos fenômenos atômicos, atribuindo seu caráter ao processo de observação, não condiz com a forma como os fenômenos naturais visíveis são percebidos pelos nossos sentidos.

Como então explicar o conceito de Complementaridade a este público? Parece uma explicação razoável dizer que Bohr preferiu não trazer à tona o assunto nessa conferência. Mas essa atitude não seria coerente com o princípio da correspondência, conceito formulado pelo próprio Bohr, que busca por em paralelo as realidades do mundo quântico e do mundo clássico (macroscópico).

Existe, porém, um outro fato que devemos considerar. O ano de 1929 foi um ano de crise para a Física (PAIS, 1993, p. 364). Esse foi o ano do paradoxo de Klein, o ano em que Dirac propôs a sua teoria dos ‘buracos’, o ano em que os paradoxos referentes à estrutura nuclear surgiram, e foi também o primeiro ano em que se constatou que o espectro de energia dos elétrons emitidos pela β -radioatividade indicavam um novo mistério. Esses fatos, principalmente as novas idéias de Dirac, podem ter influenciado também na postura de Bohr em não utilizar a palavra *complementarity* já que eram descobertas que provocavam novas desordens e traziam novas dúvidas à mecânica quântica.

O artigo de 1932, “Light and Life” (BOHR, 1958, p.2-12), foi o que apresentou maior frequência da palavra *complementarity* e, no entanto, também tinha uma audiência composta por cientistas de outras áreas de conhecimento diferentes da Física. O objetivo desse texto era tratar o modo como a Física poderia contribuir para a explicação da vida,

partindo de uma explicação sobre as dificuldades em determinar a natureza da luz, pelo seu caráter dual onda-partícula.

A análise evolutiva demonstra que o uso da palavra *complementarity* aparece de forma muito tímida nos textos iniciais, inclusive desaparecendo em um dos textos do período de crise da Física no ano de 1929, e recrudescendo em 1932, no texto pós-crise, mantendo certa estabilidade nos textos seguintes. Porém pode-se notar que o termo *complementary* teve boa utilização no ano em que Bohr citou o termo principal de análise pela primeira vez (1927), indicando a necessidade de fazer uso de um conceito mais popular para que pudesse ser criado um novo termo para explicar um fato novo e curioso da Física nesse período, ou seja, a dualidade onda-partícula.

3.3 FREQUÊNCIA DE PALAVRAS

O programa desenvolvido para esta análise realiza a identificação e contagem de todas as palavras dos textos. Essa planilha de valores, então, é inserida no programa PAJEK, escolhido para a representação gráfica dos resultados, que permite construir gráficos coloridos, cujo tamanho dos círculos indicam a relação entre as frequências das palavras escolhidas, no caso, as que apresentaram frequência superior a dez ocorrências.

- **Texto 1A – Atom Theory and Mechanics**

As dez palavras mais frequentes do texto (Figura 21) foram: *atom, theory, mechanics, spectrum, state, electron, quantum, light, frequency e radiation*. A análise dessas palavras sugere algumas inferências sobre os recursos da argumentação do autor. Algumas delas encontram-se explicitadas no próprio título (“Atomic Theory and Mechanics”), cujas três palavras conceituais são as mais frequentemente citadas no texto. Porém a Matemática, centro da argumentação do primeiro parágrafo, não consta entre as palavras mais frequentes, levantando dúvidas quanto à eficiência da determinação do tema do texto baseada na frequência das palavras.

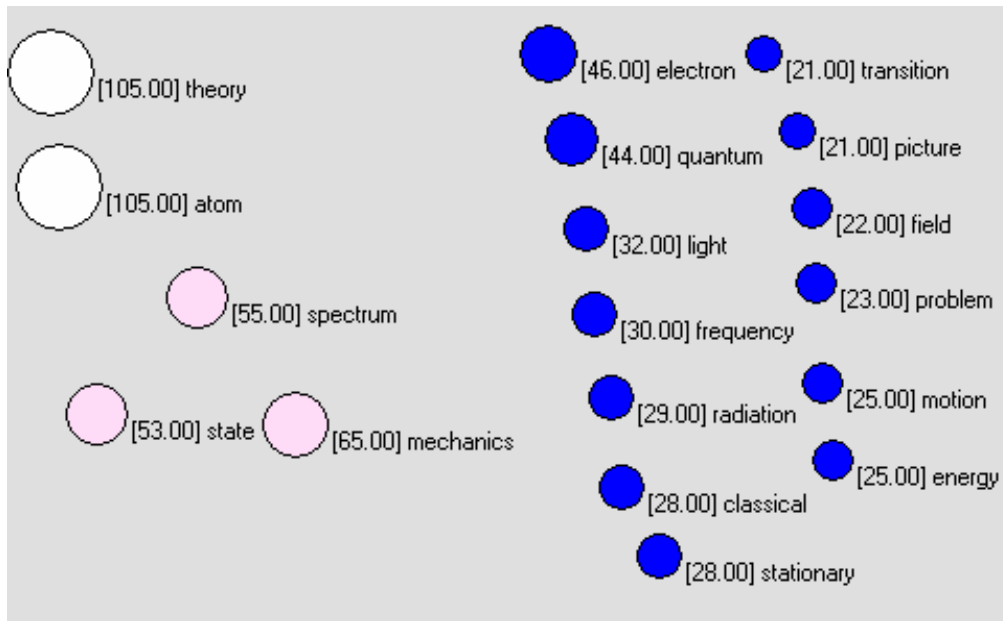


Figura 21 - Quadro da frequência principal das palavras do texto 1A.

O que significa a frequência dessas palavras no texto? Ousaria sugerir que se trata dos conceitos argumentativos que seriam utilizados pelo autor para construir seu pensamento. As palavras mais frequentes seriam as mais familiares para o autor, cujos significados são dominados por ele. A partir delas, o tema é desenvolvido, não sendo este, então, evidenciado pelos conceitos mais frequentes.

As demais palavras também indicam os argumentos usados pelo autor, já que os dados experimentais [*spectrum*] serão a base para toda a demonstração da explicação dos estados [*state*] estacionários [*stationary*] onde os elétrons [*electron*] se encontram, e que podem ser observados indiretamente através da luz [*light* e *radiation*] quando passam de um estado para outro [*transition*]. Toda a argumentação de Bohr refere-se aos resultados experimentais encontrados pelos físicos e a dificuldade em relacioná-los ao princípio da correspondência.

- **Texto 1B - The Quantum Postulate and the Recent Development of Atom Theory**

O texto **1B** foi escrito em 1927 e é o registro da primeira citação pública de Bohr do termo *complementarity*. A palavra mais frequente do texto (Figura 22) é a palavra *quantum*, se contrapondo à palavra *atom* do texto anterior. Existiam diferenças, no pensamento de Bohr, entre os termos *quantum* e *atom*? Por que a incidência maior de *quantum* no segundo texto? Além disso, a intenção explicitada pelo autor no primeiro

parágrafo do texto é de levantar os questionamentos sobre o estado da Física Quântica nesse período. No texto, especificamente, as intenções do autor coincidem com as palavras mais freqüentes, *theory* e *quantum*.

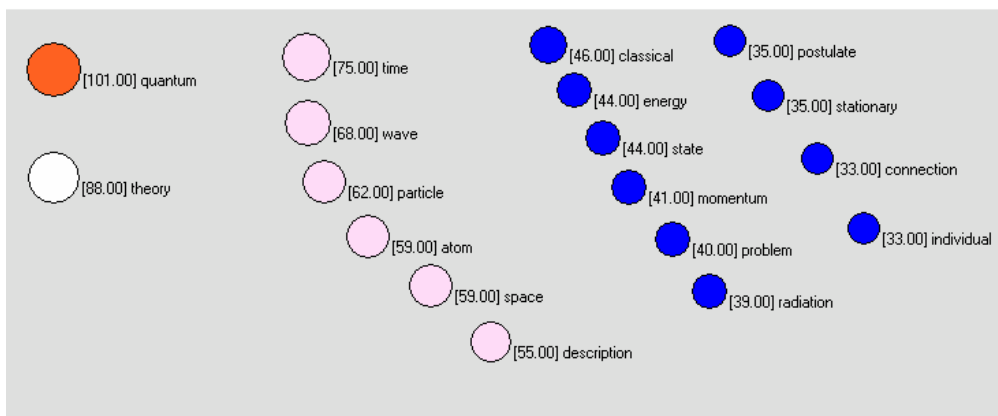


Figura 22 - Quadro da freqüência principal das palavras do texto 1B.

As outras palavras mais freqüentes são pertinentes para inferir sobre as proposições da argumentação do autor na discussão do tema proposto, onde a descrição [*description*] espaço-temporal [*space* e *time*] do comportamento do elétron como onda [*wave*] ou partícula [*particle*] será exaustivamente discutida.

- **Texto 4D - Can Quantum Mechanics Description of Physic Reality Be Considered Complete?**

As palavras mais freqüentes do texto (Figura 23), *particle* e *momentum* são elucidativas para indicar o teor da argumentação que Niels Bohr irá utilizar para responder às críticas feitas no artigo EPR. Associadas às outras palavras, como *diaphragm*, *slit*, *experimental*, *arrangement*, *description*, *position measure*, *phenomenon* etc, indicam o caráter descritivo dos experimentos como sendo a argumentação usada pelo autor para fazer a defesa das suas idéias.

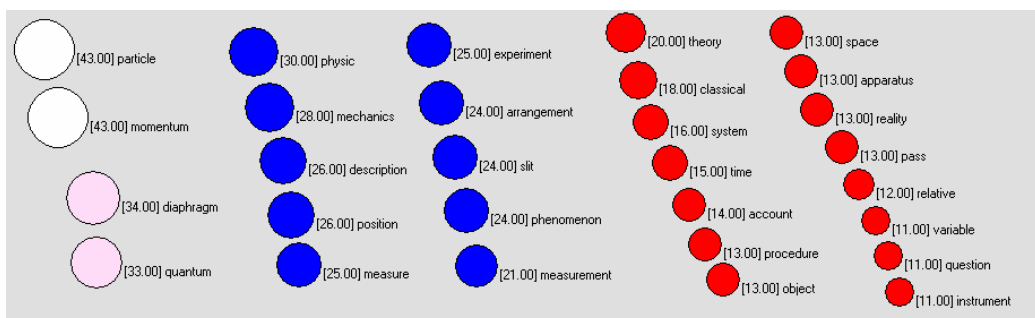


Figura 23 – Quadro de freqüência principal das palavras do texto 4D.

Essa formulação do texto a partir da descrição do comportamento do átomo pode ser exemplificada por duas passagens do texto original:

the question of principal interest for our discussion is now to what extent the **momentum** thus exchanged can be taken into account in the description of the phenomenon to be studied by the experiment arrangement concerned, of which the passing of the particle through the slit may be considered as the initial stage.

[...]

The impossibility of a closer analysis of the reactions between the **particle** and the measuring instrument is indeed no peculiarity of the experiment procedure described, but is rather an essential property of any arrangement suited to the study of the phenomena of the type concerned, where we have to do with a feature of individuality completely foreign to classical physics.

É necessário, porém, enfatizar que, nesse texto, Bohr pretende definir com clareza seu entendimento do conceito *fenômeno*, incluindo definitivamente o aparelho de medida à sua definição, e a importância que foi para ele o experimento da fenda dupla para a definição de complementaridade.

• Texto 4E – Causality and Complementarity

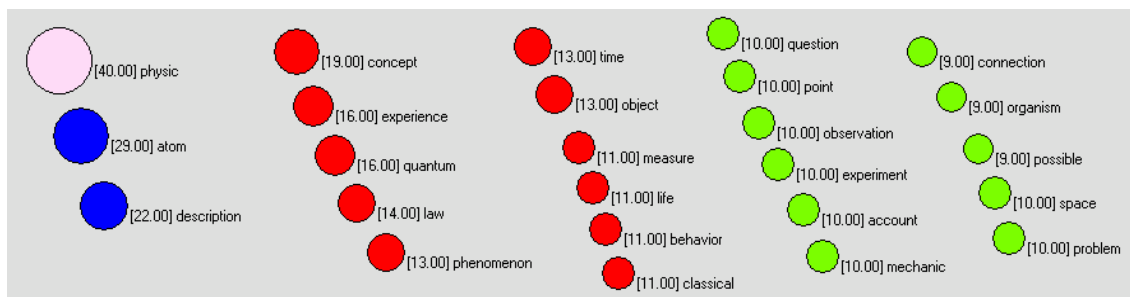


Figura 24 – Quadro de frequência principal das palavras do texto 4E.

Novamente considerei que as palavras mais frequentes são as utilizadas na argumentação do tema, embora muitas vezes não se refiram ao tema em si. As palavras *physic*, *atom* e *description* figuram como as mais frequentes (Figura 24), e são palavras que fazem parte do conhecimento de Bohr, utilizadas na construção de seu pensamento sobre os temas anunciados no título do artigo, *causality* e *complementarity*. É importante evidenciar, porém, que estas duas últimas palavras não apareceram no quadro de frequência.

A unidade da ciência era o objeto de sua explanação realizada no Segundo Congresso Internacional para a Unidade da Ciência. A Física, a Biologia e a Psicologia foram os ramos de conhecimento citados por Bohr, objetivando esclarecer como as descobertas da Física atômica poderiam ser úteis aos métodos de investigação das três citadas. *Concept e Experience* estão entre as mais freqüentes, indicando que, para Bohr, estudar o fenômeno teoricamente, elaborando conceitos para descrevê-lo, e investigá-lo a partir de experimentações, são faces da mesma moeda nas investigações científicas. Nomear os fenômenos é importante, porém deve vir acompanhado da descrição de como o fenômeno funciona.

3.4 FREQUÊNCIA DE PARES DE PALAVRAS

Esta técnica consiste em considerar as co-ocorrências das palavras nas sentenças, contabilizando quantas vezes ocorre. A análise freqüencial foi associada à análise das condições de produção do discurso e das relações de sentido do texto, buscando a normalidade das presenças dos conceitos, bem como o inusitado ou a ausência daqueles que seriam esperados.

- **Texto 1A - Atom Theory and Mechanics**

A rede completa do texto 1A gera 9540 pares de palavras. Fazendo uma amostragem dos 50 pares mais freqüentes, podemos notar a normalidade dos conceitos referenciados, ligados à Física, em quase todos os pares, exceto no par número 29 que traz as palavras *theory* e *difficulty* (Tabela 8) que, embora importantes para a construção das teorias não são conceitos cativos desta ciência. Seria plausível afirmar que a presença da palavra *difficulty* pode ser interpretada como indicativo da angústia de Bohr, com relação às dificuldades em adequar uma teoria explicativa dos dados experimentais que estavam sendo gerados?

A ausência da palavra *wave* entre os pares mais freqüentes foi notada, já que a dualidade onda-partícula anda não estava em evidência no ano de 1925. Lembro, mais uma vez, que na época de publicação deste artigo, a teoria de onda de Schrödinger ainda não havia surgido, e a mecânica matricial de Heisenberg sugeria uma ontologia de partículas. Veremos que no texto **1B**, escrito em 1927, após a proposta de Schrödinger

para a sua teoria de ondas do átomo, a palavra *wave* surge entre os pares mais freqüentes.

Tabela 8 - Freqüência dos primeiros 50 pares do texto 1A

1	<i>state-stationary</i>	27	26	<i>state-energy</i>	10
2	<i>theory-quantum</i>	26	27	<i>rule-quantization</i>	10
3	<i>theory-atom</i>	25	28	<i>theory-law</i>	9
4	<i>atom-state</i>	22	29	<i>theory-difficulty</i>	9
5	<i>atom-electron</i>	21	30	<i>theory-frequency</i>	9
6	<i>theory-classical</i>	19	31	<i>atom-energy</i>	9
7	<i>theory-mechanics</i>	17	32	<i>mechanics-property</i>	9
8	<i>mechanics-picture</i>	15	33	<i>light-quantum</i>	9
9	<i>atom-mechanics</i>	14	34	<i>spectrum-term</i>	9
10	<i>atom-stationary</i>	13	35	<i>stationary-transition</i>	9
11	<i>atom-radiation</i>	13	36	<i>x-ray</i>	9
12	<i>mechanics-state</i>	13	37	<i>theory-system</i>	8
13	<i>theory-state</i>	12	38	<i>theory-spectrum</i>	8
14	<i>mechanics-quantum</i>	12	39	<i>theory-picture</i>	8
15	<i>theory-stationary</i>	11	40	<i>theory-postulate</i>	8
16	<i>atom-spectrum</i>	11	41	<i>theory-energy</i>	8
17	<i>spectrum-line</i>	11	42	<i>theory-radiation</i>	8
18	<i>state-electron</i>	11	43	<i>theory-heisenberg</i>	8
19	<i>state-transition</i>	11	44	<i>atom-problem</i>	8
20	<i>theory-light</i>	10	45	<i>atom-system</i>	8
21	<i>atom-classical</i>	10	46	<i>atom-description</i>	8
22	<i>mechanics-motion</i>	10	47	<i>atom-light</i>	8
23	<i>mechanics-stationary</i>	10	48	<i>atom-quantum</i>	8
24	<i>principle-correspondence</i>	10	49	<i>atom-particle</i>	8
25	<i>spectrum-electron</i>	10	50	<i>atom-frequency</i>	8

- **Texto 1B - The Quantum Postulate and the Recent Development of Atom Theory**

A rede completa do texto gerou 12.252 pares de palavras, sendo demonstrado apenas os 50 pares mais freqüentes na Tabela 9. Como esperado, a palavra *wave* passou a figurar entre os primeiros 50 pares de palavras mais freqüentes; além disso, na Tabela 9, aparece em mais de um par! As explicações atômicas pós Schrödinger incluíam o caráter ondulatório do átomo, e o método empregado consegue captar esta mudança conceitual no discurso de Bohr.

As palavras *complementarity* e *complementary* não são as mais freqüentes do texto, porém a análise dos pares de palavras revelou essa citação da descrição complementar do comportamento dual do elétron e da luz figurando entre pares mais freqüentes.

Tabela 9 - Frequência dos primeiros 50 pares do texto 1B

1	<i>time-space</i>	45		26	<i>quantum-problem</i>	12
2	<i>quantum-theory</i>	37		27	<i>atom-theory</i>	12
3	<i>quantum-postulate</i>	33		28	<i>atom-stationary</i>	12
4	<i>state-stationary</i>	32		29	<i>theory-space</i>	12
5	<i>time-description</i>	23		30	<i>time-particle</i>	12
6	<i>quantum-classical</i>	20		31	<i>classical-concept</i>	12
7	<i>quantum-atom</i>	19		32	<i>description-observation</i>	12
8	<i>theory-classical</i>	19		33	<i>wave-schrödinger</i>	12
9	<i>description-space</i>	19		34	<i>energy-space</i>	12
10	<i>energy-momentum</i>	19		35	<i>particle-momentum</i>	12
11	<i>time-energy</i>	17		36	<i>space-momentum</i>	12
12	<i>quantum-description</i>	16		37	<i>quantum-state</i>	11
13	<i>quantum-time</i>	15		38	<i>quantum-concept</i>	11
14	<i>quantum-space</i>	14		39	<i>quantum-theoretical</i>	11
15	<i>atom-state</i>	14		40	<i>postulate-atom</i>	11
16	<i>theory-time</i>	14		41	<i>phenomenon-description</i>	11
17	<i>theory-wave</i>	14		42	<i>wave-momentum</i>	11
18	<i>description-complementary</i>	14		43	<i>wave-group</i>	11
19	<i>free-particle</i>	14		44	<i>radiation-particle</i>	11
20	<i>quantum-observation</i>	13		45	<i>quantum-light</i>	10
21	<i>time-observation</i>	13		46	<i>postulate-classical</i>	10
22	<i>time-wave</i>	13		47	<i>atom-particle</i>	10
23	<i>time-momentum</i>	13		48	<i>theory-description</i>	10
24	<i>wave-particle</i>	13		49	<i>theory-problem</i>	10
25	<i>quantum-wave</i>	12		50	<i>theory-matrix</i>	10

• **Texto 4D - Can Quantum Mechanics Description of Physic Reality Be Considered Complete?**

A rede completa do texto gerou 7.947 pares de palavras, sendo demonstrado apenas os 50 pares mais frequentes na Tabela 10.

Esse texto não apresentou surpresas ou informações inesperadas com a análise dos pares de palavras, do ponto de vista de novos conceitos ou mudança de associação dos conceitos já conhecidos com novos. Todavia, todas as ocorrências referem-se a palavras relacionadas à experimentação, aparelhos de medida, ao fenômeno e características físicas de um sistema mecânico. Esta é uma evidência de que Bohr, ao invés de propor novidades, se manteve no terreno argumentativo de Einstein, ou seja, buscando sua defesa não com novas proposições e, sim, dedicando-se a, exaustivamente, analisar o experimento EPR na tentativa de provar a sua inadequação argumentativa contra o conceito *complementaridade*.

Tabela 10 - Frequência dos primeiros 50 pares do texto 4D

1	quantum-mechanics	19		26	measure-momentum	10
2	particle-diaphragm	18		27	slit-momentum	10
3	particle-momentum	18		28	diaphragm-apparatus	10
4	experiment-arrangement	17		29	position-relative	10
5	diaphragm-momentum	17		30	quantum-experiment	9
6	particle-slit	15		31	quantum-classical	9
7	particle-position	15		32	quantum-theory	9
8	momentum-position	14		33	quantum-arrangement	9
9	quantum-description	13		34	phenomenon-experiment	9
10	description-phenomenon	13		35	phenomenon-arrangement	9
11	particle-pass	13		36	experiment-measure	9
12	slit-diaphragm	13		37	experiment-particle	9
13	quantum-physic	12		38	object-measure	9
14	physic-phenomenon	12		39	measure-arrangement	9
15	pass-diaphragm	12		40	arrangement-particle	9
16	mechanics-description	11		41	particle-relative	9
17	arrangement-momentum	11		42	pass-slit	9
18	diaphragm-position	11		43	pass-momentum	9
19	quantum-phenomenon	10		44	momentum-apparatus	9
20	quantum-measure	10		45	quantum-object	8
21	description-physic	10		46	mechanics-physic	8
22	physic-reality	10		47	mechanics-classical	8
23	experiment-diaphragm	10		48	description-measure	8
24	experiment-momentum	10		49	phenomenon-account	8
25	measure-instrument	10		50	experiment-slit	8

- **Texto 4E - Causality and Complementarity**

A rede completa do texto gerou 8.478 pares de palavras. A Tabela 11 mostra apenas os 50 pares mais frequentes. A análise dos pares das palavras demonstra uma preocupação de Bohr com novos conceitos, representados por *causality*, *behavior*, *relativity* e *life*. Além disso, alguns pares são bem significativos como *concept-experience*, *causality-ideal*, *physic-possibility*, *concept-description*, *physic-problem*, *physic-possible*, *behavior-account*, *point-view*, *description-causal*, *description-phenomenon*. Esses pares sugerem fortemente que, ao contrário do texto anterior, o foco de análise de Bohr está, não mais nas características dos experimentos, e sim em preocupações epistemológicas, referentes à descrição do fenômeno, do comportamento do objeto, como a causalidade, definindo conceitos, a fim de construir uma Física possível.

Tabela 11 – Frequência dos primeiros 50 pares de palavras do texto 4E

1	physic-atom	19	26	phenomenon-atom	6
2	physic-description	10	27	object-measure	6
3	space-time	10	28	observation-atom	6
4	physic-classical	9	29	quantum-action	6
5	physic-behavior	8	30	classical-atom	6
6	concept-experience	8	31	causality-ideal	5
7	description-atom	8	32	physic-quantum	5
8	behavior-object	8	33	physic-measure	5
9	physic-experience	7	34	physic-experiment	5
10	physic-phenomenon	7	35	physic-law	5
11	physic-object	7	36	physic-possibility	5
12	physic-account	7	37	physic-life	5
13	description-quantum	7	38	concept-description	5
14	description-mode	7	39	experience-description	5
15	theory-relativity	7	40	description-space	5
16	quantum-mechanic	7	41	description-connection	5
17	point-view	6	42	description-classical	5
18	physic-concept	6	43	description-measure	5
19	physic-problem	6	44	time-atom	5
20	physic-possible	6	45	causal-atom	5
21	physic-observation	6	46	theory-quantum	5
22	description-time	6	47	behavior-atom	5
23	description-causal	6	48	behavior-measure	5
24	description-phenomenon	6	49	behavior-account	5
25	relativity-quantum	6	50	object-account	5

A frequência de pares trouxe à tona palavras que pareciam importantes para a construção do pensamento do autor, e que não estavam presentes na análise frequencial pura. Algumas delas foram utilizadas como base para a construção das subredes de palavras.

3.5 SUBREDE DE PALAVRAS ESCOLHIDAS

A frequência apenas não é parâmetro suficiente para uma leitura mais aprofundada do texto. Os conceitos mais frequentes nem sempre estiveram associados à temática desenvolvida no texto, porém vale ressaltar que normalmente esses conceitos estavam relacionados ao título dado pelo autor. Os pares das palavras, no entanto evidenciaram características mais singulares aos textos. Assim, a partir desses pares surgiram as subredes referentes aos textos “Atom Theory and Mechanics”, “The Quantum Postulate and the Recent Development of Atom Theory”, “Can Quantum Mechanics Description of Physic Reality Be Considered Complete?” e “Causality and Complementarity”, que serão referenciados daqui em diante somente como **1A**, **1B**, **4D** e **4E**.

A rede completa do texto é uma estrutura complexa e não propicia uma análise visual do comportamento das palavras. Assim, optei por escolher algumas dessas palavras mais freqüentes para construção de subredes que trazem todas as palavras associadas a ela durante o texto, contando quantas vezes apareceram juntas na mesma sentença.

Para a construção dessas subredes é necessário informar três parâmetros: 1) a Palavra Central da subrede, a partir da qual foram separadas do texto original as palavras que fazem par com ela; 2) Peso Mínimo [PesoMin], que se refere à menor freqüência dos pares de palavras que deve ser considerada para inserir a palavra na subrede. Como exemplo, se fornecermos $\text{PesoMin} = 5$ significa que as palavras que estarão na subrede deverão co-ocorrer em sentenças com a palavra escolhida no mínimo 5 vezes. As palavras que co-ocorrerem 4 vezes ou menos estarão de fora da subrede e não aparecem no gráfico; 3) Raio refere-se ao diâmetro da subrede. Um Raio igual a 1 (um) significa que na subrede somente estará representada a palavra central e todas as palavras diretamente ligadas a ela e, é claro, que satisfaçam à condição do PesoMin . Se $\text{Raio} = 2$, as palavras ligadas indiretamente à palavra escolhida através de uma palavra também estarão representadas na subrede.

Na análise individual do texto, pude apenas evidenciar os conceitos que o autor evoca com mais freqüência associados à palavra escolhida, sendo a análise pobre em relação aos conceitos que surgem na subrede. Neste tópico, limitei-me a descrever somente as evidências, indicando as ausências e presenças significativas no texto **1A**. Porém, no tópico seguinte, de comparação das subredes, a análise passa a ser mais robusta, já que ficam evidenciadas as diferenças de pensamento de Niels Bohr em épocas distintas.

- **Subrede da palavra *mathematics***

Algumas características interessantes podem ser tiradas da análise dos resultados estatísticos obtidos do texto. Apesar de esse texto ter sido escrito para apresentação num congresso de matemáticos, e a ênfase inicial do pensamento estar voltada para enaltecer a contribuição mútua entre a Física e a matemática pura, não encontrei a palavra *mathematics* entre as mais freqüentes do texto, nem entre os pares mais freqüentes. Analisando a subrede (Figura 25), nenhuma informação mais reveladora pôde ser percebida. A subrede indica o papel da matemática como método no desenvolvimento da teoria quântica.

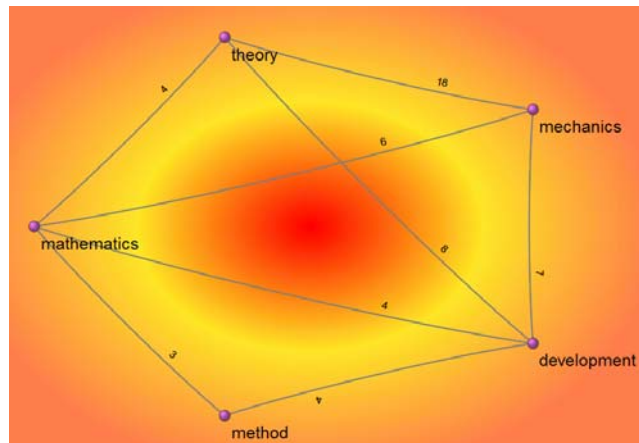


Figura 25- Subrede da palavra *mathematics* Texto 1A [Raio=1 PesoMin=3]

O método de trabalho de Niels Bohr consistia em analisar os fenômenos dos espectros de emissão de luz dos átomos, a partir de resultados de laboratório. Na biografia de Bohr, Abraham Pais (1993) ressalta a pouca participação de Bohr na proposição de novas idéias para a nova mecânica quântica. Essa dificuldade estaria relacionada à sua aderência à epistemologia fenomenológica, baseada em experimentos, e não ao desenvolvimento matemático que foi a base dessas proposições, principalmente a mecânica de matrizes de Heisenberg.

Poderia então este gráfico ser considerado uma evidência do método de trabalho de Bohr? Poderia ser uma evidência da preferência de Bohr em não utilizar os recursos matemáticos para sua elaboração teórica?

Este gráfico desperta curiosidade sobre a relação de Bohr com a matemática, o que poderá ser analisado posteriormente fazendo um estudo da evolução temporal do termo nos outros textos, usando o mesmo método de análise temporal do item 3.2.

- **Subrede da palavra *theory***

Na Figura 26, temos a representação gráfica das associações da palavra, *theory*. O programa constrói a subrede colocando no centro a palavra mais freqüente e, próximo a ela, as palavras que têm ligações com as mais freqüentes. Por isso, vemos a palavra *quantum* mais distante do centro, mesmo possuindo 27 ligações, enquanto a palavra *mechanics*, com apenas 18 ligações, está bem próxima da palavra estudada, *theory*. É digno de observação que esta última está associada a uma maior quantidade de palavras (quatro) e a palavra *quantum* somente está associada a uma palavra.

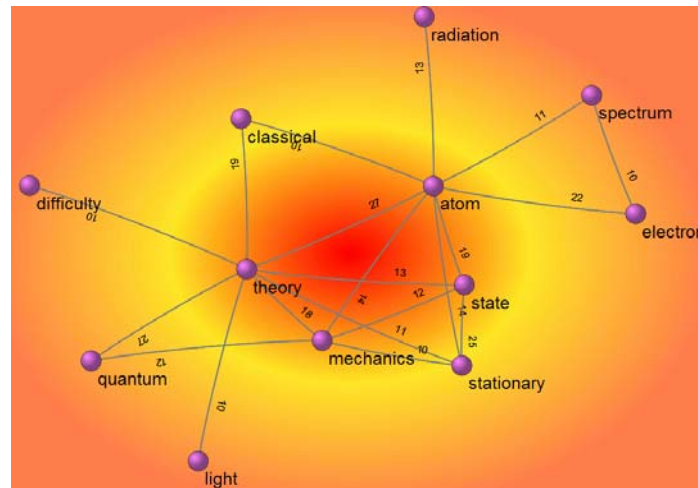


Figura 26 - Subrede da palavra *theory*. Texto 1A [Raio=2 PesoMin=10]

Teoria mecânica e teoria quântica são expressões diferentes para a Física? O gráfico sugere que Bohr faz uma escolha pelo primeiro termo, nesse texto de 1925, apesar dos dois termos não serem excludentes para a Física, aparecendo também as palavras *state*, *stationary* e *atom*, relacionadas às citações da palavra *theory* feitas por Bohr.

- **Subrede da palavra *Spectrum***

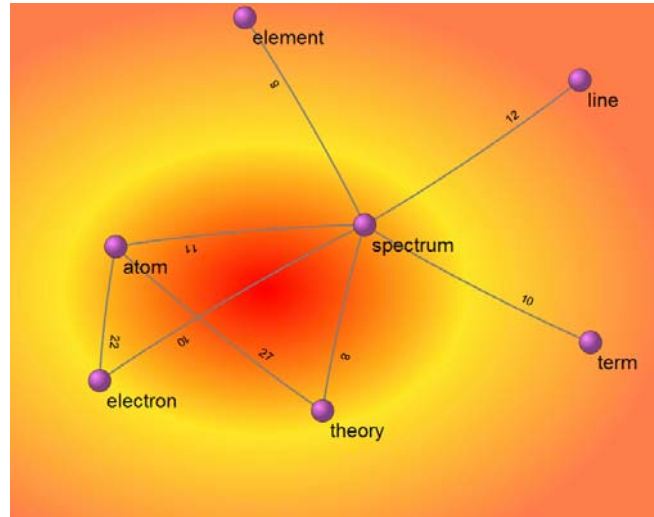


Figura 27 - Subrede da palavra *spectrum*. Texto 1A [Raio=1 PesoMin=8]

Na subrede da palavra *spectrum* (Figura 27) as palavras mais próximas são *theory* e *atom*. Para Bohr, os espectros desempenharam um papel relevante na construção da teoria atômica, e os dados experimentais correspondem ao suporte para suas proposições teóricas, e esta importância está evidente neste gráfico.

- Subrede da palavra *quantum*

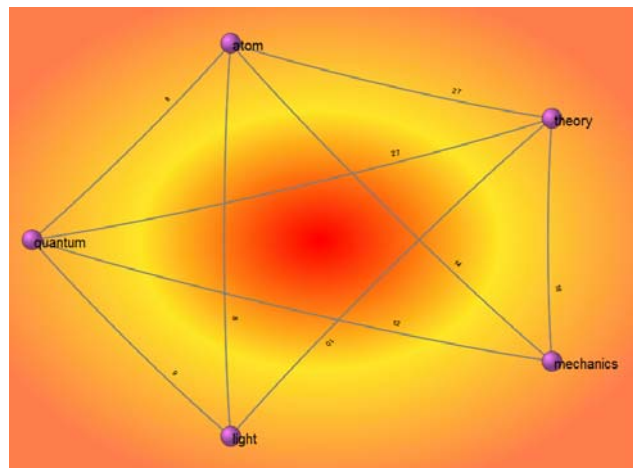


Figura 28 - Subrede da palavra *quantum*. Texto 1A [Raio=1 PesoMin=8]

Na Subrede da palavra *quantum* (Figura 28) nenhuma surpresa foi revelada. Apenas, indico a beleza do posicionamento equidistante da palavra estudada (*quantum*) em relação às palavras *atom* e *light*. Este era o quadro da Física no período: o *quantum* explica a descontinuidade da luz e o comportamento dos elétrons no átomo de maneira semelhante.

- Subrede da palavra *correspondence*

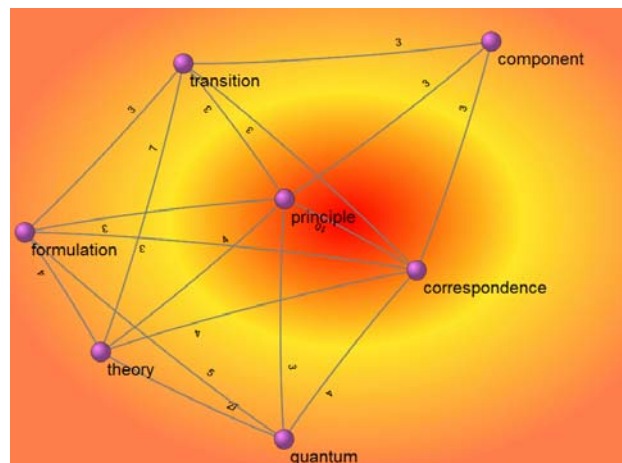


Figura 29 - Subrede da palavra *correspondence*. Texto 1A [Raio=1 PesoMin=3]

Mesmo sendo a palavra *correspondence* muito ambígua, podendo ser utilizada com vários significados, a centralidade das palavras *principle* e *correspondence* nessa subrede (Figura 29), evidencia a ligação entre elas e a representatividade da subrede como sendo a das palavras ligadas ao conceito do princípio da correspondência.

O eixo central das discussões trazidas por Bohr nesse texto de 1925 era o princípio da correspondência, que é o princípio heurístico central usado por ele no desenvolvimento da teoria quântica. Este princípio postulava que no limite dos grandes números quânticos um modelo (teoria) quântico deveria reproduzir os resultados de um modelo (teoria) clássico.

Se de um lado ele evidenciava a relação entre a teoria clássica e a teoria quântica, por outro, já demonstrava a insuficiência dessa relação para explicar os dados experimentais produzidos, sugerido pela ausência da palavra *classical*.

Algumas subredes trazem palavras de significado genérico, que considerei como ruído, pois não são palavras cujo significado representa conceitos relevantes para o tema apresentado. Este é o caso da palavra *component*.

- **Subrede das palavras *wave* e *particle***

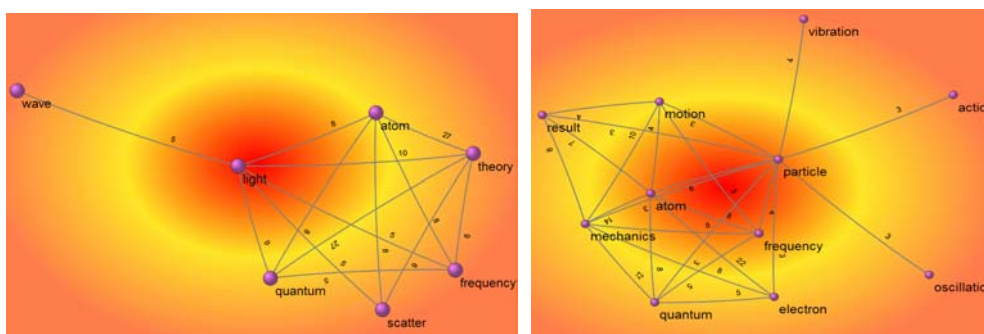


Figura 30 - Texto 1A – (a) *wave* [Raio=2 PesoMin=5] e (b) *particle* [Raio=1 PesoMin=3].

No texto de 1925, Bohr considera a natureza corpuscular da luz como a novidade que traz dificuldades, mas não considera ainda a natureza ondulatória do elétron. Por isso, a palavra *wave* aparece desvalorizada nesse gráfico.

Já no texto posterior, de 1927, a maior contribuição de Bohr para a Física Quântica, ou talvez a mais polêmica, a proposta do princípio da complementaridade para explicar o comportamento dual do elétron como onda e partícula, levantei o questionamento de como seriam as subredes dessas palavras.

Assim, o ponto máximo, diria estético, deste trabalho de ‘decifrar’ o texto a partir das subredes que suas palavras conectadas formam, ocorreu a partir da análise das palavras *wave* e *particle* (Figura 30). E aqui, aplica-se aquele velho ditado: ‘Uma imagem vale mais do que mil palavras’. Enquanto a palavra *wave* encontra-se longe do centro da

subrede, denotando a pouca importância dada a ela, a palavra *particle* aparece no centro da subrede. Posteriormente mostrarei se houve alteração na topografia dessas subredes no texto seguinte, texto 1B (1927).

- **Subrede das palavras *problem* e *difficulty***

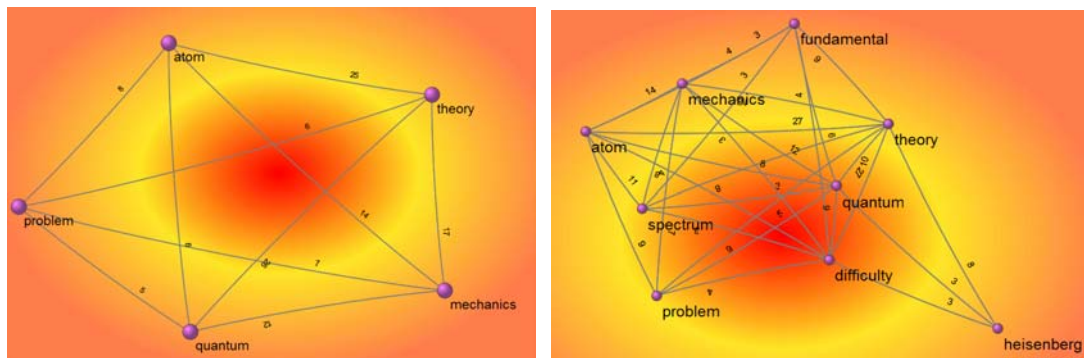


Figura 31 - palavras *problem* [Raio=1 PesoMin=5] e *difficulty* [Raio=1 PesoMin=3]

Uma curiosidade do estilo de Bohr nesse texto é a grande frequência das palavras *problem* (23 ocorrências) e *difficulty* (16 ocorrências) e que se tornou, para mim, um grande referencial para análise. Quais os problemas e dificuldades que ocupavam Bohr? O problema estava nos modelos mecânicos da teoria atômica que relacionavam o *quantum* às transições dos estados estacionários? Ou podemos dizer que neste modelo estavam ocorrendo problemas de difícil solução? E que dificuldades de solução seriam essas?

Na subrede da palavra *difficulty* (Figura 31) um novo elemento aparece e que pode levar a dois questionamentos distintos: Seria a mecânica das matrizes de Heisenberg a solução para os problemas enfrentados pela teoria quântica até então? Ou a formulação da mecânica das matrizes estava se configurando para Bohr de difícil aceitação e defesa? As subredes, evidentemente, não se propõem a responder esses questionamentos. Elas são importantes para evidenciar questões, cabendo aos físicos quânticos uma análise mais acurada dos motivos pelos quais essas características se apresentam nas subredes construídas por este método.

3.6 COMPARAÇÃO DE SUBREDES DE TEXTOS DIFERENTES

Outra possibilidade de análise que o método aqui apresentado pode nos dar é verificar o comportamento de determinados conceitos em textos construídos em contextos e épocas

diferentes. As palavras passam a se relacionar com outras que lhe concedem significado diferenciado? O posicionamento em relação ao centro da subrede das palavras analisadas pode elucidar uma mudança de seu valor de significado para o autor? Podemos notar a ausência de algum outro conceito que se supunha estar relacionado com a palavra escolhida para gerar a subrede?

É importante ressaltar que não tive intenção neste trabalho de demonstrar que as subredes dos textos iriam trazer novas e bombásticas explicações sobre a construção textual de Niels Bohr. Caso seja capaz de trazer à tona aspectos sutis das inter-relações entre as palavras que o autor utilizou, levando outros pesquisadores a uma nova busca por respostas, o meu objetivo foi alcançado.

Algumas dessas questões puderam ser lançadas e desdobradas, baseadas nos conhecimentos adquiridos a partir da leitura tradicional dos textos analisados e dos textos secundários estudados. Em outros casos, optei por somente formular perguntas, principalmente por falta de um conhecimento robusto sobre a obra do autor.

- **Subrede da palavra *theory***

Na subrede do texto **1A** (Figura 32a), vê-se que nenhuma palavra ocupou a área central da página. Já na subrede do texto **1B** (Figura 32b) a palavra *quantum* assume o papel central da rede. Palavras novas surgem na subrede **1B**, podendo ser indicativo de que os conceitos da teoria estavam sendo modificados. Palavras como *wave*, *space*, *time*, *matrix* e *observation* surgem indicando novas direções que a teoria quântica estava tomando. As explicações espaço-temporais do fenômeno atômico preocupavam Bohr? A mecânica das matrizes estava presente, mas o comportamento ondulatório detinha o interesse maior de Bohr, haja vista a sua proximidade tanto do centro da subrede quanto da palavra *theory*. E, por último, as discussões dos estados estacionários passam a ocupar uma posição periférica da subrede no texto **1B**. Isso se reflete também nas explicações teóricas de Bohr? Mais um ponto para reflexão futura.

Na Figura 32c, do texto **4D**, a palavra *theory* se posiciona no centro da subrede, tendo como pares as palavras *measurement*, *measure*, *phenomenon*, *object*, que sugerem bem o teor do texto, onde a discussão teórica se dá em função do experimento mental proposto por Einstein no texto anterior a que este faz referência. Por último, a Figura 32d, do texto **4E**, apresenta uma simples configuração em que teoria quântica e teoria da

relatividade estão equidistantes, refletindo exatamente o objetivo de Bohr no texto, ou seja, uma revisão conceitual da teoria quântica à luz da teoria da relatividade.

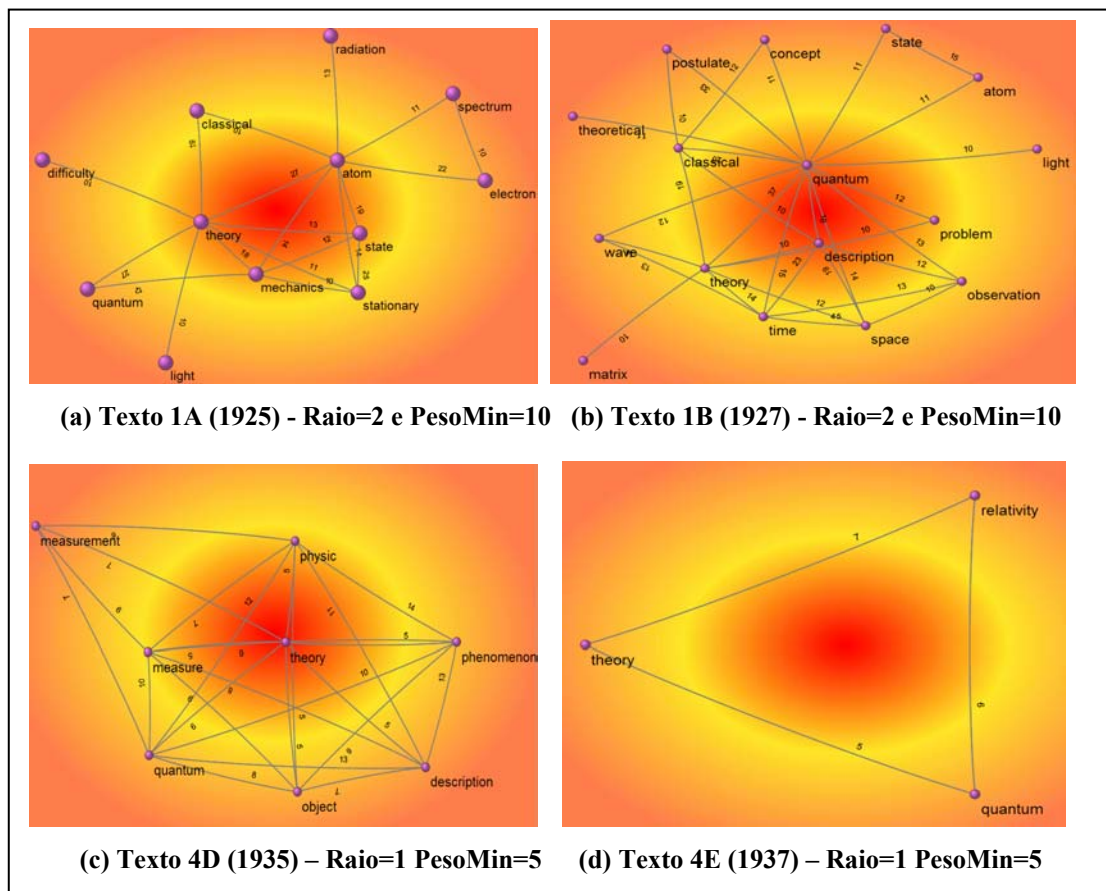


Figura 32 – Subredes da palavra *theory*

A partir da análise das quatro figuras, percebe-se que a subrede do conceito *theory* assume configurações distintas em cada texto e refletem, sem dúvida, o pensamento do autor em cada momento histórico analisado, demonstrando a eficiência do método em determinar alterações de seu pensamento sobre o tema.

- **Subrede da palavra *correspondence***

O Princípio da Correspondência representou um princípio heurístico usado por Bohr para relacionar a teoria atômica com a mecânica clássica, formulando a nova teoria quântica de tal maneira que pudesse também ser “traduzida” para eventos macroscópicos. Uma formulação bem típica do período de transição teórico vivido.

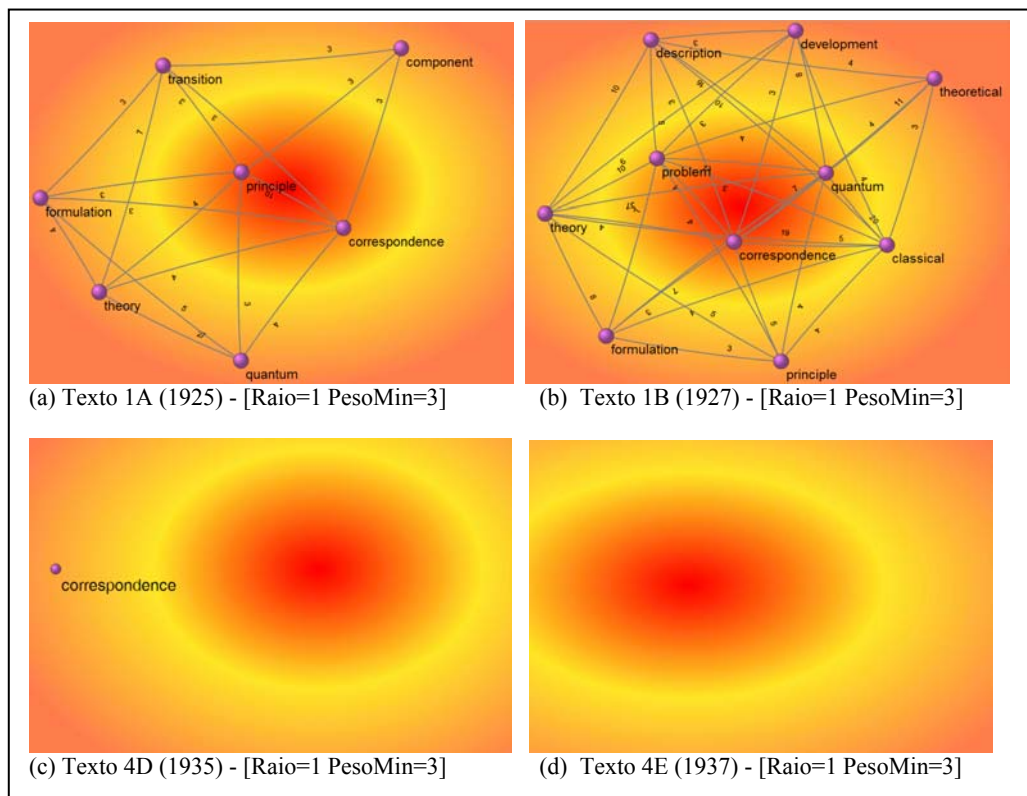


Figura 33 – Subredes da palavra *correspondence*

Vale ressaltar a aparição da palavra *problem* no texto de 1927, da Figura 33, assim como também a quantidade maior de conceitos associados à palavra escolhida, que sugere uma tentativa de permanecer ainda utilizando este princípio, tentando associá-lo à nova configuração conceitual. Bohr insiste na argumentação da correspondência como formulação teórica plausível. Nos textos posteriores, Bohr abandona a ênfase neste princípio, culminando com a total ausência da palavra em 1937. Não precisava insistir no uso desse princípio heurístico como fundamento da mecânica quântica, pois esta já estava consolidada nos anos de 1935 e 1937. Algo a ser esclarecido, no entanto, é a ausência da palavra *classical* no primeiro texto, onde a relação entre a teoria clássica e a atômica é o tema central do texto. Notemos que este termo surge no texto **1B**, de 1927.

- **Subredes da palavra *wave***

Nos gráficos da Figura 34, vemos a evolução das subredes, quando a palavra *wave* passa de uma posição periférica isolada no texto **1A** (1925) ao centro no Texto **1B** (1927), retornando novamente à periferia no texto **4D** (1935), porém agora acompanhada das palavras *particle*, *momentum* e *slit*, sem ter no centro nenhuma palavra e, por último, desaparecendo no texto **4E** (1937).

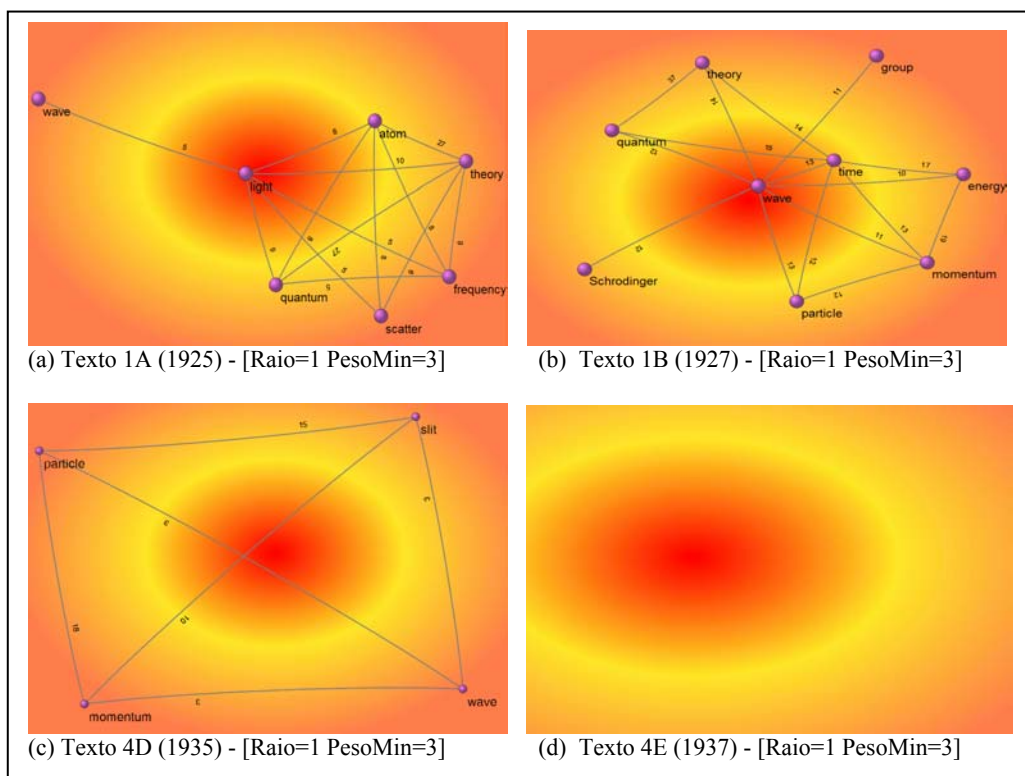


Figura 34 – Subredes da palavra *wave*

- **Subrede da palavra *particle***

Na Figura 35, na subrede do texto **1A** o conceito de *particle* tem importância desprezível, associada apenas à palavra *atom*. Nesse período, não havia nenhum questionamento sobre a natureza corpuscular do elétron, apesar de já estar estabelecida a natureza corpuscular da luz, representada pelo fóton. Já nos textos **1B** e **4D**, nota-se que o conceito de *particle* passa a estar associado a uma quantidade considerável de outros conceitos, o que demonstra sua importância para a estrutura do texto como um todo. No primeiro, a palavra *wave* encontra-se no centro junto com *particle*, fato que pode ser explicado pela discussão calorosa sobre a dualidade onda-partícula do átomo. No segundo, a palavra *wave* some da subrede, o que sugere associação com a discussão do fenômeno baseado no experimento mental em que o elétron era considerado como partícula. Já no texto **4E** o conceito de *particle* experimenta seu ocaso.

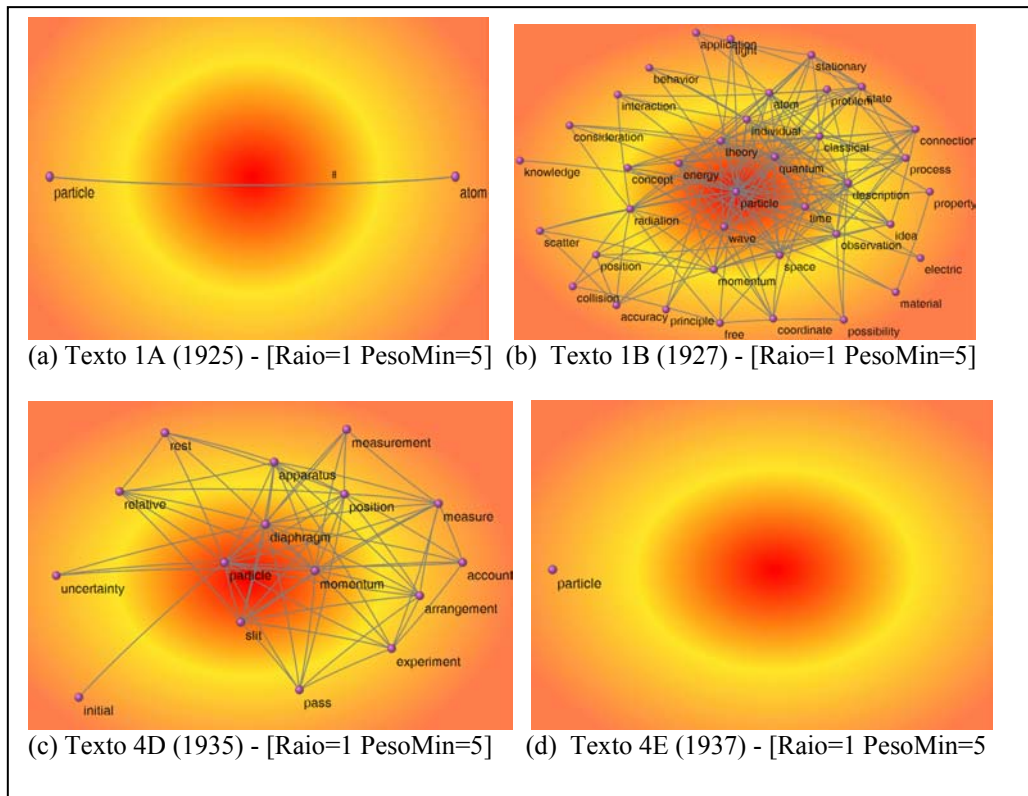


Figura 35 – Subredes da palavra *particle*

- **Subredes da palavra *difficulty***

No texto de 1925, a subrede construída em torno da palavra *difficulty* (Figura 36) sugere uma preocupação de Bohr em introduzir a formulação matricial de Heisenberg no leque de conceitos da Física atômica que ele descreve, baseada principalmente na análise de resultados experimentais dos espectros. No texto de 1927, os resultados foram confusos não demonstrando aspectos relevantes em termos dos conceitos a ele associados. A ausência da palavra *difficulty* no texto de 1935 pode estar associada à confiança de Bohr na resposta ao experimento EPR que o texto de Pais (1993) atribui à descoberta, por parte de Bohr, da ‘artimanha’ argumentativa do texto de Einstein sobre o experimento EPR. Por último, o texto de 1937 evidencia a ausência da palavra associada a conceitos, porém não tenho explicação para essa ausência. Não haveria mais dificuldades para Bohr na década de 1930?

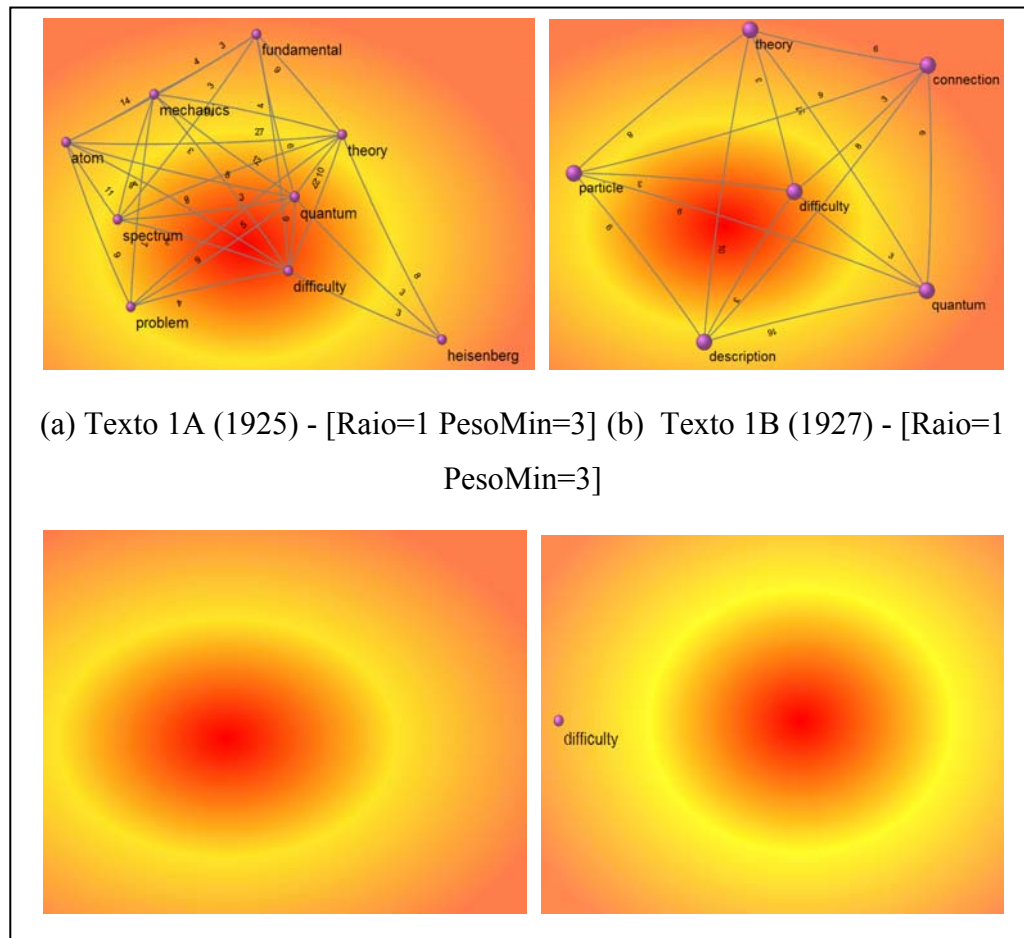


Figura 36 – Subredes da palavra *difficulty*

- **Subredes da palavra *phenomenon***

Em todos os textos da Figura 37, a palavra *phenomemon* encontra-se próxima do centro da subrede, sugerindo importância igual para a palavra em cada um dos textos. Porém, as palavras que a acompanham diferem, sugerindo sentidos diferentes. No texto **1A**, a palavra *optical* sugere que o fenômeno a que Bohr estava se referindo, relacionava-se com os experimentos óticos realizados na época, ou seja, os espectros de luz. Em 1927, as palavras *wave*, *observation* e *classical* foram as que mais me chamaram a atenção, principalmente porque no texto **4D** Bohr fala claramente sobre o experimento mental de Einstein, mas não o associa ao fenômeno em si. Talvez por tratar-se de uma redação voltada a um experimento mental e não a observações experimentais. No texto de 1937, os conceitos relacionados à palavra *phenomenon* ficam mais simples e diretos: *physic*, *atom*, *description*. Outro aspecto a salientar é que a palavra *theory* esteve presente nos textos de 1925, 1927 e 1935, desaparecendo da subrede no texto de 1937.

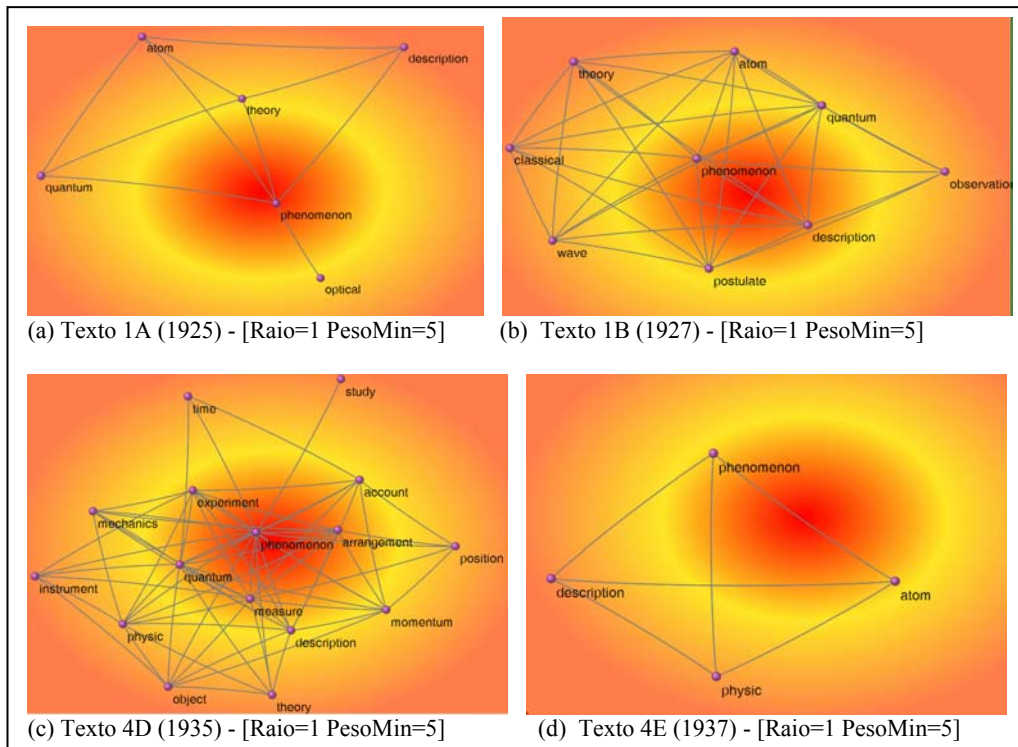


Figura 37 – Subredes da palavra *phenomenon*

- **Subredes da palavra *complementarity***

A ausência do termo *complementarity* no texto de 1925 já foi evidenciada e explorada na análise da evolução temporal da palavra escolhida (ver 3.2). Apesar de Bohr ter referenciado o termo pela primeira vez no texto de 1927, nota-se (Figura 38) que ele não o associa significativamente a nenhum outro termo, aparecendo então a palavra sozinha no corte de frequência feito. Já no texto de 1935, Bohr traz o termo associado a outras palavras, *phenomenon*, *description* e *quantum*, sugerindo que, ali, esta palavra tem o seu significado ligado à observação fenomenológica, enquanto que no texto de 1937, a complementaridade passa da descrição de fenômenos físicos para transformar-se em um ponto de vista [*viewpoint*] mais geral, que pode ser constatado com a leitura do texto em que Bohr tem a intenção de expandir o conceito a outras ciências, generalizando-o.

Esses foram os resultados encontrados com as técnicas de análise de conteúdo empregados nesta pesquisa. Na etapa seguinte farei as considerações finais sobre as técnicas, as dificuldades em seu emprego, os resultados encontrados e os esperados e os trabalhos futuros que podem ser feitos para dar prosseguimento a esta pesquisa aperfeiçoando-a.

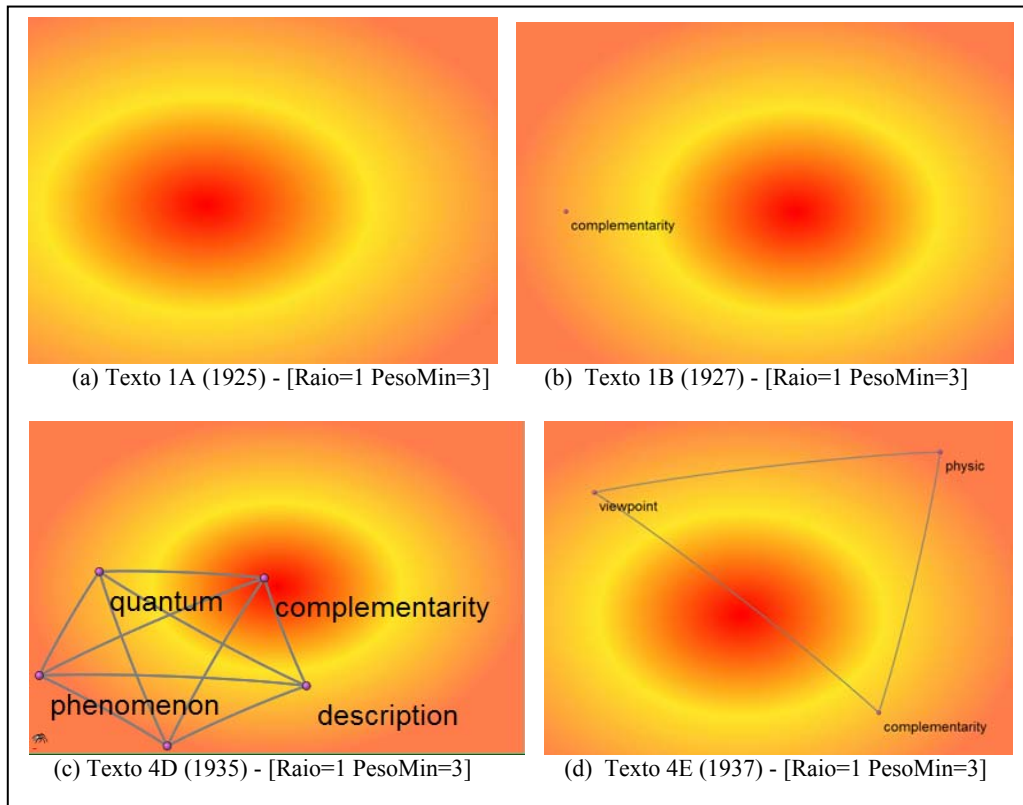


Figura 38 – Subredes da palavra *complementarity*

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo principal desta dissertação foi apresentar uma metodologia de análise de textos, a partir da construção da subrede dos conceitos que o autor evoca na formulação de sua teoria. Neste caso, escolhi abordar especificamente textos escritos de Niels Bohr. Para ser considerado válido, este método teria que ser capaz de evidenciar o tema do texto, a evolução temporal do conceito e, eventualmente, trazer à tona aspectos referentes ao conceito que não se apresentavam de forma direta à leitura tradicional.

O conceito aqui estudado foi o de *Complementaridade*. Trata-se, como já mencionei, de uma palavra de importância decisiva na produção do célebre Princípio de Complementaridade, proposição formulada por Bohr e da maior importância para a Física, que permite esclarecer como fenômenos da natureza apresentam propriedades aparentemente contraditórias e, ao mesmo tempo, complementares.

A palavra *complementarity* foi escrita pela primeira vez por Bohr, em setembro de 1927. Esse texto foi o que apresentou a maior frequência do termo *complementary*, e duas ocorrências do termo principal deste estudo, *complementarity*. Um dos resultados evidenciados com a metodologia desenvolvida aqui foi visualizar o modo como o conceito foi sendo produzido. Por se tratar de um novo conceito, Bohr inicia esta construção citando com frequência o termo *complementary*, a fim de criar uma referência com um termo já conhecido e poder, dessa maneira, introduzir o novo conceito.

O gráfico da evolução histórica da frequência de palavras escolhidas aplicado à palavra *complementarity* se mostrou eficaz, pois permitiu identificar as ausências e intensidades de uso em cada texto. Partindo deste ponto, e utilizando a leitura secundária, pude estabelecer relevantes correlações entre os períodos em que foram escritos e o modo como Bohr refletiu esses aspectos em seus escritos. Vale salientar que também ocorreram situações nas quais o método em nada contribuiu para esclarecer o conceito e seu contexto.

A frequência pura das palavras conceituais indicou termos relacionados ao título do artigo, porém nem sempre o mais importante do texto estava mencionado no título. É o caso, por exemplo, do texto de 1927, cuja importância reside em se tratar da primeira

vez que Bohr usa o termo *complementarity*, porém esta palavra nem aparece entre as mais freqüentes.

Já a análise dos pares de palavras gerou dados mais robustos e coerentes com o tema principal abordado nos textos, inclusive evidenciando aspectos curiosos que demandaram investigações através da leitura tradicional, a fim de esclarecer freqüências elevadas e/ou ausências de uso de alguns termos esperados. Para determinar o tema principal do texto, a técnica de contagem dos pares demonstrou eficiência.

O conceito *Complementaridade*, capaz de explicar o uso de duas propriedades contraditórias, onda e partícula, em dois contextos experimentais bem definidos, foi o principal estudado. Porém outros conceitos como, por exemplo, *Fenômeno*, também representaram contribuições relevantes para a ciência e filosofia. A partir da escolha desses conceitos, construí as subredes baseadas em freqüência de co-ocorrência.

Tendo como premissa que o sentido ou as significações de uma palavra encontram-se não no termo em si, mas no contexto em que ele foi empregado, as redes de palavras podem ser consideradas uma técnica importante para o esclarecimento desses sentidos. A análise individual de cada texto apresentou aspectos importantes sobre eles, mas a representação gráfica ganha força quando comparamos textos escritos em períodos históricos diferentes, tornando-se capaz de evidenciar que os conceitos sofrem alterações de sentido ao longo do tempo.

Um outro achado importante de ser ressaltado diz respeito à visualização gráfica de um período, precisamente o ano de 1929, em que não é encontrada nenhuma ocorrência das unidades lexicais analisadas. É plausível supor, de acordo com este dado, que há momentos de latência na produção de conceitos e que os avanços em ciências se dão de modo não-linear. No entanto, somente repetidas investigações explorando esta metodologia poderão ratificar ou não tal suposição.

O gráfico de análise evolutiva mostra que o uso da palavra *complementarity* aparece de forma muito tímida nos textos iniciais, entra em latência no ano de 1929, e recrudescer em 1932, no texto pós-crise, mantendo certa estabilidade nos textos seguintes.

Ressalto, mais uma vez, que a análise da subrede de palavras isoladas, que permitiu determinar sua freqüência nos textos, não pareceu contribuir para a visualização do uso e da importância do conceito. De todo modo, as subredes construídas não se propõem a

responder questionamentos relativos a conteúdo. Elas são importantes para levantar questões, propor direções de investigação, cabendo aos físicos quânticos uma análise mais acurada dos motivos pelos quais essas características se apresentam nas subredes construídas.

Outra possibilidade de análise que o método aqui apresentado pôde oferecer foi quanto à verificação do comportamento de determinados conceitos em textos construídos em contextos e épocas diferentes. As palavras passam a se relacionar com outras, assumem posições distantes ou próximas do centro da subrede de palavras, indicando a mobilidade e não-linearidade dos conceitos. Também a ausência de palavras pode ser indicativo forte da tensão entre idéias novas e a tradição.

Como afirmei anteriormente, creio que esta metodologia contribui para o desenvolvimento de técnicas analíticas de leitura, na medida em que pode trazer à tona aspectos sutis das inter-relações entre as palavras que o autor utilizou, em seu percurso de elaboração teórica.

Acredito também que uma das importantes contribuições de um trabalho de investigação acadêmica é propor ou sugerir possíveis temas para novas abordagens de pesquisa. Ao mesmo tempo, não deve negligenciar a referência a pontos de impasse ou aqueles momentos do trabalho nos quais as hipótese testadas conduziram a resultados pouco robustos ou mesmo incongruentes com as expectativas geradas ao longo da pesquisa.

Deste modo, como referência para trabalhos futuros, sugiro, por exemplo, o emprego desta metodologia na avaliação do aprendizado, contrapondo resultados do texto aplicado em sala e as redes individuais feitas a partir de textos produzidos pelos alunos. Encontramos avaliação similar no emprego dos mapas conceituais (MOREIRA *et al*, 2002) porém a análise de frequência, ausência e subredes de palavras escolhidas podem, talvez, se tornar mais eficientes, já que utilizam o material bruto produzido pelo aluno, sem acrescentar a interferência de julgamento na classificação dos conceitos que está presente na técnica de mapas conceituais. Os conceitos que, porventura, fossem considerados inadequados pelos mapas conceituais, por não se referirem ao tema trabalhado, teriam condição de se tornar evidentes com as subredes. O que o aluno pensa sobre determinado assunto, inclusive suas referências individuais desvinculadas aparentemente do tema, pode ser levado em consideração com o método proposto nesta dissertação.

Ainda no âmbito do emprego do método para estudos semelhantes ao realizado neste trabalho, investigações podem ser realizadas com os demais textos filosóficos de Niels Bohr não considerados aqui. A análise dos textos de Einstein, referentes ao diálogo que ele travou com Bohr sobre a mecânica quântica, buscando alterações conceituais nos escritos de ambos, após cada intervenção, pode se tornar um material de pesquisa para historiadores da ciência. Além disso, outros autores podem ter seus escritos analisados à luz deste método, inclusive como uma maneira de testar sua eficiência.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIRRE, Luis Antonio. *Introdução à identificação de sistemas: técnicas lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais*. 2. ed. rev. e ampl. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2004.
- ALBERT, R., BARABASI, A-L. Rev. Mod. Phys. (2001), in press, cond-mat/0106144.
- ALBERT, R., BARABÁSI, Albert-László. *Statistical mechanics of complex networks*. *Reviews of Modern Physics* 74, 47, 2002. Disponível em: cond-mat/0106096. Acesso em: 15 jun 2003.
- ALBERT, R., JEONG, H., BARABÁSI, Albert-László. The diameter of the world wide web. *Nature* 401, p. 130-131, 1999. Disponível em: <http://xxx.lanl.gov/abs/cond-mat/9907038>. Acesso em: 20 jul 2003.
- ALTMANN, G., LEVICKIJ, V., PEREBYNIS, V. (EDS). *Problems of Quantitative Linguistics: A Collection of Papers*. Chernivtsi: Ruta, 2005.
- BARABÁSI, Albert-László. *Linked: How everything is connected to everything else and what it means for Business, Science, and everyday life*. Cambridge: Plume, 2003.
- BARDIN, Laurence. *Análise de Conteúdo*. Portugal: Edições 70, 2004.
- BIDERMAN, Maria Tereza Camargo. *Teoria Lingüística*. São Paulo: Martins Fontes, 2001.
- BOAVENTURA NETO, Paulo Osvaldo. *Grafos: Teoria, modelos, algoritmos*. 3. ed. rev. e ampl. São Paulo: Edgard Blücher, 2003.
- BOHR, Niels. *The Philosophical writings of Niels Bohr*. Atomic Theory and the Description of Nature; v. I. USA: Ox Bow Press, 1934.
- BOHR, Niels. *The Philosophical writings of Niels Bohr*. Essays 1933-1957 on Atomic Physics and Human Knowledge; v. II. USA: Ox Bow Press, 1958.
- BUCHANAN, Mark. *Nexus: small world and the groundbreaking science of networks*. New York: W. W. Norton & Company, Inc., 2002.

- BUNGE, Mário. *Dicionário de Filosofia*. Tradução Gita Guinsburg. São Paulo: Perspectiva, 2002.
- CALDEIRA, S M G. CARACTERIZAÇÃO DA REDE DE SIGNOS LINGÜÍSTICOS: Um modelo baseado no aparelho psíquico de Freud. Dissertação (Mestrado Interdisciplinar em modelagem computacional) – Faculdade Visconde de Cairu, 2005.
- CHARAUDEAU, P. & MAINGUENEAU, D. *Dicionário de Análise do Discurso*. São Paulo: Contexto, 2006.
- COSTA, Luciano da F. What's in a Name? *Intl. J. Mod. Phys. C*, v. 15, n. 1, p. 371-379, 2004. Disponível em: <http://arxiv.org/abs/cond-mat/0309266>. Acesso em: 20 fev 2005.
- DESCARTES, René. *Discurso do Método*. 2002. Disponível em: <http://www.phoenix-library.org/index.php?page=search&ref=7002>. Acesso em: 21 jan. 2005.
- DOROGOVTSEV, S. N. e MENDES, J. F. F. Language as an evolving word web. *Proceedings of The Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, v. 268, n. 1485, p. 2603-2606, 2001.
- FAYE, J. & FOLSE, H. J. (eds.) . *The Philosophical writings of Niels Bohr*. v. IV. USA: Woodbridge, Connecticut: Ox Bow Press, 1998.
- FERRER I CANCHO, Ramon, SOLÉ, Ricard V. The National Academy of Sciences. *Proc Natl Acad Sci U S A.*, 2003 February 4; v. 100, n.3: p. 788–791. doi: 10.1073/pnas.0335980100. Disponível em: <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=298679>. Acesso em: 12 jun 2004.
- FERRER I CANCHO, Ramon, SOLÉ, Ricard V. The small world of human language. *Proc. R. Soc. London, Ser. B* 268, 2261, 2001.
- FERRER I CANCHO, Ramon, SOLÉ, Ricard V., KÖHLER, R. Patterns in syntactic dependency networks. *Physical Review E* 69, 051915, 2004.
- FREUD, Sigmund. *A Interpretação das Afasias*. Tradução por Antonio Pinto Ribeiro. Lisboa: Edições 70, 1979.

FREUD, Sigmund. *A Interpretação dos Sonhos*. vol. 2. Tradução por Walderedo Ismael de Oliveira. Licença editorial da Imago. São Paulo: Círculo do Livro, 1987.

FREUD, Sigmund. Projeto para uma psicologia. In: _____. *Edição Standard das obras psicológicas completas de Sigmund Freud*. (vol. 1). Rio de Janeiro: Imago, 1996.

GADET, Françoise, HAK, Tony (Orgs.). *Por uma análise automática do discurso: uma introdução à obra de Michel Pêcheux*. Trad. Bethânia S. Mariani [et al]. Campinas: Editora da UNICAMP, 1993.

HELSLOOT, Niels & HAK, Tony. Pêcheux's Contribution to Discourse Analysis. *Forum Qualitative Social Research*. v. 8, n. 2, art. 1 – Disponível em: <http://www.qualitative-research.net/fqs-texte/2-07/07-2-1-e.htm>. Acesso em: maio 2007.

IKER, HP, HARWAY, NI. *The Analysis of Communication Content*. New York: Wiley, 1969.

KRIPPENDORFF, Klaus. *Content analysis: an introduction to its methodology*. 2. ed. Cidade: Sage Publications, Inc; 2003.

KOPPEL, M., ARGAMON, S., SHIMONI, R. Automatically categorizing written texts by author gender. *Lit. and Ling. Comp.*, v. 17, n. 4, 2003. Disponível em: <http://www.cs.biu.ac.il/~koppel/papers/male-female-llc-final.pdf>. Acesso em: 31 mar 2003.

LALANDE, André. *Vocabulário Técnico e Crítico da Filosofia*. Tradução Fátima Correia et al. São Paulo: Martins Fontes, 1999.

LEWIS, E.T., DIESNER, J., CARLEY, K.M. *Using Automated Text Analysis to Study Self-Presentation Strategies*. Computational Analysis of Social and Organizational Systems (CASOS) Conference, Pittsburgh PA, 2001. Disponível em: http://www.casos.ece.cmu.edu/casos_working_paper/ESP-all.pdf. Acesso em: 23 nov 2004.

LI, Wentian. *Comments on bell curves and monkey languages*. *Complexity*. 1(6): pp. 6, 1996. Disponível em: http://www.nslj-genetics.org/wli/pub/complexity96_lett_pre.pdf. Acesso em: 14 jun 2004.

- LI, Wentian. *Random texts exhibit Zipf's-law-like word frequency distribution*. IEEE transactions on information theory. v. 38, n. 6, p. 1842-1845, 1992.
- MARTINS, Nilce Sant'anna. *Introdução à estilística: a expressividade na língua portuguesa*. 3. ed. rev. e aum. São Paulo: T. A. Queiroz, 2003. (Biblioteca universitária de língua e lingüística; v.8).
- MILGRAM, Stanley. The Small-World Problem. *Psychology Today*, v. 2, 1967, p. 60-67.
- MONTEMURRO, Marcelo A. *Beyond the Zipf-Mandelbrot law in quantitative linguistics, 2001*. Disponível em: http://arxiv.org/PS_cache/cond-mat/pdf/0104/0104066.pdf. Acesso em: 10 jul 2004.
- MONTEMURRO, Marcelo A. e PURY, Pedro A. *Long-range fractal correlations in literary corpora*. ArXiv:cond-mat/0201139 v1 09 jan 2002.
- MOREIRA, M A; GRECA, I M; PALMERO, M L R. *Modelos mentales y modelos conceptuales em la enseñanza & aprendizaje de las ciencias*. Porto Alegre: Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências, 2002.
- MOTTER, Adilson E., MOURA, Alessandro P S. de, LAI, Yiang-Cheng, DASGUPTA, Partha. Topology of the conceptual network of language. *Physical Review E*, 65, 065102, 2002.
- NEWMAN, M. E. J. *The structure and function of complex networks*. arXiv.org e-Print archive, 2003. Disponível em: http://arxiv.org/PS_cache/cond-mat/pdf/0303/0303516.pdf. Acesso em: 19 fev 2005.
- NOOY, W., MRVAR, A. and BATAGELJ, V. *Exploratory Social Network Analysis with Pajek*. In Series: Structural Analysis in the Social Sciences (No. 27). Cambridge University Press, 2005.
- NOWAK, M. A., PLOTKIN, J. B., and JANSEN, V. A. A.. The evolution of syntactic communication. *Nature Magazine*, vol. 404, 2000.
- NUSSENZVEIG, H Moysés (Org). *Complexidade e Caos*. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora UFRJ/COPEA, 2003.

- PAIS, Abraham. Niels Bohr's Times, in Physics, Philosophy, and Polity. USA: Oxford University Press, 1993.
- PESSOA JR, O. Medidas Sistêmicas e Organização. In: DEBRUN, M.; GONZALES, M.E.Q. & PESSOA Jr., O. (Orgs.). *Auto-Organização*. Coleção CLE 18, CLE-Unicamp, 1996, p.129-61.
- PINHO, Suani T. Rubim de, ANDRADE, Roberto F. Silva. Evolução das idéias da termodinâmica e da mecânica estatística. In: ROCHA, José Fernando M. (Org). *Origens e evolução das idéias da Física*. Salvador: EDUFBA, 2002. p. 170-180.
- REDE RELEX BRASIL. *Manual Unitex 0-1-2-3-4*. Tradução de Aléxis Neme. Bahia: Rede Relex Brasil, 2002.
- REY, Alain (1993). *Dictionnaire historique de la langue française*. Montréal: Dictionnaire Robert, p. 459.
- SAUSSURE, Ferdinand de. *Curso de Lingüística Geral*. 26 ed. São Paulo: Cultrix, 2004.
- SCOTT, John. *Social Network Analysis: a handbook*. 2. ed. London: SAGE Publications Ltd., 2000.
- SIMON, H. A. *On a Class of Skew Distribution Functions*. *Biometrika*, vol. 42, partes 3 y 4, diciembre, 1955, p. 425-440.
- SOLÉ, Ricard V. FERRER-CANCHO, Ramon. MONTOYA, Jose M. VALVERDE, Sergi. Selection, tinkering, and emergence in complex networks. *Wiley periodicals* v. 8 n. 1, 2003, p. 20- 33.
- TAGHARD, Paul. *Conceptual Revolutions*. Princeton University Press, 1992
- TAKAHASHI, Tadao (Org.). *Livro Verde: Sociedade da informação no Brasil*. Brasília: Ministério da Ciência e Tecnologia, 2000.
- WATTS, Duncan J. *Small Worlds: The Dynamics of Networks between Order and Randomness*. USA : Princeton University Press, 1999.
- WEITZ, M. *Theories of Concepts*. New York: Routledge , 1988.
- WOELFEL, J. K. *Artificial Neural Network in policy research: a current assessment*. *Journal of Communication* 43: 63-80, 1993.

WOELFEL, J. K, Woelfel, J.D. *The Galileo Company*. New York: Amerhst, 1997.

WOELFEL, J. K. EL Fink. *The Measurement of Communication Processes: Galileo Theory and Method*. Academic Press, 1980.

ZIPF, George Kingsley. *The Principle of Least Effort: An Introduction to Human Ecology*. New York: Hafner Publishing Company, 1972.

ANEXOS

• **TEXTO 1A - Atomic Theory and Mechanics (1925)**

I. THE CLASSICAL THEORIES

The analysis of the equilibrium and the motion of bodies not only forms foundation of physics, but for mathematics reasoning has also furnished a rich field, which has been exceedingly fertile for the development of the methods of pure mathematics. This connection between mechanics and mathematics showed itself at an early date in the works of Archimedes, Galilei and Newton. In their hands the formation of concepts suitable for the analysis of mechanics phenomena was provisionally completed. Since the time of Newton, the development of the methods for treating mechanics problems has gone hand in hand with the evolution of mathematics analysis; we need only recall such names as Euler, Lagrange and Laplace. The later development of mechanics too, based on the work of Hamilton, proceeded in very close association with the evolution of mathematics methods, the calculus of variations, and the theory of invariants, as appears clearly in recent times also in the papers of Poincaré.

Perhaps the greatest successes of mechanics lie in the domain of astronomy, but in the mechanics theory of heat an interesting application was also found in the course of the last century. The kinetic theory of gases, founded by Clausius and Maxwell, interprets the properties of gases to a large extent as results of the mechanics interactions of atoms and molecules flying about at random. We wish to recall especially the explanation of the two principles of thermodynamics given by this theory. The first principle is a direct result of the mechanics law of conservation of energy, while the second principle, the entropy law, can, following Boltzmann, be derived from the statistical behavior of a large number of mechanics systems. It is of interest here that statistical considerations have permitted the description not only of the average behavior of atoms, but also of the fluctuation phenomena, which have led by the investigation of the Brownian motion to the unexpected possibility of counting atoms. The proper tools for the systematic development of statistical mechanics, to which especially Gibbs contributed, were furnished by the mathematics theory of canonical systems of differential equations.

The development of the electromagnetic theories in the second half of last century, following the discoveries of Oersted and Faraday, brought about a profound generalization of mechanics concept. Although, to begin with, mechanics models played an essential part in Maxwell's electrodynamics, the advantages were soon realized of conversely deriving the mechanics concepts from the theory of the electromagnetic field. In this theory the conservation laws are explained by considering energy and momentum to be localized in the space surrounding the bodies. In particular, a natural explanation of radiation phenomena can be obtained in this way. The theory of the electromagnetic field was the direct cause of the discovery of electromagnetic waves, which to-day play so important a part in electrical engineering. Further, the electromagnetic theory of light founded by Maxwell provided a rational basis for the wave theory of light, which goes back to Huygens. With the aid of the atom theory, it afforded a general description of the origin of light and of the phenomena taking place during the passage of light through matter. For this purpose, the atoms are supposed to be built up of electrical particles which can execute vibrations about positions of equilibrium. The free oscillations of the particles are the cause of the radiation, the composition of which we observe in the atom spectra of the elements. Further, the particles will execute forced vibrations under the forces in the light waves and thus become centres of secondary wavelets which will interfere with the primary waves and produce the well-known phenomena of reflection and refraction of light. When the frequency of vibration of the incident waves approaches the frequency of one of the free oscillations of the atom, there results a resonance effect, by which the particles are thrown into especially strong forced vibrations. In this way a natural account was obtained of the phenomena of resonance radiation and the anomalous dispersion of a substance for light near one of its spectra lines.

Just as in the kinetic theory of gases, it is not merely the average effect of a large number of atoms that comes into consideration in the electromagnetic interpretation of optical phenomena. Thus, in the scattering of light the random distribution of the atoms makes the effects of the individual atoms appear in such a way that a direct counting of the atoms is possible. In fact, Rayleigh estimated from the intensity of the scattered blue light of the sky the number of atoms in the atmosphere, obtaining results in satisfactory agreement with the counting of atoms obtained by Perrin from a study of the Brownian motion. The rational mathematics representation of the electromagnetic theory is based on the application of vector

analysis, or more generally tensor analysis of higher dimensional manifolds. This analysis founded by Riemann offered the proper means for the formulation of Einstein's fundamental theory of relativity which introduces concepts that go beyond Galilei's kinematics and may perhaps be considered as the natural completion of the classical theories.

2. THE QUANTUM THEORY OF ATOM CONSTITUTION

In spite of all the successful applications of mechanics and electrodynamical ideas atom theory, further development revealed profound difficulties. If these theories really provide a general description of thermal agitation and of the radiation connected with motion, then the general laws of heat radiation must be capable of a direct explanation. Contrary to all expectations, however, a calculation on this basis could not explain the empirical laws. Going beyond this, Planck demonstrated, retaining Boltzmann's account of the second law of thermodynamics, that the laws of heat radiation demand an element of discontinuity in the description of atom processes quite foreign to the classical theories. Planck discovered that in the statistical behavior of particles which execute simple harmonic oscillations about positions of equilibrium only such states of vibrations must be taken into account the energy of which is an integral multiple of a "quantum", $h\nu$, where ν is the frequency of the particle and h a universal constant, the so-called Planck's quantum of action.

The more precise formulation of the content of the quantum theory appears, however, to be extremely difficult when it is remembered that all the concepts of previous theories rest on pictures which demand the possibility of a continuous variation. This difficulty was especially emphasized by the fundamental researches of Einstein, according to which essential features of the interaction between light and matter suggest that the propagation of light does not take place by spreading waves but by "light-quanta", which, concentrated in a small region of space, contain the energy $h\nu$, where ν is the frequency of the light. The formal nature of this statement is evident because the definition and measurement of this frequency rests exclusively on the ideas of the wave theory.

The inadequacy of the classical theories was brought into prominence by the development of our knowledge of atom structure. One formerly hoped that this knowledge might be gradually enlarged by an analysis of the properties of the elements based on the classical theories which had been fruitful in so many respects. This hope was supported shortly before the birth of the quantum theory by Zeeman's discovery of the effect of magnetic fields on spectra lines. As Lorentz showed, this effect corresponds in many cases to just that action of magnetic fields on the motion of oscillating particles which is to be expected from classical electrodynamics. Besides, this account allowed conclusions to be drawn about the nature of the oscillating particles which agreed beautifully with the experiment discoveries of Lenard and Thomson in the field of electric discharges in gases. As a result, small negatively charged particles, the electrons, were recognized as units common to all atoms. It is true that the so-called "anomalous" Zeeman effect of many spectra lines caused profound difficulties for the classical theory. These were similar to those which showed themselves in the attempts with the aid of electrodynamics models to explain the simple empirical regularities among the spectra frequencies which were brought to light through the work of Balmer, Rydberg, and Ritz. In particular, such an account of the spectra laws could scarcely be reconciled with the estimate of the number of electrons in the atom which Thomson obtained from observations on the scattering of X-rays by a direct application on the classical theory.

These difficulties could for a time be attributed to our imperfect knowledge of the origin of the forces by which the electrons are bound in the atom. The situation was, however, entirely changed by the experiment discoveries in the field radioactivity, which furnished new means for the investigation of atom structure. Thus, Rutherford obtained convincing support for the idea of the nuclear atom from experiments on the passage through matter of the particles ejected by radioactive substances. According to this idea, the greatest part of the atom mass is localized in a positively charged nucleus, exceedingly small compared with the dimensions of the atom as a whole. Around the nucleus there move a number of light negative electrons. In this way, the problem of atom structure took on a great similarity to the problems of celestial mechanics. A closer consideration, however, soon showed that, nevertheless, there exists a fundamental difference between an atom and a planetary system. The atom must have a stability which presents features quite foreign to mechanics theory. Thus, the mechanics laws permit a continuous variation of the possible motions, which is entirely at variance with the definiteness of the properties of the elements. The difference between an atom and an electrodynamic model appears also when one considers the composition of the emitted radiation. For, in models of the sort considered, where the natural frequencies of motion vary continuously with the energy, the frequency of the radiation will change continuously during emission according to classical theory and will therefore show no similarity to the line spectra of the elements.

The search for a more precise formulation of the concepts of the quantum theory which might be capable of overcoming these difficulties led to the enunciation of the following postulates:

(1) An atom system possesses a certain manifold of states, the "stationary states", to which corresponds in general a discrete sequence of energy values and which have a peculiar stability. This latter shows itself in that every change in the energy of the atom must be due to a "transition" of the atom from one stationary state to another.

(2) The possibility of emission and absorption of radiation by atom is conditioned by the possibility of energy changes of the atom, in such a way that the frequency of the radiation is connected with the energy difference between the initial and final states by the formal relation $h\nu = E_2 - E_1$.

These postulates, which cannot be explained on classical ideas, seem to offer a suitable basis for the general account of the observed physical and chemical properties of the elements. In particular, an immediate explanation is given of a fundamental feature of the empirical spectra laws. This feature, the Ritz principle of combination of spectra lines, states that the frequency of every line in a spectra can be represented as the difference between two terms of a manifold of spectra terms characteristic of the element; in fact, we see that these terms can be identified with the energy values of the stationary states of the atom, divided by h . In addition, this account of the origin of spectra gives an immediate explanation of the fundamental difference between absorption and emission spectra. For, according to the postulates, the condition for selective absorption of a frequency which corresponds to the combination of two terms is that the atom is in the state of smaller energy, while for emission of such radiation it must be in state of greater energy. In short, the picture described is in very close agreement with the experiment results on the excitation of spectra. This is shown especially in the discovery of Franck and Hertz as to impacts between free electrons and atoms. They found that an energy transfer from the electron to the atom can take place only in amounts which are just the energy differences of the stationary states as computed from the spectra terms. In general, the atom is simultaneously excited to emit. Similarly, the excited atom can, according to Klein and Rosseland, lose its emissive power through an impact, and the colliding electron experiments a corresponding increase of its energy.

As Einstein has shown, the postulates also furnish a suitable basis for a rational treatment of statistical problems, especially for a very lucid derivation of Planck's law of radiation. This theory assumes that an atom, which can undergo a transition between two stationary states and is in higher state, has a certain "probability", depending only on the atom, of jumping spontaneously to the lower state in a given interval of time. Further, it assumes that external illumination with radiation of the frequency corresponding to the transition gives the atom a probability, proportional to the intensity of the radiation, of going from the lower to the higher state. It is also an essential feature of the theory that illumination with this frequency gives the atom in the higher state, besides its spontaneous probability, an induced probability of jumping down to the lower state.

While Einstein's theory of heat radiation gives support to the postulates, it accentuates the formal nature of the frequency condition. For, from the conditions for complete thermal equilibrium, Einstein draws the conclusion that every absorption and emission process is $h\nu/c$, where c is the velocity of light, just as the idea of light quanta would lead one to expect. The significance of this conclusion has been emphasized in a very interesting way by the discovery of Compton that the scattering of homogeneous X-rays is accompanied by a change of wavelength in the scattered radiation depending on the direction of observation. Such a change in frequency follows in a simple way the light-quantum theory if in the deflection of the quantum one takes into account the conservation of momentum as well as energy.

The constantly growing contrast between the wave theory of light, apparently required for the explanation of optical phenomena, and the light-quantum theory, which represents naturally so many features of the interaction between light and matter, suggested that the failure of classical theories may even affect the validity of the laws of conservation of energy and momentum. These laws, which hold so central a position in the classical theory, would, then, in the description of atom process, be only statistically valid. However, this suggestion does not offer a satisfactory escape from the dilemma, as is shown by the experiments on the scattering of X-rays which have been undertaken recently with the beautiful methods permitting a direct observation of individual processes. For Geiger and Bothe have been able to show that the recoil electrons and photo-electrons which accompany the production and absorption of the scattered radiation are coupled in pairs just as one would expect from the picture of the light-quantum theory. With the method of the Wilson cloud chamber, Compton and Simon have even succeeded in demonstrating, besides this pairing, the connection demanded by the light-quantum theory between the direction in which the effect of the scattered radiation is observed and direction of the velocity of the recoil electrons accompanying the scattering.

From these results it seems to follow that, in the general problem of the quantum theory, one is faced not with a modification of the mechanics and electrodynamical theories describable in terms of the usual physical concepts, but with an essential failure of the pictures in space and time on which the description

of natural phenomena has hitherto been based. This failure appears also in a closer consideration of impact phenomena. In particular, for impacts in which the time of collision is short compared to the natural periods of the atom and for which very simple results are to be expected according to the usual mechanics ideas, the postulate of stationary states would seem to be irreconcilable with any description of the collision in space and time based on the accepted ideas atom structure.

3. THE CORRESPONDENCE PRINCIPLE

Nevertheless, it has been possible to construct mechanics pictures of the stationary states which rest the concept of the nuclear atom and have been essential in interpreting the specific properties of the elements. In the simplest case of an atom with only one electron, such as the neutral hydrogen atom, the orbit of the electron would be in classical mechanics a closed ellipse, obeying Kepler's laws, according to which the major axis and frequency of revolution are connected in a simple way with the work necessary for a complete separation of the atom particles. Now if we regard the spectra terms of the hydrogen spectra as determining this work, we see in that spectra evidence of the steplike process through which the electron under emission of radiation is gradually bound more and more firmly in states visualized as orbits of smaller and smaller dimensions. When the electron is bound as firmly as possible, and the atom can therefore emit no further radiation, the normal state of the atom has been reached. The orbital dimensions estimated from the spectra terms have values for this state of the same order of magnitude as the atom dimensions obtained from the mechanics properties of the elements. From the nature of the postulates, however, such features of the mechanics pictures as frequency of revolution and shape of the electronic orbits is not open comparison with observations. The symbolic character of these pictures can scarcely be more strongly emphasized than by the fact that in the normal state no radiation is emitted, although according to the mechanics picture the electron is still moving.

Nevertheless, the visualization of the stationary states by mechanics pictures has brought to light a far-reaching analogy between the quantum theory and the mechanics theory. This analogy was traced by investigating the conditions in the initial stages of the binding process described, where the motions corresponding to successive stationary states differ comparatively little from each other. Here it was possible to demonstrate an asymptotic agreement between spectra and motion. This agreement establishes a quantitative relation by which the constant appearing in Balmer's formula for the hydrogen spectra is expressed in terms of Planck's constant and the values of the charge and mass of the electron. The essential validity of this relation was clearly illustrated by the subsequent test of the predictions of the theory regarding the dependence of the spectra on the nuclear charge. The latter result may be considered as the first step towards the fulfillment of the program presented by the concepts of the nuclear atom, to account for the relationships between the properties of the elements solely by means of the integer which represents the number of unit charges on the nucleus, the so-called "atom number".

The demonstration of the asymptotic agreement between spectra and motion gave rise to the formulation of the "correspondence principle", according to which the possibility of every transition process connected with emission of radiation is conditioned by the presence of a corresponding harmonic component in the motion of the atom. Not only do the frequencies of the corresponding harmonic components agree asymptotically with the values obtained from the frequency condition in the limit where energies of the stationary states converge, but also the amplitudes of the mechanics oscillatory components give in this limit an asymptotic measure for the probabilities of the transition processes on which the intensities of the observable spectra lines depend. The correspondence principle expresses the tendency to utilize in the systematic development of the quantum theory every feature of the classical theories in a rational transcription appropriate to the fundamental contrast between the postulates and the classical theories.

The development was considerably furthered by the fact that it seemed possible to formulate certain general laws, the so-called rules of "quantization", by means of which the mechanics motions associated with the stationary states were to be chosen from the continuous manifold of such motions. These rules concern atom systems for which the solution of the mechanics equations of motion is simply - or multiply-periodic. In these cases the motion of every particle can be represented as a rational generalization of Planck's original result for the possible energy values of a harmonic oscillator, certain components of action which characterize the solution of the mechanics equations of motion are put equal to integral multiples of Planck's constant. By means of these rules a classification of the stationary states results in which a set of integers, the "quantum indices", is ascribed to every state. Their number is equal to the degree of periodicity of the mechanics motion.

In formulating the rules of quantization, the modern development of the mathematics methods of dealing with mechanics problems was of decisive importance. We need recall only the theory of phase integrals, utilized in particular by Sommerfeld, as well as the property of adiabatic invariance of these integrals emphasized by Ehrenfest. The theory was given a very elegant form by the introduction of the

uniformizing variables of Stäckel. In this form the fundamental frequencies determining the periodicity properties of the mechanics solution appear as the partial derivatives of the energy with respect to the components of action to be quantized. The asymptotic connection between the motion and the spectra as calculated from the frequency condition is secured in this way.

With the help of the rules of quantization, many finer details of spectra seemed to be accounted for naturally. Of especial interest was Sommerfeld's demonstration that the small deviations from a Keplerian motion, which result from the modification of Newtonian mechanics demanded by the relativity theory, offer an explanation of the fine structure of the hydrogen lines. Furthermore, we would recall here the explanation given by Epstein and Schwarzschild of the splitting up of the hydrogen lines in an external electric field which Stark discovered.

We are here dealing with a mechanics problem, the treatment of which was much improved in the hands of mathematicians like Euler and Lagrange, until Jacobi stated his famous elegant solution by means of Hamilton's partial differential equation. Especially after the utilization of the correspondence principle - by which not only the polarization of the Stark effect components was interpreted, but also, as Kramers showed, the peculiar intensity distribution of these components - can we say that in this effect every trait of Jacobi's solution can be recognized, although hidden under a quantum theory mask. In this connection it is of interest to mention that with the help of the correspondence principle, the effect of a magnetic field on the hydrogen atom could be treated so as to show a far-reaching similarity with Lorentz's account of the Zeeman effect on the basis of classical electrodynamics, especially in the form given by Larmor.

4. RELATIONSHIPS BETWEEN THE ELEMENTS

While the last-mentioned problems represent direct applications of the rules of quantization, we meet, in the problem of the structure of atoms with several electrons, a case where the general solution of the mechanics problem does not possess the periodic properties which seem to be necessary for the mechanics picturing of the stationary states. It suggested itself, however, that this further limitation of the applicability of mechanics pictures in the study of the properties of atoms with several electrons, beyond that in the study of atoms containing only one electron, is directly connected with the postulate of the stability of stationary states. In fact, the interaction of the electrons in the atom presents a problem which is quite analogous to the problem of a collision between an atom and a free electron. Just as no mechanics explanation can be given for the stability of an atom in the collision, so we must suppose that already, in the description of the stationary states of the atom, the special part which every electron plays in its interaction with the other electrons is secured in an entirely unmechanical way.

This view is in general conformity with the spectroscopic evidence. An important feature of this evidence is the discovery of Rydberg that, in spite of the more complicated structure of the spectra of other elements compared to that of hydrogen, the same constant as that in the Balmer formula appears in the empirical formulae of the series spectra of all elements. This discovery is simply explained by regarding the series spectra as evidence of processes by which an electron is added to an atom, its binding becoming more firm step by step with the emission of radiation. While the character of the binding of the other electrons remains the same, the steplike strengthening of the binding of this electron is visualized by orbits which at first are large compared with usual atom dimensions, and become smaller and smaller until the normal state of the atom is reached. In the case when the atom has a single positive charge before the capture of the electron, the attraction for the electron by the rest of the atom will, on this picture of the binding process, at first coincide closely with the attraction of the particles in the hydrogen atom. It is therefore clear why the spectra terms representing the binding of the electrons show as asymptotic convergence to the terms of the hydrogen spectra. In the same way one obtains a direct explanation of the general dependence of a series spectra on the state of ionization of the atom, brought to light so beautifully through the work of Fowler and Paschen.

Typical evidence of the way in which the electrons are bound in the atoms is also afforded by the study of the X-ray spectra. On one hand, the fundamental discovery of Moseley, of the striking similarity of the X-ray spectra of an element to the spectra that corresponds to the binding of a single electron by the nucleus, can be easily understood if it is remembered that in the interior of the atom the direct influence of the nucleus on the nature of the binding of each individual electron exceeds greatly the mutual influence of the electrons. On the other hand, the X-ray spectra show certain characteristic differences from the series spectra. These originate from the circumstance that in the former we do not witness the binding of an additional electron in the atom, but the reorganization of the binding of the remaining electrons upon removal of one of one electron previously bound. This circumstance, which has been especially emphasized by Kossel, was well suited for bringing to light new and important features of the stability of atom structure.

To account for the electrons in the atom is, of course, required. Disregarding a strict application of mechanics, an attack was made on this problem by assigning to every electron a motion of such periodic properties that a classification of the spectra terms by means of quantum indices could be accomplished. In the hands of Sommerfeld, in particular, a number of regularities of spectra were simply explained in this way. Further, these considerations afforded a fruitful field of application for the correspondence principle. In fact, this principle could explain the peculiar limitations in the possibilities of combining spectra terms, the so-called selection rules for spectra lines.

On these lines, it has recently been possible by making use of the evidence from series spectra, as well as from X-ray spectra, to draw conclusions about the grouping of electrons in the normal state of the atom. This grouping explained the general features of the periodic system of the elements in conformity with the ideas of chemical activity of atoms as developed especially by J. J. Thomson, Kossel, and G. N. Lewis. Progress in this field has been intimately connected with the great enrichment during the last few years of spectroscopic evidence, and, not least, by the investigations of Lyman and Millikan, the gap has been almost bridged over between the optical spectra and the region of X-rays, where great advances have been made in recent years by Siegbahn and his collaborators. In this connection the works of Coster on the X-ray spectra of heavy elements is mentioned as affording beautiful support for the account of essential features of the periodic system.

5. INSUFFICIENCY OF MECHANICS PICTURES

The analysis of the finer details of the spectra however, has brought to light a number of features which could not be interpreted with mechanics pictures on the basis of the theory of periodicity systems. We refer in particular to the multiplet structure of spectra lines and the effect of magnetic fields on these structures. These latter phenomena, which are generally known as anomalous Zeeman effects and, as mentioned above, had already led to difficulties in the classical theories, fitted, it is true, in a natural way into the scheme of the fundamental postulates of the quantum theory. For, as Landé showed, the frequencies of the components into which each spectra line is split up by the field can, like the original lines, be represented as combinations of terms. The manifold of these magnetic terms is obtained by replacing each original spectra term by set values which differ from it by small quantities depending on the field intensity. In fact, the beautiful experiments of Stern and Gerlach, by which a direct connection was established between the force which acts on an atom in a non-homogeneous magnetic field and the energy values of the stationary states in the field calculated from the magnetic terms, may be regarded as a most direct support of the fundamental ideas of the quantum theory.

Landé's analysis discloses, however, a strange difference between the interactions of the electrons in the atom and the coupling of mechanics systems. In fact, we are forced to assume the presence of a mechanically indescribable "strain" in the interaction of the electrons which prevents a unique assignment of quantum indices on the basis of mechanics pictures. In the discussion of this problem a general condition of thermodynamic stability introduced by Ehrenfest played an important part. When applied to the postulates of the quantum theory, this condition states that statistical weight attributed to a stationary state is a quantity which cannot be changed by a continuous transformation of the atom system. Moreover, it has recently been recognized that this same condition leads, even for atoms with only one electron, to difficulties which point to a limitation of the validity of the theory of periodicity systems. In fact, the problem of the motion of point charges admits of certain singular solutions which must be excluded from the manifold of stationary states. This exclusion artificially restricts the rules of quantization, but at first this restriction did not obviously contradict experiment evidence. Difficulties of an especially grave nature, however, were brought to light by the interesting analysis by Klein and Lenz of the problem of a hydrogen atom in crossed electric and magnetic fields. Here it was found impossible to satisfy Ehrenfest's condition, since suitable variation of the external forces would gradually transform orbits depicting stationary states which could not always be excluded from the manifold of these states into orbits where the electron falls into the nucleus.

Apart from these difficulties, the analysis of the finer details of the spectra has considerably furthered the quantum theory interpretation of the laws of the relationships between the elements. In fact, an extension of the ideas regarding the grouping of the electrons to which the quantum theory has led has recently been suggested by Dauvillier, Main Smith, and Stoner, taking various kinds of evidence into consideration. Notwithstanding the formal nature of these suggestions, they exhibit a close connection with the spectra regularities disclosed by Landé's analysis. In this direction important progress has recently been made, especially by Pauli. Notwithstanding that the results thus obtained constitute an important step towards the above-mentioned program of accounting for the properties of the elements solely on the basis of the

number, it must be remembered, however, that the results do not allow of a unique association with mechanics pictures.

A new era in the development of the quantum theory has been opened up during the last few years by a closer study of optical phenomena. While, as mentioned above, the classical theory had such great successes in this field, the postulates at first gave no direct clue. From experiment, it is true, one could conclude that an atom, when illuminated, caused a scattering of the light essentially analogous to the classically computed scattering of elastically bound electrical particles, the natural frequencies of which are the same as the frequencies corresponding to the transition processes which the atom can perform under the influence of external radiation. In fact, on the classical theory such harmonic oscillators would, when excited, emit a radiation of just the same constitution as that of atoms transferred to a higher stationary state.

The possibility of obtaining a unified description of optical phenomena with this concept of oscillators conjugated to the transitions was essentially advanced by an idea of Slater, according to which the emission of radiation from an activated atom may be regarded as "cause" for the spontaneous transition, in analogy to the effect of incident radiation in producing transitions. Ladenburg made first important step towards a quantitative description of dispersion by suggesting a definitive connection between the scattering activity of the oscillators and the probabilities of the corresponding transitions in Einstein's theory. Decisive progress, however, was made by Kramers by an ingenious transcription in harmony with the correspondence principle of the effects which, according to classical theory, are brought about in an electro-dynamical system by illumination with light waves. Just as the radiation frequencies are calculated in the classical theory, on one hand, and the quantum theory on the other hand, it is typical in this transcription, that differential quotients are replaced by differences, in such a way that in the final formulae only quantities open to direct observation appear. Thus in Kramer's theory the scattering of an atom in a certain stationary state is quantitatively connected with the frequencies corresponding to the different transition processes to other stationary states as well as to the probabilities of the appearance of these transitions under the influence of illumination.

It is essential feature of the theory that in calculating the anomalous dispersion near spectra line, one has to take into account two opposite kinds of resonance effects depending on whether the spectra line corresponds to a transition of the atom to a state of larger or smaller energy. Only the first of these corresponds with the resonance effects which have been utilized previously in accounting for dispersion on the basis of the classical theory. It is also very interesting that the further development of the theory by Kramers and Heisenberg gave a natural quantitative description of additional scattering effects with changed frequencies, the existence of which had been predicted by Smekal from considerations based on the theory of light quanta, which thereby again has its fertility.

While this description of optical phenomena was entirely in harmony with the fundamental ideas of the quantum theory, it soon appeared that it stood in strange contradiction to the use of the mechanics pictures previously employed for an analysis of the stationary states. In the first place, it is impossible on the basis of the scattering activity of illuminated atoms demanded by the dispersion theory to construct an asymptotic connection between the reaction of an atom in alternating fields of smaller and smaller frequency and the reaction in constant fields as calculated from quantization rules of the theory of periodicity systems. This difficulty strengthened the doubts about this theory to which, as already mentioned, the problem of the hydrogen atom in crossed electric and magnetic fields had led. Secondly, it had to be regarded as especially unsatisfactory that the theory of periodicity systems was apparently helpless in the problem of the quantitative determination of the transition probabilities on the basis of the mechanics pictures of stationary states. This was felt all the more, as it was possible in several cases to obtain a quantitative formulation of the general statements of the correspondence principle as regards these transition probabilities with the help of viewpoints suggested by an analysis of the optical behavior of electro-dynamic models. These results stood in excellent agreement with measurements on the relative intensities of spectra lines, as they have been developed especially in Utrecht during the last few years, but they could only in a very artificial way be included in the schemes governed by the rules of quantization.

6. THE DEVELOPMENT OF A RATIONAL QUANTUM MECHANICS

Quite recently Heisenberg, who has especially emphasized these difficulties, has taken a step probably of fundamental importance by formulating the problems of the quantum theory in a novel way by which the difficulties attached to the use of mechanics pictures may, it is hoped, be avoided. In this theory the attempt is made to transcribe every use of mechanics concepts in a way suited to the nature of the quantum theory, and such that in every stage of the computation only directly observable quantities enter. In contrast to ordinary mechanics, the new quantum mechanics does not deal with a space-time

description of the motion of atom particles. It operates with manifolds of quantities which replace the harmonic oscillating components of the motion and symbolize the possibilities of transitions between stationary states in conformity with the correspondence principle. These quantities satisfy certain relations who take the place of the mechanics equations of motion and the quantization rules.

That such a procedure actually leads to a self-contained theory sufficiently analogous to classical mechanics depends essentially on the fact that, as Born and Jordan were able to show, there exists in Heisenberg's quantum mechanics a conservation theorem analogous to the energy law of classical mechanics. The theory is built up in such a way that it is automatically in harmony with the postulates of the quantum theory. In particular, the frequency condition is fulfilled by the values for energies and frequencies derived from the quantum mechanics equations of motion. Although the fundamental relations which take the place of the quantization rules involve Planck's constant. Quantum indices do not appear explicitly in these relations. The classification of stationary states is based solely on a consideration of the transition possibilities, which enable the manifold of these states to be built up step by step. In brief, the whole apparatus of the quantum mechanics can be regarded as a precise formulation of the tendencies embodied in the correspondence principle. It must here be mentioned that the theory fulfils the requirements of Kramers' dispersion theory.

Owing to the great difficulties of the mathematics problem involved, it has not yet been possible to apply Heisenberg's theory to questions of atom structure. From the above brief description it will be understood, however, that a number of results, which, like the expression for Rydberg's constant, had formerly been obtained on the basis of mechanics pictures by the aid of the correspondence principle, will retain their validity. Moreover, it is of the greatest interest that already in the simple cases for which up to now a treatment on the basis of Heisenberg's theory has been carried out, the new theory leads, besides, to a quantitative calculation of the transition probabilities and to energy values for the stationary states which differ systematically from those obtained by the quantization rules of the older theory. One may therefore hope that Heisenberg's theory will be helpful in the struggle with the puzzling difficulties, mentioned above, in the study of the finer details of the spectra.

Earlier in this paper mention was made of the fundamental difficulties involved in the construction of pictures of the interaction between atoms either by means of radiation or by collisions. These difficulties seem to require just that renunciation of mechanics models in space and time which is so characteristic a feature in the new quantum mechanics. As yet, however, the formulation of this mechanics takes no account of the coupling of transition processes in pairs which show itself in those interactions. In fact, only those quantities which depend on the existence of the stationary states and the possibilities of transitions between them occur in the new theory, which definitely avoids any mention of the times at which transitions take place. This restriction, however, which is typical of the attack on the problem of the constitution of the atom based on the postulates of the quantum theory, allows only some aspects of the analogy between the quantum theory and the classical theories to come light. These aspects belong principally to the radiative properties of atoms, and just here Heisenberg's theory represents a real advance. In particular it allows us, in the phenomena of scattering, to recognize the presence of electrons bound in atoms in a way completely analogous to the classical theories, which, as stated above, in the hands of J. J. Thomson enabled the number of electrons in an atom to be counted from measurements of scattering of X-rays. The problems arising out of the validity of the conservation laws in atom interaction involve, however, quite other aspects of the correspondence of the quantum theory with the classical theory. These are equally essential in the general formulation of the quantum theory, and it is impossible to avoid discussing them when the reaction of atoms to swiftly moving particles is more closely studied. It is just here, indeed, that the classical theories have contributed so fundamentally to our knowledge of atom structure.

It will interest mathematics circles that the mathematics instruments created by the higher algebra play an essential part in the rational formulation of the new quantum mechanics. Thus, the general proofs of the conservation theorems in Heisenberg's theory carried out by Born and Jordan are based on the use of the theory of matrices, which go back to Cayley and were developed especially by Hermite. It is to be hoped that a new era of mutual stimulation of mechanics and mathematics has commenced. To the physicists it will at first seem deplorable that in atom problems we have apparently met with such a limitation of our usual means of visualization. This regret will, however, have to give way to thankfulness that mathematics in this field, too, presents us with the tools to prepare the way for further progress.

- **TEXTO 1B – The Quantum Postulate and the Recent Development of Atom Theory (1927)**

Although it is with great pleasure that I follow the kind invitation of the presidency of the congress to give an account of the present state of the quantum theory in order to open a general discussion on this subject, which takes so central a position in modern physics science, it is with a certain hesitation that I enter on this task. Not only is the venerated originator of the theory present himself, but among the audience there will be several who, due to their participation in the remarkable recent development, will be surely be more conversant with details of the highly developed formalism than I am. Still I shall try, by making use only of simple considerations and without going into any details of technical mathematical character, to describe to you a certain general point of view which I believe is suited to give an impression of the general trend of the development of the theory from its very beginning and which I hope will be helpful in order to harmonize the apparently conflicting views taken by different scientists. No subject indeed may be better suited than the quantum theory to mark the development of physics in the century passed since the death of the great genius, whom we are here assembled to commemorate. At the same time, just in a field like this where we are wandering on new paths and have to rely upon our own judgment in order to escape from the pitfalls surrounding us on all sides, we have perhaps more occasion than ever at every step to be reminded of the work of the old masters who have prepared the ground and furnished us with our tools.

I. QUANTUM POSTULATE AND CAUSALITY

The quantum theory is characterized by the acknowledgment of a fundamental limitation in the classical physics ideas when applied to atom phenomena. The situation thus created is of a peculiar nature, since our interpretation of the experiment material rests essentially upon the classical concepts. Notwithstanding the difficulties which, hence, are involved in the formulation of the quantum theory, it seems, as we shall see, that its essence may be expressed in the so called quantum postulate, which attributes to any atom process an essential discontinuity, or rather individuality, completely foreign to the classical theories and symbolized by Planck's quantum of action.

This postulate implies a renunciation as regards the causal space time co-ordination of atom processes. Indeed, our usual description of physics phenomena is based entirely on the idea that the phenomena concerned may be observed without disturbing them appreciably. This appears, for example, clearly in the theory of relativity, which has been so fruitful for the elucidation of the classical theories. As emphasized by Einstein, every observation or measurement ultimately rests on the coincidence of two independent events at the same space time point. Just these coincidences which the space time coordination of different observers otherwise may exhibit. Now, the quantum postulate implies that any observation of atom phenomena will involve an interaction with the agency of observation not to be neglected. Accordingly, an independent reality in the ordinary physics sense can neither be ascribed to the phenomena nor to the agencies of observation. After all, the concept of observation is in so far arbitrary as it depends upon which objects are included in the system to be observed. Ultimately, every observation can, of course, be reduced to our sense perceptions. The circumstance, however, that in interpreting observations use has always to be made of theoretical notions entails that for every particular case it is a question of convenience at which point the concept of observation involving the quantum postulate with its inherent "irrationality" is brought in.

This situation has far reaching consequence. On one hand, the definition of the state of a physics system, as ordinarily understood, claims the elimination of all external disturbances. But in that case, according to the quantum postulate, any observation will be impossible, and, above all, the concepts of space and time lose their immediate sense. On the other hand, if in order to make observation possible we permit certain interactions with suitable agencies of measurement, not belonging to the system, an unambiguous definition of the state of the system is naturally no longer possible, and there can be no question of causality in the ordinary sense of the word. The very nature of the quantum theory thus forces us to regard the space time coordination and the claim of causality, the union of which characterizes the classical theories, as complementary but exclusive features of the description, symbolizing the idealization of observation and definition respectively. Just as the relativity theory has taught us that the convenience of distinguishing sharply between space and time rests solely on the smallness of the velocities ordinarily met with compared to the velocity of light, we learn from the quantum theory that the appropriateness of our usual causal space time description depends entirely upon the small value of the quantum of action as compared to the actions involved in ordinary sense perceptions. Indeed, in the description of atom

phenomena, the quantum postulate presents us with the task of developing a "complementary" theory the consistency of which can be judged only by weighing the possibilities of definition and observation.

The view is already clearly brought out by the much discussed question of the nature of light and the ultimate constituents of matter. As regards light, its propagation in space and time is adequately expressed by the electromagnetic theory. Especially the interference phenomena in vacuum and the optical properties of material media are completely governed by the wave theory superposition principle. Nevertheless, the conservation of energy and momentum during the interaction between radiation and matter, as evident in the photoelectric and Compton Effect, finds its adequate expression just in the light quantum idea put forward by Einstein. As is well known, the doubts regarding the validity of the superposition principle, on one hand, and of the conservation laws, on the other, which were suggested by this apparent contradiction, have been definitely disproved through direct experiments. This situation would seem clearly to indicate the impossibility of a causal space time description of the light phenomena. On one hand, in attempting to trace the laws of the time spatial propagation of light according to the quantum postulate, we are confined to statistical considerations. On the other hand, the fulfillment of the claim of causality for the individual light processes, characterized by the quantum of action, entails a renunciation as regards the space time description. Of course, there can be no question of a quite independent application of the ideas of space and time and of causality. The two views of the nature of light are rather to be considered as different attempts at an interpretation of experiment evidence in which the limitation of the classical concepts is expressed in complementary ways.

The problem of the nature of the constituents of matter presents us with an analogous situation. The individuality of the elementary electric corpuscles is forced upon us by general evidence. Nevertheless, recent experience, above all the discovery of the selective reflection of electrons from metal crystals, requires the use of the wave theory superposition principle in accordance with the original ideas of L. de Broglie. Just as in the case of light, we have consequently in the question of the nature of matter, so far as we adhere to classical concepts, to face an inevitable dilemma which has to be regarded as the very expression of experiment evidence. In fact, here again we are not dealing with contradictory but with complementary pictures of the phenomena, which only together offer a natural generalization of the classical mode of description. In the discussion of these questions, it must be kept in mind that, according to the view taken above, radiation in free space as well isolated material particles are abstractions, their properties on the quantum theory being definable and observable only through their interaction with other systems. Nevertheless, these abstractions are, as we shall see, indispensable for a description of experience in connection with our ordinary space time view.

The difficulties with which a causal space time description is confronted in the quantum theory, and which has been the subject of repeated discussions, are now placed into the foreground by the recent development of the symbolic methods. An important contribution to the problem of a consistent application of these methods has been made lately by Heisenberg. In particular, he has stressed the peculiar reciprocal uncertainty which affects all measurements of atom quantities. Before we enter upon his results, it will be advantageous to show how the complementary nature of the description appearing in this uncertainty is unavoidable already in an analysis of the most elementary concepts employed in interpreting experience.

2. QUANTUM OF ACTION AND KINEMATICS

The fundamental contrast between the quantum of action and the classical concepts is immediately apparent from the simple formulae which form the common foundation of the theory of light quanta and of the wave theory of material particles. If Planck's constant be denoted by h , as is well known, where E and I are energy and momentum respectively, the corresponding period of vibration and wavelength. In these formulae the two notions of light and also of matter enter in sharp contrast. While energy and momentum are associated with the concept of particles, and, hence, may be characterized according to the classical point of view by definite space time coordinates, the period of vibration and wavelength refer to a plane harmonic wave train of unlimited extent in space and time. Only with the aid of the superposition principle does it become possible to attain a connection with the ordinary mode of description. Indeed, a limitation of the extent of the wave fields in space and time can always be regarded as resulting from the interference of a group of elementary harmonic waves. As shown by de Broglie, the translational velocity of the individuals associated with the waves can be represented by just the so called group velocity. Let us denote a plane elementary wave by $\psi = A \cos(Et - Ix + \phi)$ where E and I are constants determining respectively the amplitude and the phase. The quantity $\frac{E}{h}$ is the frequency the wave numbers in the direction of the coordinate axes, which may be regarded as vector components of the wave number in the directions of propagation. While the wave or phase velocity is given by $v = \frac{E}{I}$ the group velocity is defined by $v_g = \frac{dE}{dI}$. Now according to the relativity theory we have for a particle with the velocity v : where c denotes the velocity of light. Hence by equation

(I) the phase velocity is and the group velocity. The circumstance that the former is in general greater than velocity of light emphasizes the symbolic character of these considerations. At the same time, the possibility of identifying the velocity of the particle with the group velocity indicates the field of application of space time pictures in the quantum theory. Here the complementary character of the description appears, since the use of wave groups is necessarily accompanied by a lack of sharpness the definition of period and wavelength, and hence also in the definition of the corresponding energy and momentum as given by relation (I).

Rigorously speaking, a limited wave field can only be obtained by the superposition of a manifold of elementary waves corresponding to all values. But the order of magnitude of the mean difference between these values for two elementary waves in the group is given in the most favorable case by the condition where denote the extension of the wave field in time and in the directions of space corresponding to the coordinate axes. These relations - well known from the theory of optical instruments, especially from Rayleigh's investigation of the resolving power of spectrum apparatus - express the condition that the wave trains extinguish each other by interference at the space time boundary of the wave field. They may be regarded also as signifying that group as a whole has no phase in the same sense as the elementary waves. From equation (I) we find thus:

As determining the highest possible accuracy in the definition of the energy and momentum of the individuals associated with the wave field. In general, the conditions for attributing an energy and a momentum value to a wave field by means of formula (I) are much less favorable. Even if the composition of the wave group corresponds in the beginning to the relations (2), it will in the course of time be subject to such changes that it becomes less and less suitable for representing an individual. It is this very circumstance which gives rise to the paradoxical character of the problem of the nature of light and of material particles. The limitation in the classical concepts expressed through relation (2), is, besides, closely connected with the limited validity of classical mechanics, which in the wave theory of matter corresponds to the geometrical optics in which the propagation of waves is depicted through "rays". Only in this limit can energy and momentum be unambiguously defined on the basis of space time pictures. For a general definition of these concepts we are confined to the conservation laws, the rational formulation of which has been a fundamental problem for the symbolics methods to be mentioned below.

In the language of the relativity theory, the content of the relations (2) may be summarized in the statement that according to the quantum theory a general reciprocal relation exists between the maximum sharpness of definition of the space time and energy momentum vectors associated with the individuals. This circumstance may be regarded as a simple symbolics expression for the complementary nature of the space time description and the claims of causality. At the same time, however, the general character of this relation makes it possible to a certain extent to reconcile the conservation laws with the space time coordination of observations, the idea of a coincidence of well defined events in a space time point being replaced by that of unsharply defined individuals within finite space time regions.

This circumstance permits us to avoid well known paradoxes which are encountered in attempting to describe the scattering of radiation by free electric particles as well as the collision of two such particles. According to the classical concepts, the description of the scattering requires a finite extent of the radiation in space and time, while in the change of the motion of the electron demanded by the quantum postulate one seemingly is dealing with as instantaneous effect taking place at a definite point in space. Just as in the case of radiation, however, it is impossible to define momentum and energy for an electron without considering a finite space time region. Furthermore, an application of the conservations laws to the process implies that the accuracy of definition of the energy momentum vector is the same for the radiation and the electron. In consequence, according to relation (2), the associated space time regions can be given the same size for both individuals in interaction.

A similar remark applies to the collision between two material particles, although the significance of the quantum postulate for this phenomenon was disregarded before the necessity of the wave concept was realized. Here, this postulate does, indeed, represent the idea of the individuality of the particles which, transcending the space time description, meets the claim of causality. While the physics content of the light quantum idea is wholly connected with the conservation theorems for energy and momentum, in the case of the electric particles the electric charge has to be taken into account in this connection. It is scarcely necessary to mention that for a more detailed description of the interaction between individuals we cannot restrict ourselves to the facts expressed by formulae (I) and (2), but must resort to a procedure which allows us to take into account the coupling of the individuals, characterizing the interaction in question, where just the importance of the electric charge appears. As we shall see, such a procedure necessitates a further departure from visualization in the usual sense.

3. MEASUREMENTS IN THE QUANTUM THEORY

In his investigations already mentioned on the consistency of the quantum theoretical methods, Heisenberg has given the relation (2) as an expression for the maximum precision with which the space time coordinates and momentum energy components of a particle can be measured simultaneously. His view was based on the following consideration: On one hand, the coordinates of a particle can be measured with any desired degree of accuracy by using, for example, an optical instrument, provided radiation of sufficiently short wavelength is used for illumination. According to the quantum theory, however, the scattering of radiation from the object is always connected with a finite change in momentum, which is the larger the smaller the wavelength of the radiation used. The momentum of a particle, on the other hand, can be determined with any desired degree of accuracy by measuring, for example, the Doppler effect of the scattered radiation, provided the wavelength of the radiation is so large the effect of recoil can be neglected, but then the determination of the space coordinates of the particle becomes correspondingly less accurate.

The essence of this consideration is the inevitability of the quantum postulate in the estimation of the possibilities of measurements. A closer investigation of the possibilities of definition would still seem necessary in order to bring out the general complementary character of the description. Indeed, a discontinuous change of energy and momentum during observation could not prevent us from ascribing accurate values to the space time coordinates, as well as to the momentum energy components before and after the process. The reciprocal uncertainty which always affects the values of these quantities is, as will be clear from the preceding analysis, essentially an outcome of the limited accuracy with which changes in energy and momentum can be defined, when the wave fields used for the determination of the space time coordinates of the particle are sufficiently small.

In using an optical instrument for determinations of position, it is necessary to remember that the formation of the image always requires a convergent beam of light. Denoting by the wavelength of the radiation used, and by the so called numerical aperture, that is, the sine of half the angle of convergence, the resolving power of a microscope is given by the well known expression. Even if the object is illuminated by parallel light, so that the momentum of the incident light quantum is known both as regards magnitude and direction, the finite value of the aperture will prevent an exact knowledge of the recoil accompanying the scattering. Also, even if the momentum of the particle were accurately known before the scattering process, our knowledge of the component of momentum parallel to the focal plane after the observation would be affected by an uncertainty amounting. The product of the least inaccuracies with which the positional coordinate and the component of momentum in a definite direction can be ascertained is therefore just given by formula (2). One might perhaps expect that in estimating the accuracy of determining the position, not only the convergence but also the length of the wave train has to be taken into account, because the particle could change its place during the finite time of illumination. Due to the fact, however, that the exact knowledge of the wavelength is immaterial for the above estimate, it will be realized that for any value of the aperture the wave train can always be taken so short that a change of position of the particle during the time of observation may be neglected in comparison to the lack of sharpness inherent in the determination of position due to the resolving power of the microscope.

In measuring momentum with the aid of the Doppler Effect - with due regard to the Compton Effect - one will employ a parallel wave train. For the accuracy, however, with which the change in wavelength of the scattered radiation can be measured the extent of the wave train in the direction of propagation is essential. If we assume that the directions of the incident and scattered radiation are parallel and opposite, respectively, to the direction of the position coordinate and momentum component to be measured, the can be taken as a measure of the accuracy in the determination of the velocity, where l denotes the length of the wave train. For simplicity, we here have regarded the velocity of light as large compared to the velocity of the particle. If m represents the mass of the particle, then the uncertainty attached to the value of the momentum after observation. In this case the magnitude of the recoil is sufficiently well defined in order not to give rise to an appreciable uncertainty in the value of the momentum of the particle after observation. Indeed, the general theory of the Compton effects allows us to compute the momentum components in the direction of the radiation before and after the recoil from the wavelengths of the incident and scattered radiation. Even if the positional coordinates of the particle were accurately known in the beginning, our knowledge of the position after observation nevertheless will be affected by an uncertainty. Indeed, on account of the impossibility of attributing a definite instant to the recoil, we know the mean velocity in the direction of observation during the scattering process only with accuracy. The uncertainty in the position after observation hence. Here, too, the product of the inaccuracies in the measurement of position and momentum is thus given by the general formula (2).

Just as in the case of the determination of position, the time of the process of observation for the determination of momentum may be made as short as is desired, if only the wavelength of the radiation used is sufficiently small. The fact that the recoil then gets larger does not, as we have seen, affect the

accuracy of measurement. It should further be mentioned, that in referring to be the velocity of a particle as we here done repeatedly, the purpose has only been to obtain a connection with the ordinary space time description convenient in this case. As it appears already from the considerations of de Broglie mentioned above, the concept of velocity must always in the quantum theory be handled with caution. It will also be seen that an unambiguous definition of this concept is excluded by the quantum postulate. This is particularly to be remembered when comparing the results of successive observations. Indeed, the position of an individual at two given moments can be measured with any desired degree of accuracy; but if, from such measurements, we would calculate the velocity of the individual in the ordinary way, it must be clearly realized that we are dealing with an abstraction, from which no unambiguous information concerning the previous or future behavior of the individual can be obtained.

According to the above considerations regarding the possibilities of definition of the properties of individuals, it will obviously make no difference in the discussion of the accuracy of measurements of position and momentum of a particle if collisions with other material particles are considered instead of scattering of radiation. In both cases, we see that the uncertainty in question equally affects the description of the agency of measurement and of the object. In fact, this uncertainty cannot be avoided in a description of the behavior of individuals with respect to a coordinate system fixed in the ordinary way means of solid bodies and imperturbable clocks. The experiment devices - opening and closing of apertures, etc. - are seen to permit only conclusions regarding the space time extension of the associated wave fields.

In tracing observations back to our sensations, once more regard has to be taken to the quantum postulate in connection with the perception of the agency of observation, be it through its direct action upon the eye or by means of suitable auxiliaries such as photographic plates, Wilson clouds, etc. It is easily seen, however, that the resulting additional statistical element will not influence the uncertainty in the description of the object. It might even be conjectured that the arbitrariness in what is regarded as object and what as agency of observation would open up a possibility of avoiding this uncertainty altogether. In connection with the measurement of the position of a particle, one might, for example, ask whether the momentum transmitted by the scattering could not be determined by means of the conservation theorem from a measurement of the change of momentum of the microscope - including light source and photographic plate - during the process of observation. A closer investigation shows, however, that such a measurement is impossible, if at the same time one wants to know the position of the microscope with sufficient accuracy. In fact, it follows from the experiences which have found expression in the wave theory of matter that the position of the centre of gravity of a body and its total momentum can only be defined within the limits of reciprocal accuracy given by relation (2).

Strictly speaking, the idea of observation belongs to the causal space time way of description. Due to the general character of relation (2), however, this idea can be consistently utilized also in the quantum theory, if only the uncertainty expressed through this relation is taken into account. As remarked by Heisenberg, one may obtain an instructive illustration of the quantum theoretical description of atom (microscopic) phenomena by comparing this uncertainty with the uncertainty, due to imperfect measurements, inherently contained in any observation as considered in the ordinary description of natural phenomena. He remarks on that occasion that even the case of macroscopic phenomena we may say, in a certain sense, that they are created by repeated observations. It must not be forgotten, however, that in the classical theories any succeeding observation permits a prediction of future events with ever increasing accuracy, because it improves our knowledge of the initial state of the system. According to the quantum theory, just the impossibility of neglecting the interaction with the agency of measurement means that every observation introduces a new uncontrollable element. Indeed, it follows from the above considerations that the measurements of the positional coordinates of a particle is accompanied not only by a finite change in the dynamical variables, but also the fixation of its position means a complete rupture in the causal description of its dynamical behavior, while the determination of its momentum always implies a gap in the knowledge of its spatial propagation. Just this situation brings out most strikingly the complementary character of the description of atom phenomena which appears as an inevitable consequence of the contrast between the quantum postulate and the distinction between object and agency of measurement, inherent in our very idea of observation.

4. CORRESPONDENCE PRINCIPLE AND MATRIX THEORY

Hitherto we have only regarded certain general features of the quantum problem. The situation implies, however, that the main stress has to be on the formulation of the laws governing the interaction between the objects which symbolize by the abstractions of isolated particles and radiation. Points of attack for this formulation are presented in the first place by the problem of atom constitution. As is well known, it has been possible here, by means of an elementary use of classical concepts and in harmony with the quantum

postulate, to throw light on essential aspects of experience. For example, the experiments regarding the excitation of spectra by electronic impacts and by radiation are adequately accounted for on the assumption of discrete stationary states and individual transition processes. This is primarily due to the circumstance that in these questions no closer description of the space time behavior of the processes is required.

Here the contrast with the ordinary way of description appears strikingly in the circumstance that spectrum lines, which on the classical view would be ascribed to the same state of the atom, will, according to the quantum postulate, correspond to separate transition processes, between which the excited atom has a choice. Notwithstanding this contrast, however, a formal connection with the classical ideas could be obtained in the limit where the relative difference in the properties of neighboring stationary states vanishes asymptotically and where in statistical applications the discontinuities may be disregarded. Through this connection it was possible to a large extent to interpret the regularities of spectra on the basis of our ideas about the structure of the atom.

The aim of regarding the quantum theory as a rational generalization of the classical theories led to the formulation of the so called correspondence principle. The utilization of this principle for the interpretation of spectroscopic results was based on a symbolics application of classical electrodynamic, in which the individual transition processes were each associated with a harmonic in the atom particles to be expected according to ordinary mechanics. Except in the limit mentioned, where the relative difference between adjacent stationary states may be neglected, such a fragmentary application of the classical theories could only in certain cases lead to a strictly quantitative description of the phenomena. Especially the connection developed by Ladenburg and Kramers between the classical treatment of dispersion and the statistical laws governing the radioactive transition processes formulated by Einstein should be mentioned here. Although it was just Kramers' treatment of dispersion that gave important hints for the rational development of correspondence considerations, it is only through the quantum theoretical methods created in the last few years that the general aims laid down in the principle mentioned have obtained an adequate formulation.

As is known, the new development was commenced in a fundamental paper by Heisenberg, where he succeeded in emancipating himself completely from the classical concept of motion by replacing from the very start the ordinary kinematics and mechanics quantities by symbols which refer directly to the individual processes demanded by the quantum postulate. This was accomplished by substituting for the Fourier development of a classical mechanics quantity a matrix scheme, the elements of which symbolize purely harmonic vibrations and are associated with the possible transition between stationary states. By requiring that the frequencies ascribed to the elements must always obey the combination principle for spectrum lines, Heisenberg could introduce simple rules of calculation for the symbols which permit a direct quantum theoretical transcription of the fundamental equations of classical mechanics. This ingenious attack on the dynamical problem of atom theory proved itself from the beginning to be an exceedingly powerful and fertile method for interpreting quantitatively the experiment results. Through the work of Born and Jordan, as well as of Dirac, the theory was given a formulation which can compete with classical mechanics as regards generality and consistency. Especially, the element characteristic of the quantum theory, Planck's constant, appears explicitly only in the algorithms to which the symbols, the so called matrices, are subjected. In fact, matrices, which represent canonically conjugated variables in the sense of the Hamiltonian equations, do not obey the commutative law of multiplication, but two such quantities, q and p , have to fulfill the exchange rule.

Indeed, this exchange relation expresses strikingly the symbolics character of the matrix formulation of the quantum theory. The matrix theory has often been called a calculus with directly observable quantities. It must be remembered, however, that the procedure described is limited just to those problems, in which applying the quantum postulate the space time description may largely be disregarded, and the question of observation in the proper sense therefore placed in the background.

In pursuing further correspondence of the quantum laws with classical mechanics, the stress placed on the statistical character of the quantum theoretical description, which is brought in by the quantum postulate, has been of fundamental importance. Here the generalization of the symbolics method made by Dirac and Jordan represented a great progress by making possible the operation with matrices, which are not arranged according to the stationary states, but where the possible values of any set of variables may appear as indices of the matrix elements. In analogy to the interpretation considered in the original form of the theory of the "diagonal elements" connected only with a single stationary state, as time averages of the quantity to be represented, the general transformation theory of matrices permits the representation of such averages of a mechanics quantity, in the calculation of which any set of variables characterizing the "state" of the system has given values, while the canonically conjugated variables are allowed to take all possible values. On the basis of the procedure developed by these authors and close connection with ideas of Born and Pauli, Heisenberg has in the paper already cited above attempted a closer analysis of the

physics content of the quantum theory, especially in view of the apparently paradoxical character of the exchange relation (3). In this connection he has formulated the relation as general expression for the maximum accuracy with which two canonically conjugated variables can simultaneously be observed. In this way Heisenberg has been able to elucidate many paradoxes appearing in the application of the quantum postulate, and to a large extent to demonstrate the consistency of the symbolic method. In connection with the complementary nature of the quantum theoretical description, we must, as already mentioned, constantly keep the possibilities of definition as well as of observation before the mind. For the discussion of just this question the method of wave mechanics developed by Schrödinger has, as we shall see, proved of great help. It permits a general application of the principle of superposition also in the problem of interaction, thus offering an immediate connection with the above considerations concerning radiation and free particles. Below we shall return to the relation of wave mechanics to the general formulation of the quantum laws by means of the transformation theory of matrices.

5. WAVE MECHANICS AND THE QUANTUM POSTULATE

Already in his first considerations concerning the wave theory of material particles, de Broglie pointed out that the stationary states of an atom may be visualized as an interference effect of the phase wave associated with a bound electron. It is true this point of view at first did not, as regards quantitative results, lead beyond the earlier methods of quantum theory, to the development of which Sommerfeld has contributed so essentially. Schrödinger, however, succeeded in developing a wave theoretical method which has opened up new aspects, and has proved to be of decisive importance for the great progress in atom physics during the last years. Indeed, the proper vibrations of the Schrödinger wave equation have been found to furnish a representation of the stationary states of an atom meeting all requirements. The energy of each state is connected with the corresponding period of vibration according to the general quantum relation (I). Furthermore, the number of nodes in the various characteristic vibrations gives a simple interpretation to the concept of quantum number which was already known from the older methods, but at first not seem to appear in the matrix formulation.

In addition, Schrödinger could associate with the solutions of the wave equation a continuous distribution of charge and current which, if applied to a characteristic vibration, represents the electrostatic and magnetic properties of an atom in the corresponding stationary state. Similarly, the superposition of two characteristic solutions corresponds to a continuous vibrating distribution of electric charge, which on classical electrodynamic would give rise to an emission of radiation, illustrating instructively the consequence of the quantum postulate and the correspondence requirement regarding the transition process between two stationary states formulated in matrix mechanics. Another application of the method of Schrödinger, important for the further development, has been made by Born in his investigation of the problem of collisions between atom and free electric particles. In this connection he succeeded in obtaining a statistical interpretation of the wave functions, allowing a calculation of the probability of the individual transition processes required by the quantum postulate. This includes a wave mechanics formulation of the adiabatic principle of Ehrenfest, the fertility of which appears strikingly in the promising investigations of Hund on the problem of the formation of molecules.

In view of these results, Schrödinger has expressed the hope that the development of the wave theory will eventually remove the irrational element expressed by the quantum postulate and open the way a complete description of atom phenomena along the line of the classical theories. In support of this view, Schrödinger, in a recent paper, emphasizes the fact that the discontinuous exchange of energy between atoms required by the quantum postulate, from the point of view of the wave theory, is replaced by a simple resonance phenomenon. In particular, the idea of individual stationary states would be an illusion and its applicability only an illustration of the resonance mentioned. It must be kept in mind, however, that just in the resonance problem mentioned we are concerned with a closed system which, according to the view presented here, is not accessible to observation. In fact, wave mechanics, just as the matrix theory, on this view represents a symbolic transcription of the problem of motion of classical mechanics adapted to the requirements of quantum theory and only to be interpreted by an explicit use of the quantum postulate. Indeed, the two formulations of the interaction problem might be said to be complementary in the same sense as the wave and particle idea in the description of the free individuals. The apparent contrast in the utilization of the energy concept in the two theories is just connected with this difference in the starting point.

The fundamental difficulties opposing a space time description of a system of particles in interaction appear at once from the inevitability of the superposition principle in the description of the behavior of individual particles. Already for a free particle the knowledge of energy and momentum excludes, as we have seen, the exact knowledge of its space time coordinates. This implies that an immediate utilization

of the concept of energy in connection with the classical idea of the potential energy of the system is excluded. In the Schrödinger wave equation these difficulties are avoided by replacing the classical expression of the Hamiltonian by a differential operator by means of the relation where p denotes a generalized component of momentum and q the canonically conjugated variable. Here the negative value of the energy is regarded as conjugated to the time. So far, in the wave equation, time and space as well as energy and momentum are utilized in a purely formal way.

The symbolical character of Schrödinger's method appears not only from the circumstance that its simplicity, similarly to that of the matrix theory, depends essentially upon the use of imaginary arithmetic quantities. But above all there can be no question of an immediate connection with our ordinary conceptions because the "geometrical" problem represented by the wave equation is associated with the so called coordinate space, the number of dimensions of which is equal to the number of degrees of freedom of the system, and, hence, in general greater than the number of dimensions of ordinary space. Further, Schrödinger's formulation of the interaction problem, just as the formulation offered by matrix theory, involves a neglect of the finite velocity of propagation of the forces claimed by relativity theory.

On the whole, it would scarcely seem justifiable, in the case of the interaction problem, to demand a visualization by means of ordinary space time pictures. In fact, all our knowledge concerning the internal properties of atoms is derived from experiments on their radiation or collision reactions, such that the interpretation of experiment facts ultimately depends on the abstractions of radiation in free space, and free material particles. Hence, our whole space time view of physics phenomena, as well as the definition of energy and momentum, depends ultimately upon these abstractions. In judging the applications of these auxiliary ideas, we should only demand inner consistency, in which connection special regard has to be paid to the possibilities of definition and observation.

In the characteristic vibrations of Schrödinger's wave equation we have, as mentioned, an adequate representation of the stationary states of an atom allowing an unambiguous definition of the energy of the system by means of the general quantum relation (I). This entails, however, that in the interpretation of observations a fundamental renunciation regarding the space time description is unavoidable. In fact, the consistent application of the concept of stationary states excludes, as we shall see, any specification regarding the behavior of the separate particles in the atom. In problems where a description of this behavior is essential, we are bound to use the general solution of the wave equation which is obtained by superposition of characteristic solutions. We meet here with a complementarity of the possibilities of definition quite analogous to that which we have considered earlier in connection with the properties of light and free material particles. Thus, while the definition of the energy and momentum of individuals is attached to the idea of a harmonic elementary wave, every space time feature of the description of phenomena is, as we have seen, based on a consideration of the interferences taking place inside a group of such elementary waves. Also in the present case the agreement between the possibilities of observation and those of definition can be directly shown.

According to be quantum postulate any observation regarding the behavior of the electron in the atom will be accompanied by a change in the state of the atom. As stressed by Heisenberg, this change will, in the case of atoms its stationary state of low quantum number, consist in general in the injection of the electron from the atom. A description of the "orbit" of the electron in the atom with the aid of subsequent observations is, hence, impossible in such a case. This is connected with the circumstance that from characteristic vibrations with only a few nodes no wave packages can be built up which would even approximately represent the "motion" of a particle. The complementary nature of the description, however, appears particularly in that the use of observations concerning the behavior of particles in the atom rests on the possibility of neglecting, during the process of observation, the interaction between the particles, thus regarding them as free. This requires, however, that the duration of the process is short compared with the natural periods of the atom, which again means that the uncertainty in the knowledge of the energy transferred in the process is large compared to the energy differences between neighboring stationary states.

In judging the possibilities of observation it must, on the whole, be kept in mind that wave mechanics solutions can be visualized only in so far as they can be described with the aid of the concept of free particles. Here the difference between classical mechanics and the quantum theoretical treatment of the problem of interaction appears most strikingly. In the former such a restriction is unnecessary because the "particles" are here endowed with as immediate "reality", independently of their being free or bound. This situation is particularly important in connection with the consistent utilization of Schrödinger's electric density as a measure of the probability for electrons being present within given space regions of the atom. Remembering the restriction mentioned, this interpretation is seen to be a simple consequence of the assumption that the probability of the presence of a free electron is expressed by the electric density associated with the probability of the presence of a light quantum is given by the energy density of the radiation.

As already mentioned, the means for a general consistent utilization of the classical concepts if the quantum theory have been created through the transformation theory of Dirac and Jordan, by the aid of which Heisenberg has formulated his general uncertainty relation (4). In this theory also the Schrödinger wave equation has obtained an instructive application. In fact, the characteristic solutions of this equation appear as auxiliary functions which define a transformation from matrices with indices representing the energy values of the system to other matrices, the indices of which are the possible values of the space coordinates. It is also of interest in this connection to mention that Jordan and Klein have recently arrived at the formulation of the problem of interaction expressed by the Schrödinger wave equation, taking as starting point the wave representation of individual particles and applying a symbolic method closely related to the deep going treatment of the radiation problem developed by Dirac from the point of view of the matrix theory, to which we shall return below.

6. REALITY OF STATIONARY STATES

In the stationary states we are, as mentioned, concerned with a characteristic application of the quantum postulate. By its very nature this conception means a complete renunciation as regards a time description. From the point of view taken here, just this renunciation forms the necessary condition for an unambiguous definition of the energy of the atom. Moreover, the conception of a stationary states involves, strictly speaking, the exclusion of all interactions with individuals not belonging to the system. The fact that such a closed system is associated with a particular energy value may be considered as an immediate expression for the claim of causality contained in the theorem of conservation of energy. This circumstance justifies the assumption of the supra mechanics stability of the stationary states, according to which the atom, before as well as after an external influence, always will be found in a well defined state, and which forms the basis for the use for the quantum postulate in problems concerning atom structure.

In a judgment of the well known paradoxes which this assumption entails for the description of collision and radiation reactions, it is essential to consider the limitations of the possibilities of definition of the reacting free individuals, which is expressed by relation (2). In fact, if the definition of the energy of the reacting individuals is to be accurate to such a degree as to entitle us to speak of conservation of energy during the reaction, it is necessary, according to this relation, to coordinate to the reaction a time interval long compared to the vibration period associated with the transition process, and connected with the energy difference between the stationary states according to relation (I). This is particularly to be remembered when considering the passage of swiftly moving particles through an atom. According to the ordinary kinematics, the effective duration of such a passage would be very small as compared with the natural periods of the atom, and it seemed impossible to reconcile the principle of conservation of energy with the assumption of the stability of stationary states. In the wave representation, however, the time of reaction is immediately connected with the accuracy of the knowledge of the energy of the colliding particle, and hence there can never be the possibility of a contradiction with the law of conservation. In connection with the discussion of paradoxes of the kind mentioned, Campbell suggested the view that the conception of time itself may be essentially statistical in nature. From the view advanced here, according to which the foundation of space time description is offered by the abstraction of free individuals a fundamental distinction between time and space, however, would seem to be excluded by the relativity requirement. The singular position of the time in problems concerned with stationary states is, as we have seen, due to the special nature of such problems.

The application of the conception of stationary states demands that in any observation, say by means of collision or radiation reactions, permitting a distinction between different stationary states, we are entitled to disregard the previous history of the atom. The fact that the symbolics quantum theory methods ascribe a particular phase to each stationary state the value of which depends upon the previous history of the atom, would for the first moment seem to contradict the very idea of stationary states. As soon as we are really concerned with a time problem, however, the consideration of a strictly closed system is excluded. The use of simply harmonic proper vibrations in the interpretation of observations means, therefore, only a suitable idealization which in a more rigorous discussion must always be replaced by a group of harmonic vibrations, distributed over a finite frequency interval. Now, as already mentioned, it is a general consequence of the superposition principle that it has no sense to coordinate a phase value to the group as a whole, in the same manner as may be done for each elementary wave constituting the group.

This inobservability of the phase, well known from the theory of optical instruments, is brought out in a particularly simple manner in a discussion of the Stern Gerlach experiment, so important for the investigation of the properties of single atoms. As pointed out by Heisenberg, atoms with different orientation in the field may only be separated if the deviation of the beam is larger than the diffraction at the slit of the de Broglie waves representing the translational motion of the atoms. This condition means, as a simple calculation shows, that the product of the time of passage of the atom through the field, and

the uncertainty due to the finite width of the beam of its energy in the field, is at least equal to the quantum of action. This result was considered by Heisenberg as a support of relation (2) as regards the reciprocal uncertainties of energy and time values. It would seem, however, that here we are not simply dealing with a measurement of the energy of the atom at a given time. But since the period of the proper vibrations of the atom in the field is connected with the total energy by relation (I), we realize that the condition for separability mentioned just means the loss of the phase. This circumstance removes also the apparent contradictions, arising in certain problems concerning the coherence of resonance radiation, which have been discussed frequently, and were also considered by Heisenberg.

To consider an atom as a closed system, as we have done above, means to neglect the spontaneous emission of radiation which even in the absence of external influences puts an upper limit to the lifetime of the stationary states. The fact that this neglect is justified in many applications is connected with the circumstance that the coupling between the atom and the radiation field, which is to be expected on classical electrodynamic, is in general very small compared to the coupling between the particles in the atom. It is, in fact, possible in a description of the state of an atom to a considerable extent to neglect the reaction of radiation, thus disregarding the unsharpness in the energy values connected with the lifetime of the stationary states according to relation (2). This is the reason why it is possible to draw conclusions concerning the properties of radiation by using classical electrodynamic.

The treatment of the radiation problem by the new quantum theoretical methods meant, to begin with, just a quantitative formulation of this correspondence consideration. This was the very starting point of the original considerations of Heisenberg. It may also be mentioned that an instructive analysis of Schrödinger's treatment of the radiation phenomena from the point of view of the correspondence principle has been recently given by Klein. In the more rigorous form of the theory developed by Dirac, the radiation field itself is included in the closed system under consideration. Thus it became possible in a rational way to take account of the individual character of radiation demanded by the quantum theory and to build up a dispersion theory, in which the finite width of the spectrum lines is taken into consideration. The renunciation regarding space time pictures characterizing this treatment would seem to offer a striking indication of the complementary character of the quantum theory. This is particularly to be borne in mind in judging the radical departure from the causal description of Nature met with in radiation phenomena, to which we have referred above in connection with the excitation of spectra.

In view of the asymptotic connection of atom properties with classical electrodynamic, demanded by the conception of stationary states and the description of the behavior of individual particles in the atom might be regarded as a difficulty. In fact, the connection in question means that in the limit of large quantum numbers where the relative difference between adjacent stationary states vanishes asymptotically, mechanics pictures of electronic motion may be rationally utilized. It must be emphasized, however, that this connection cannot be regarded as a gradual transition towards classical theory in the sense that the quantum numbers. On the contrary, the conclusions obtained from the correspondence principle with the aid of classical pictures depend just upon the assumptions that the conception of stationary states and the individual transition processes are maintained even in this limit.

This question offers a particularly instructive example for the application of the new methods. As shown by Schrödinger, it is possible, in the limit mentioned, by superposition of proper vibrations to construct wave groups small in comparison to the "size" of the atom, the propagation of which indefinitely approaches the classical picture of moving material particles, if the quantum numbers are chosen sufficiently large. In the special case of a simple harmonic vibrator, he was able to show that such wave groups will keep together even for any length of time, and will oscillate to and from in a manner corresponding to the classical picture of the motion. This circumstance Schrödinger has regarded as a support of his hope of constructing a pure wave theory without referring to the quantum postulate. As emphasized by Heisenberg, the simplicity of the case of the oscillator, however, is exceptional and intimately connected with the harmonic nature of the corresponding classical motion. Nor is there in this example any possibility for an asymptotical approach towards the problem of free particles. In general, the wave group will gradually spread over the whole region of the atom, and the "motion" of a bound electron can only be followed during a number of periods, which is of the order of magnitude of the quantum numbers associated with the proper vibrations. This question has been more closely investigated in a recent paper by Darwin which contains a number of instructive examples of the behavior of wave groups. From the viewpoint of the matrix theory a treatment of analogous problems has been carried out by Kennard.

Here again we meet with the contrast between the wave theory superposition principle and the assumption of the individuality of particles with which we have been concerned already in the case of free particles. At the same time the asymptotical connection with the classical theory, to which a distinction between free and bound particles is unknown, offers the possibility of a particularly simple illustration of the above considerations regarding the consistent utilization of the concept of a stationary state by means of

collision or radiation reactions implies a gap in the time description, which is at least of the order of magnitude of the periods associated with transitions between stationary states. Now, in the limit of high quantum numbers these periods may be interpreted as periods of revolution. Thus we see at once that no causal connection can be obtained between observation leading to the fixation of a stationary state and earlier observations on the behavior of the separate particles in the atom.

Summarizing, it might be said that the concepts of stationary states and individual transition processes within their proper field of application possess just as much or as little "reality" as the very idea of individual particles. In both cases we are concerned with a demand of causality complementary to the space time description, the adequate application of which is limited only by the restricted possibilities of definition and of observation.

7. THE PROBLEM OF THE ELEMENTARY PARTICLES

When due regard is taken of the complementary feature required by the quantum postulate, it seems, in fact, possible with the aid of the symbolic methods to build up a consistent theory of atom phenomena, which may be considered as a rational generalization of the causal space time description of classical physics. This view does not mean, however, that classical electron theory may be regarded simply as the limiting case of a vanishing quantum of action. Indeed, the connection of the latter theory with experience is based on assumptions which can scarcely be separated from the group of problems of the quantum theory. A hint in this direction was already given by the well known difficulties met with in the attempts to account for the individuality of ultimate electric particles on general mechanics and electrodynamic principles. In this respect also, the general relativity theory of gravitation has not fulfilled expectations. A satisfactory solution of the problems touched upon would seem to be possible only by means of a rational quantum theoretical transcription of the general field theory, in which the ultimate quantum of electricity has found its natural position as an expression of the feature of individuality characterizing the quantum theory. Recently Klein has directed attention to the possibility of connecting this problem with the five dimensional unified representation of electromagnetism and gravitation proposed by Kaluza. In fact, the conservation theorems for energy and momentum. Just as these concepts are complementary to the space time description, the appropriateness of the ordinary four dimensional description as well as its symbolics utilization in the quantum theory would, as Klein emphasizes, seem to depend essentially on the circumstance that in this description electricity always appears in well defined units, the conjugated fifth dimension being a consequence not open to observation.

Quite apart from these unsolved deep going problems, the classical electron theory up to the present time has been the guide for a further development of the correspondence description in connection with the idea first advanced by Compton that the ultimate electric particles, besides their mass and charge, are endowed with a magnetic moment due to an angular momentum determined by the quantum of action. This assumption, introduced with striking success by Goudsmit and Uhlenbeck into the discussion of the origin of the anomalous Zeeman effect, has proved most fruitful in connection with the new methods, as shown especially by Heisenberg and Jordan. One might say, indeed, that the hypothesis of the magnetic electron, together with the resonance problem elucidated by Heisenberg, which occurs in the quantum, theoretical description of the behavior of atoms with several electrons, have brought the correspondence interpretation of the spectrum laws and the periodic system to a certain degree of completion. The principles underlying this attack have even made it possible to draw conclusions regarding the properties of atom nuclei. Thus Dennison, in connection with ideas of Heisenberg and Hund, has succeeded recently in a very interesting way in showing how the explanation of the specific heat of hydrogen, hitherto beset with difficulties, can be harmonized with the assumption that the proton is endowed with a moment of momentum of the same magnitude as that of the electron. Due to its larger mass, however, a magnetic moment much smaller than that of the electron must be associated with the proton.

The insufficiency of the methods hitherto developed as concerns the problem of the elementary particles appears in the questions just mentioned from the fact that they do not allow of an unambiguous explanation of the difference in the behavior of the electric elementary particles and the "individuals" symbolized through the conception of light quanta expressed in the so called exclusion principle formulated by Pauli. In fact, we meet in this principle, so important for the problem of atom structure as well as for the recent development of statistical theories, with one among several possibilities, each of which fulfils the correspondence requirement. Moreover, the difficulty of satisfying the relativity requirement in quantum theory appears in a particularly striking light in connection with the problem of the magnetic electron. Indeed, it seemed not possible to bring the promising attempts made by Darwin and Pauli in generalizing the new methods to cover this problem naturally, in connection with the relativity kinematics consideration of Thomas so fundamental for the interpretation results. Quite

recently, however, Dirac has been able successfully to attack the problem of the magnetic electron through a new ingenious extension of the symbolics methods and so satisfy the relativity requirement without abandoning the agreement with spectrum evidence. In this attack not only the imaginary complex quantities appearing in the earlier procedures are involved, but his fundamental equations themselves contain quantities of a still higher degree of complexity that are represented by matrices.

Already the formulation of the relativity argument implies essentially the union of the space time coordination and the demand of causality characterizing the classical theories. In the adaptation of the relativity requirement to the quantum postulate, we must therefore be prepared to meet with a renunciation as to visualization in the ordinary sense going still further than in the formulation of the quantum laws considered here. Indeed, we find ourselves here on the very path taken by Einstein of adapting our modes of perception borrowed from the sensations to the gradually deepening knowledge of the laws of Nature. The hindrances met with on this path originate above all in the fact that, so to say, every word in the language refers to our ordinary perception. In the quantum theory we meet this difficulty at once in the question of the inevitability of the feature of irrationality characterizing the quantum postulate. I hope, however, that the idea of complementarity is suited to characterize the situation, which bears a deep going analogy to the general difficulty in the formation of human ideas, inherent in the distinction between subject and object.

- **TEXTO 4D – Can Quantum Mechanics Description of Physic Reality Be Considered Complete? (1935)**

It is shown that a certain “criterion of physic reality” formulated in a recent article with the above title by A. Einstein, B. Podolsky and N. Rosen contains an essential ambiguity when it is applied to quantum phenomena. In this connection a viewpoint termed “complementarity” is explained from which quantum mechanics description of physic phenomena would seem to fulfill, within its scope, all rational demands of completeness.

In a recent article under the above title A. Einstein, B. Podolsky and N. Rosen have presented argument which lead them to answer the question at issue in the negative. The trend of their argument, however, does not seem to me adequately to meet the actual situation with which we are faced in atom physics. I shall therefore be glad to use this opportunity to explain in somewhat greater detail a general viewpoint, conveniently termed “complementarity,” which I have indicated on various previous occasions and from which quantum mechanics within its scope would appear as a completely rational description of physic phenomena, such as we meet in atom processes.

The extent to which an unambiguous meaning can be attributed to such an expression as “physic reality” cannot of course be deduced from a priori philosophical conceptions, but – as the authors of the article cited themselves emphasize – must be founded on a direct appeal to experiments and measurements. For this purpose they propose a “criterion of reality” formulated as follows: “If, without in any way disturbing a system, we can predict with certainty the value of a physic quantity, then there exists an element of physic reality corresponding to this physic quantity.” By means of an interesting example, to which we shall return below, they next proceed to show that in quantum mechanics, just as in classical mechanics, it is possible under suitable conditions to predict the value of any given variable pertaining to the description of a mechanics system from measurements performed entirely on other systems which previously have been in interaction with the system under investigation. According to their criterion the authors therefore want to ascribe an element of reality to each of the quantities represented by such variables. Since, moreover, it is a well known feature of the present formalism of quantum mechanics that it is never possible, in the description of the state of a mechanics system, to attach definite values to both of two canonically conjugate variables, they consequently deem this formalism to be incomplete, and express the belief that a more satisfactory theory can be developed.

Such an argument, however, would hardly seem suited to affect the soundness of quantum mechanics description, which is based on a coherent mathematical formalism covering automatically any procedure of measurement like that indicated.* The apparent contradiction in fact discloses only an essential inadequacy of the customary viewpoint of natural philosophy for a causal account of physic phenomena of the sort with which we are concerned in quantum mechanics. Indeed the finite interaction between object and measuring agencies conditioned by the very existence of the quantum of action entails –

because of the impossibility of controlling the action of the object on the measuring instruments if these are to serve their purpose – the necessity of final renunciation of the classical deal of causality and a radical revision of our attitude towards the problem physic reality. In fact, as we shall see, a criterion of reality like that proposed by the named authors contains – however cautious its formulation may appear – an essential ambiguity when it is applied to the actual problems with which we are here concerned. In order to make the argument to this end as clear as possible, I shall first consider in some detail a few simple examples of measuring arrangements.

Let us begin with the simple case of a particle passing through a slit in a diaphragm, which may form part of some more or less complicated experiment arrangement. Even if the momentum of this particle is completely known before it impinges on the diaphragm, the diffraction by the slit of the plane wave giving the symbolic representation of its state will imply an uncertainty in the momentum of the particle, after it has passed the diaphragm, which is the greater the narrower the slit. Now the width of the slit, at any rate if it is still large compared with the wavelength, may be taken as the uncertainty Dq of the position of the particle relative to the diaphragm, in a direction perpendicular to the slit. Moreover, it is simply seen from de Broglie's relation between momentum and wavelength that the uncertainty Dp of the momentum of the particle in this direction is correlated to Dq by means of Heisenberg's general principle which in the quantum mechanics formalism is a direct consequence of the commutation relation for any pair of conjugate variables. Obviously the uncertainty Dp is inseparably connected with the possibility of an exchange of momentum between the particle and the diaphragm; and the question of principal interest for our discussion is now to what extent the momentum thus exchanged can be taken into account in the description of the phenomenon to be studied by the experiment arrangement concerned, of which the passing of the particle through the slit may be considered as the initial stage.

Let us first assume that, corresponding to usual experiments on the remarkable phenomena of electron diffraction, the diaphragm, like the other parts of the apparatus, – say a second diaphragm with several slits parallel to the first and a photographic plate, – is rigidly fixed to a support which defines the space frame of reference. Then the momentum exchanged between the particle and the diaphragm will, together with the reaction of the particle on the other bodies, pass into this common support, and we have thus voluntarily cut ourselves off from any possibility of taking these reactions separately into account in predictions regarding the final result of the experiment, – say the position of the spot produced by the particle on the photographic plate. The impossibility of a closer analysis of the reactions between the particle and the measuring instrument is indeed no peculiarity of the experiment procedure described, but is rather an essential property of any arrangement suited to the study of the phenomena of the type concerned, where we have to do with a feature of individuality completely foreign to classical physics. In fact, any possibility of taking into account the momentum exchanged between the particle and the separate parts of the apparatus would at once permit us to draw conclusions regarding the "course" of such phenomena, – say through what particular slit of the second diaphragm the particle passes on its way to the photographic plate – which would be quite incompatible with the fact that the probability of the particle reaching a given element of area on this plate is determined not by the presence of any particular slit, but by the positions of all the slits of the second diaphragm within reach of the associated wave diffracted from the slit of the first diaphragm.

By another experiment arrangement, where the first diaphragm is not rigidly connected with the other parts of the apparatus, it would at least in principle be possible to measure its momentum with any desired accuracy before and after the passage of the particle, and thus to predict the momentum of the latter after it has passed through the slit. In fact, such measurements of momentum require only an unambiguous application of the classical law of conservation of momentum, applied for instance to a collision process between the diaphragm and some test body, the momentum of which is suitably controlled before and after the collision. It is true that such a control will essentially depend on an examination of the space time course of some process to which the ideas of classical mechanics can be applied; if, however, all space dimensions and time intervals are taken sufficiently large, this involves clearly no limitation as regards the accuracy control of the momentum of the test bodies, but only a renunciation as regards the accuracy of the control of their space time coordination. This last circumstance is in fact quite analogous to the renunciation of the control of the momentum of the fixed diaphragm in the experiment arrangement discussed above, and depends in the last resort on the claim of a purely classical account of the measuring apparatus, which implies the necessity of allowing a latitude corresponding to the quantum mechanics uncertainty relations in our description of their behavior.

The principal difference between the two experiment arrangements under consideration is, however, that in the arrangement suited for the control of the momentum of the first diaphragm this body can no longer be used as a measuring instrument for the same purpose as in the previous case, but must, as regards its position relative to the rest of the apparatus, be treated, like the particle traversing the slit, as an object of investigation, in the sense that the quantum mechanics uncertainty relations regarding its position and

momentum must be taken explicitly into account. In fact, even if we knew the position of the diaphragm relative to the space frame before the first measurement of its momentum, and even though its position after the last measurement can be accurately fixed, we lose, on account of the uncontrollable displacement of the diaphragm during each collision process with the test bodies, the knowledge of its position when the particle passed through the slit. The whole arrangement is therefore obviously unsuited to study the same kind of phenomena as in the previous case. In particular it may be shown that, if the momentum of the diaphragm is measured with an accuracy sufficient for allowing definite conclusions regarding the passage of the particle through some selected slit of the second diaphragm, then even the minimum uncertainty of the position of the first diaphragm compatible with such a knowledge will imply the total wiping out of any interference effect – regarding the zones of permitted impact of the particle on the photographic plate – to which the presence of more than one slit in the second diaphragm would give rise in case the positions of all apparatus are fixed relative to each other.

In an arrangement suited for measurements of the momentum of the first diaphragm, it is further clear that even if we have measured this momentum before the passage of the particle through the slit, we are after this passage still left with a free choice whether we wish to know the momentum of the particle or its initial position relative to the rest of the apparatus. In the first eventuality we need only to make a second determination of the momentum of the diaphragm, leaving unknown forever its exact position when the particle passed. In the second eventuality we need only to determine its position relative to the space frame with the inevitable loss of the knowledge of the momentum exchanged between the diaphragm and the particle. If the diaphragm is sufficiently massive in comparison with the particle, we may even arrange the procedure of measurements in such a way that the diaphragm after the first determination of its momentum will remain at rest in some unknown position relative to the other parts of the apparatus, and the subsequent fixation of this position may therefore simply consist in establishing a rigid connection between the diaphragm and the common support.

My main purpose in repeating these simple, and in substance well known considerations, is to emphasize that in the phenomena concerned we are not dealing with an incomplete description characterized by the arbitrary picking out of different elements of physic reality at the cost of sacrificing other such elements, but with a rational discrimination between essentially different experiment arrangements and procedures which are suited either for an unambiguous use of the idea of space location or for a legitimate application of the conservation theorem of momentum. Any remaining appearance of arbitrariness concerns merely our freedom of handling the measuring instruments characteristic of the very idea of experiment. In fact, the renunciation in each experiment arrangement of the one or the other of two aspects of the description of physic phenomena, – the combination of which characterizes the method of classical physics, and which therefore in this sense may be considered as complementary to one another, – depends essentially on the impossibility in the field of quantum theory, of accurately controlling the reaction of the object on the measuring instruments, i.e., the transfer of momentum case of position measurements, and the displacement in case of momentum measurements. Just in this last respect any comparison between quantum mechanics and ordinary statistical mechanics, – however useful it may be for the formal presentation of the theory, – is essentially irrelevant. Indeed we have in each experiment arrangement suited for the study of proper quantum phenomena not merely to do with ignorance at the value of certain physic quantities, but with the impossibility of defining these quantities in an unambiguous way.

The last remarks apply equally well to the special problem treated by Einstein, Podolsky and Rosen, which has been referred to above, and which does not actually involve any greater intricacies than the simple examples discussed above. The particular quantum mechanics state of two free particles, for which they give an explicit mathematical expression, may be reproduced, at least in principle, by a simple experiment arrangement, comprising a rigid diaphragm with two parallel slits, which are very narrow compared with their separation, and through each of which one particle with given initial momentum passes independently of the other. If the momentum of this diaphragm is measured accurately before as well as after the passing of the particles, we shall in fact know the sum of the components perpendicular to the slits of the momenta of the two escaping particles, as well as the difference of their initial positional coordinates in the same direction; while of course the conjugate quantities, i.e., the difference of the components of their momenta, and the sum of their positional coordinates, are entirely unknown. In this arrangement, it is therefore clear that a subsequent single measurement either of the position or of the momentum of one of the particles will automatically determine the position or momentum, respectively, of the other particle with any accuracy; at least if the wavelength corresponding to the free motion of each particle is sufficiently short compared with the width of the slits. As pointed out by the named authors, we are therefore faced at this stage with a completely free choice whether we want to determine the one or the other of the latter quantities by a process which does not directly interfere with the particle concerned. Like the above simple case of the choice between the experiment procedures suited for the prediction of the position or the momentum of a single particle which has passed through a slit in a diaphragm, we are,

in the “freedom of choice” offered by the last arrangement, just concerned with a discrimination between different experiment procedures which allow of the unambiguous use of complementary classical concepts. In fact to measure the position of one of the particles can mean nothing else than to establish a correlation between its behavior and some instrument rigidly fixed to the support which defines the space frame of reference. Under the experiment conditions described such a measurement will therefore also provide us with the knowledge of the location, otherwise completely unknown, of the diaphragm with respect to this space frame when the particles passed through the slits. Indeed, only in this way we obtain a basis for conclusions about the initial position of the other particle relative to the rest of the apparatus. By allowing an essentially uncontrollable momentum to pass from the first particle into the mentioned support, however, we have by this procedure cut ourselves off from any future possibility of applying the law of conservation of momentum to the system consisting of the diaphragm and the two particles and therefore have lost our only basis for an unambiguous application of the idea of momentum in predictions regarding the behavior of the second particle. Conversely, if we choose to measure the momentum of one of the particles, we lose through the uncontrollable displacement inevitable in such a measurement any possibility of deducing from the behavior of this particle the position of the diaphragm relative to the rest of the apparatus, and have thus no basis whatever for predictions regarding the location of the other particle.

From our point of view we now see that the wording of the above mentioned criterion of physic reality proposed by Einstein, Podolsky and Rosen contains an ambiguity as regards the meaning of the expression “without in any way disturbing a system.” Of course there is in a case like that just considered no question of a mechanics disturbance of the system under investigation during the last critical stage of the measuring procedure. But even at this stage there is essentially the question of an influence on the very conditions which define the possible types of predictions regarding the future behavior of the system. Since these conditions constitute an inherent element of the description of any phenomenon to which the term “physic reality” can be properly attached, we see that the argument of the mentioned authors does not justify their conclusion that quantum mechanics description is essentially incomplete. On the contrary this description, as appears from the preceding discussion, may be characterized as a rational utilization of all possibilities, of unambiguous interpretation of measurements, compatible with the finite and uncontrollable interaction between the object and the measuring instruments in the field of quantum theory. In fact, it is only the mutual exclusion of any two experiment procedures, permitting the unambiguous definition of complementary physic quantities, which provides room for new physic laws the coexistence of which might at first sight appear irreconcilable with the basic principles of science. It is just this entirely new situation as regards the description of physic phenomena that the notion of complementarity aims at characterizing.

The experiment arrangements hitherto discussed present a special simplicity on account of the secondary role which the idea of time plays in the description of the phenomena in question. It is true that we have freely made use of such words as “before” and “after” implying time relationships; but in each case allowance must be made for a certain inaccuracy, which is of no importance, however, so long as the time intervals concerned are sufficiently large compared with the proper periods entering in the closer analysis of the phenomenon under investigation. As soon as we attempt a more accuracy time description of quantum phenomena, we meet with well known new paradoxes, for the elucidation of which further features of the interaction between the objects and the measuring instruments must be taken into account. In fact, in such phenomena we have no longer to do with experiment arrangements consisting of apparatus essentially at rest relative to one another, but with arrangements containing moving parts,— like shutters before the slits of the diaphragms,— controlled by mechanisms serving as clocks. Besides the transfer of momentum, discussed above, between the object and the bodies defining the space frame, we shall therefore, in such arrangements, have to consider an eventual exchange of energy between the object and these clock like mechanisms.

The decisive point as regards time measurements in quantum theory is now completely analogous to the argument concerning measurements of positions outlined above. Just as the transfer of momentum to the separate parts of the apparatus, — the knowledge of the relative positions of which is required for the description of the phenomenon, — has been seen to be entirely uncontrollable, so the exchange of energy between the object and the various bodies, whose relative motion must be known for the intended use of the apparatus, will defy any closer analysis. Indeed, it is excluded in principle to control the energy which goes into the clocks without interfering essentially with their use as time indicators. This use in fact entirely relies on the assumed possibility of accounting for the functioning of each clock as well as for its eventual comparison with other clocks on the basis of the methods of classical physics. In this account we must therefore obviously allow for latitude in the energy balance, corresponding to the quantum mechanics uncertainty relation for the conjugate time and energy variables. Just as in the question discussed above of the mutually exclusive character of any unambiguous use in quantum theory of the

concepts of position and momentum, it is in the last resort this circumstance which entails the complementary relationship between any detailed time account of atom phenomena on the one hand and the unclassical features of intrinsic stability of atoms, disclosed by the study of energy transfers in atom reactions on the other hand.

This necessity of discriminating in each experiment arrangement between those parts of the physic system considered which are to be treated as measuring instruments and those which constitute the objects under investigation may indeed be said to form a principal distinction between classical and quantum mechanics description of physic phenomena. It is true that the place within each measuring procedure where this discrimination is made is in both cases largely a matter of convenience. While, however, in classical physics the distinction between object and measuring agencies does not entail any difference in the character of the description of the phenomena concerned, its fundamental importance in quantum theory, as we have seen, has its root in the indispensable use of classical concepts in the interpretation of all proper measurements, even though the classical theories do not suffice in accounting for the new types of regularities with which we are concerned in atom physics. In accordance with this situation there can be no question of any unambiguous interpretation of the symbols of quantum mechanics other than that embodied in the well known rules which allow to predict the results to be obtained by a given experiment arrangement described in a totally classical way, and which have found their general expression through the transformation theorems, already referred to. By securing its proper correspondence with the classical theory, these theorems exclude in particular any imaginable inconsistency in the quantum mechanics description, connected with a change of the place where the discrimination is made between object and measuring agencies. In fact it is an obvious consequence of the above argument that in each experiment arrangement and measuring procedure we have only a free choice of this place within a region where the quantum mechanics description of the process concerned is effectively equivalent with the classical description.

Before concluding I should still like to emphasize the bearing of the great lesson derived from general relativity theory upon the question of physic reality in the field of quantum theory. In fact, notwithstanding all characteristic differences, the situations we are concerned with in these generalizations of classical theory present striking analogies which have often been noted. Especially, the singular position of measuring instruments in the account of quantum phenomena, just discussed, appears closely analogous to the well known necessity in relativity theory of upholding an ordinary description of all measuring processes, including a sharp distinction between space and time coordinates, although the very essence of this theory is the establishment of new physic laws, in the comprehension of which we must renounce the customary separation of space and time ideas. * The dependence on the reference system, in relativity theory, of all readings of scales and clocks may even be compared with the essentially uncontrollable exchange of momentum or energy between the objects of measurements and all instruments defining the space time system of reference, which in quantum theory confronts us with the situation characterized by the notion of complementarity. In fact this new feature of natural philosophy means a radical revision of our attitude as regards physic reality, which may be paralleled with the fundamental modification of all ideas regarding the absolute character of physic phenomena, brought about by the general theory of relativity.

The deductions contained in the article cited may in this respect be considered as an immediate consequence of the transformation theorems of quantum mechanics, which perhaps more than any other feature of the formalism contribute to secure its mathematical completeness and its rational correspondence with classical mechanics. In fact, it is always possible in the description of a mechanics system, consisting of two partial systems (1) and (2), interacting or not, to replace any two pairs of canonically conjugate variables (q_1, p_1) , (q_2, p_2) , pertaining to systems (1) and (2), respectively, and satisfying the usual commutation rules by two pairs of new conjugate variables (Q_1, P_1) , (Q_2, P_2) , related to the first variables by a simple orthogonal transformation, corresponding to a rotation of angle X in the planes $(= p_1 p_2)$.

Since these variables will satisfy analogous commutation rules, in particular it follows that in the description of the state of the combined system definite numerical values.

may not be assigned to both a and b but that we may clearly assign such values to both a and b . In that case it further results from the expressions of these variables in terms of (q_1, p_1) and (q_2, p_2) namely that a subsequent measurement of either q_1 or p_2 will allow us to predict the value of a or b respectively.

The obvious impossibility of actually carrying out, with the experiment technique at our disposal, such measuring procedures as are discussed here and in the following does clearly not affect the theoretical argument, since the procedures in question are essentially equivalent with atom processes, like the Compton effect, where a corresponding application of the conservation theorem of momentum is well established.

As will be seen, this description, apart from a trivial normalizing factor, corresponds exactly to the transformation of variables described in the preceding footnote if (x, y, z) , (x', y', z') represent the positional coordinates and components of momenta of the two particles and if it may also be remarked that the wave function given by formula (9) of the article cited corresponds to the special choice of $\theta = 0$ and the limiting case of two infinitely narrow slits.

Just this circumstance, together with the relativistic invariance of the uncertainty relations of quantum mechanics, ensures the compatibility between the argument outlined in the present article and all exigencies of relativity theory. This question will be treated in greater detail in a paper under preparation, where the writer will in particular discuss a very interesting paradox suggested by Einstein concerning the application of gravitation theory to energy measurements, and the solution of which offers an especially instructive illustration of the generality of the argument of complementarity. On the same occasion a more thorough discussion of space time measurements in quantum theory will be given with all necessary mathematical developments and diagrams of experiment arrangements, which had to be left out of this article, where the main stress is laid on the dialectic aspect of the question at issue.

- **TEXTO 4E – Causality and Complementarity (1937)**

On several occasions I have pointed out that the lesson taught us by recent developments in physics regarding the necessity of a constant extension of the frame of concepts appropriate for the classification of new experiences leads us to a general epistemological attitude which might help us to avoid apparent concept difficulties in other fields of science as well. Since, however, the opinion has been expressed from various sides that this attitude would appear to involve a mysticism incompatible with the true spirit of science, I am very glad to use the present opportunity of addressing this assembly of scientists working in quite different fields but united in their striving to find a common ground for our knowledge, to come back to this question, and above all to try to clear up the misunderstandings which have arisen.

Before entering into the problems to be discussed, I need recall only briefly how often the development of physics has taught us that a consistent application even of the most elementary concepts indispensable for the description of our daily experience is based on assumptions initially unnoticed, the explicit consideration of which is, however, essential if we wish to obtain a classification anymore extended domains of experience as clear and as free from arbitrariness as possible. I also hardly need to emphasize how much this development has contributed to the general philosophy clarification of the presuppositions underlying human knowledge. Even though these acquisitions are in many respects of a lasting character, we have nevertheless received only recently an incisive admonition that the analysis of new experiences is liable to disclose again and again the unrecognized presuppositions for an unambiguous use of our most simple concepts, such as space-time description and causal connection.

It was in fact the clarification of the paradoxes connected with the finite velocity of propagation of light and the judgment of events by observers in relative motion which first disclosed the arbitrariness contained even in the concept of simultaneity, and thereby created a freer attitude toward the question of space-time coordination which finds expression in the theory of relativity. As is well known, this has made possible a unified formulation of the phenomena appearing in different frames of reference, and through this brought to light the fundamental equivalence of hitherto separate physic regularities.

The cognition of the essential dependence of any physic phenomenon on the system of reference of the observer, which forms the characteristic feature of relativity theory, implies, however – as especially Einstein himself has emphasized – no abandonment whatever of the assumption underlying the ideal of causality, that the behavior of a physic object relative to a given system of coordinates is uniquely determined, quite independently of whether it is observed or not.

However, a still further revision of the problem of observation has since been made necessary by the discovery of the universal quantum of action, which has taught us that the whole mode of description of classical physics, including the theory of relativity, retains its adequacy only as long as all quantities of

action entering into the description are large compared to Planck's quantum. When this is not time case, as in the region of atom physics, there appear new uniformities which cannot be fitted into the frame of the ordinary causal description. This circumstance, at first sight paradoxical, finds its elucidation in the recognition that in this region it is no longer possible to distinguish between the autonomous behavior of a physic object and its inevitable interaction with other bodies serving as measuring instruments, the direct consideration of which is excluded by the very nature of the concept of observation in itself.

Indeed this circumstance presents us with a situation concerning the analysis and synthesis of experience which is entirely new in physics and forces us to replace the ideal of causality by a more general viewpoint usually termed "complementarity." The apparently incompatible sorts of information about the behavior of the object under examination which we get by different experiment arrangements can clearly not be brought into connection with each other in the usual way, but may, as equally essential for an exhaustive account of all experience, be regarded as "complementary" to each other. In particular, the frustration of every attempt to analyze more closely the "individuality" of single atom processes, symbolized by the quantum of action, by a subdivision of their course, is explained by the fact that each section in this course definable by a direct observation would demand a measuring arrangement which would be incompatible with the appearance of the uniformities considered. Notwithstanding all differences, a certain analogy between the postulate of relativity and the point of view of complementarity can be seen in this, that according to the former the laws which in consequence of the finite velocity of light appear in different forms depending on the choice of the frame of reference, are equivalent to one another, whereas, according to the latter the results obtained by different measuring arrangements apparently contradictory because of the finite size of the quantum of action, are logically compatible.

In order to give as clear an idea as possible of the new epistemological situation which we meet in atom physics, we may briefly consider those measures designed to obtain an account of the space-time course of some physic event. The account consists in the last analysis in the establishment of a series of unambiguous connections between the behavior of the object and the measuring rods and clocks which define the system of reference involved in the space-time description. It is thus only as long as we may completely ignore, in the description of all the important circumstances of the event, all interaction between the object and these measuring instruments, which unavoidably accompanies the establishment of any such connection, that we can speak of an autonomous space-time behavior of the object under observation, independent of the conditions of observation. In case, however – as in the region of quantum phenomena – this interaction plays an essential role for the appearance of the phenomena themselves, the situation is completely changed, and we are in particular forced to renounce the combination, characteristic of classical physic description, of the space-time coordination of the event with the general conservation theorems of dynamic. For the use of rods and clocks to fix the system of reference makes it by definition impossible to take into account the energy of momentum which might be transferred to them in the course of the phenomenon. Conversely, those quantum laws whose formulation rests essentially on the application of the concept of energy or momentum can appear only under circumstances of investigation from which a detailed account of the space-time behavior of the object is excluded.

As is well known, a mode of description suitable to this situation has been found in the so-called quantum mechanic, in which sufficient freedom for the consistent coordination of the new regularities has been achieved by the substitution for the usual kinematics and dynamic quantities of symbols which obey laws of calculation of a novel type. There is also from the point of view an interesting formal analogy between quantum mechanic and the theory of relativity, in that it has been possible in both cases with the help of abstract concepts of arithmetic and geometry respectively, to build up strictly logical formalisms which allow a mastering of the new domains of experience. In connection with the often discussed question whether such formalisms can be regarded as an extension of our power of visualization, it must not be forgotten that the representation of the coordination of space and time in the theory of relativity by a four dimensional manifold, as also the connecting of kinematics and dynamic quantities in quantum mechanic by non-commutative algebra, rest essentially on the old mathematical artifice of the introduction of imaginary quantities; in fact the fundamental constants, the velocity of light and the quantum of action, are introduced into the formalism as factors of the i , the one in the definition of the fourth coordinate, the other in the commutation laws of canonically conjugate variables.

It is of course not my intention here to go deeper into such special points; I wished only to emphasize that in these fields the logical correlations can only be won by a far-reaching renunciation of the usual demands of visualization. It would in particular not be out of place in this connection to warn against a misunderstanding likely to arise when one tries to express the content of Heisenberg's well known indeterminacy relations – which play as important a role in the judgment of the consistency of the essentially statistical mode of description of quantum mechanic as the Lorentz transformation does in

solving the paradoxes which appear in the theory of relativity – by such a statement as: “the position and momentum of a particle cannot simultaneously be measured with arbitrary accuracy.” According to such a formulation it would appear as though we had to do with some arbitrary renunciation of the measure of either the one or the other of the two well-defined attributes of the object, which would not be the possibility of a future theory taking both attributes into account on the lines of the classical physics. From the above considerations it should be clear that the whole situation in atom physics deprives of all meaning such inherent attributes as the idealizations of classical physics would ascribe to the object. On the contrary, the proper role of the indeterminacy relations consists in assuring quantitatively the logical compatibility of apparently contradictory laws which appear when we use two different experiment arrangements, of which only one permits an unambiguous use of the concept of position, while only the other permits the application of the concept of momentum defined as it is, solely by the law of conservation.

We thus see that the impossibility of carrying through a causal representation of quantum phenomena is directly connected with the assumptions underlying the use of the most elementary concepts which come into consideration for the description of experience. In this connection the view has been expressed from various sides that some future more radical departure in our mode of description from the concepts adapted to our daily experience would perhaps make it possible to preserve the ideal of causality also in the field of atom physics. Such an opinion would, however, seem to be due to a misapprehension of the situation. For the requirement of communicability of the circumstances and results at experiments implies that we can speak of well defined experiences only within the framework of ordinary concepts. In particular it should not be forgotten that the concept of causality underlies the very interpretation of each result of experiment, and that even in the coordination of experience one can never, in the nature of things, have to do with well-defined breaks in the causal chain. The renunciation of the ideal of causality in atom physics which has been forced on us is founded logically only on our not being any longer in a position to speak of the autonomous behavior of a physical object, due to the unavoidable interaction between the object and the measuring instruments which in principle cannot be taken into account, if these instruments according to their purpose shall allow the unambiguous use of the concepts necessary for the description of experience. In the last resort an artificial word like “complementarity” which does not belong to our daily concepts serves only briefly to remind us of the epistemological situation here encountered, which at least in physics is of an entirely novel character ().

The repeatedly expressed hopes of avoiding the essentially statistical character of quantum mechanical description by the assumption of some causal mechanism underlying the atom phenomena and hitherto inaccessible to observation would indeed seem to be as vain as any project of doing justice to the increased profundity of the picture of the world achieved by the general theory of relativity by means of the ordinary conceptions of absolute space and time. Above all such hopes would seem to rest upon an underestimate of the fundamental differences between the laws with which we are concerned in atom physics and the every day experiences which are comprehended so completely by the ideas of classical physics. Not only is the well known dilemma between the corpuscular and undulatory character of light and matter avoidable only by means of the viewpoint of complementarity, but the peculiar stability properties of atom structures which are in obvious contrast with the properties of any mechanical model but which are so intrinsically connected with the existence of the quantum of action, form the very condition for the existence of the objects and measuring instruments, with the behavior of which classical physics is concerned. On closer consideration, the present formulation of quantum mechanics in spite of its great fruitfulness would yet seem to be no more than a first step in the necessary generalization of the classical mode of description, justified only by the possibility of disregarding in its domain of application the atom structure of the measuring instruments themselves in the interpretation of the results of experiment. For a correlation of still deeper laws of nature involving not only the mutual interaction of the so-called elementary constituents of matter but also the stability of their existence, this last assumption can no longer be maintained, as we must be prepared for a more comprehensive generalization of the complementary mode of description which will demand a still more radical renunciation of the usual claims of so-called visualization.

I hope by these remarks to have conveyed the impression that in abandoning the causal description in atom physics we are not concerned with a hasty assertion of the impossibility of comprehending the wealth of phenomena, but with a serious effort to account for the new type of laws here encountered in conformity with the general lesson of philosophy regarding the necessity of a balance between analysis and synthesis. Just in this connection it appeared to me to be of interest to point out that also in other regions of human knowledge we meet apparent contradictions which might seem to be avoidable only from the point of view of complementarity. I am far from sharing, however, the widespread opinion that the recent development in the field of atom physics could help us in deciding such questions as “mechanism or vitalism” and “free will or causal necessity” in favor of one or the other alternative. Just the fact that the paradoxes of atom physics could be solved not by a one-sided attitude towards the old

problem of “determinism or indeterminism,” but only by examining the possibilities of observation and definition, should rather stimulate us to a renewed examination of the position in this respect in the biology and psychological problems at issue.

In the first place, regarding the question of the extent to which we can hope to explain the characteristic features of living organisms with the sole help of the experience acquired from the study of inanimate nature, we must above all keep in mind that even a definition of life itself contains epistemological problems. When we usually refer to a machine as dead, we mean scarcely anything else than that we are able to describe the circumstances essential for its functioning by means of the conceptions of classical physics. Still in view of the insufficiency of the classical mode of description in atom physics, such a definition of the inanimate would hardly any longer be adequate. Yet the newly recognized possibility of inducing macroscopic effects by individual atom process, which plays an essential part in the functioning of organisms – in any case for the sensitiveness of sense perceptions – has been an incentive to the taking up anew of the question of a possible “explanation” of life. But at the same time the recognition of the fact that we must descend to the domain of atom phenomena if we wish to bridge the gulf between the living and the inanimate, should bring before our eyes in a forceful way the practical and conceptual difficulties connected with this problem.

So far as we are at all in a position to follow the behavior of atoms in organisms under similar conditions of investigation as in the fundamental experiments of atom physics, of course we can only meet with the laws disclosed by these experiments which, in spite of their feature of individuality, foreign to classical mechanics, can give us clearly no immediate understanding of the so-called holistic or finalistic characteristics of the activities of life. The only logical possibility of avoiding any contradiction between the formulation of the laws of physics and the concepts suitable for the description of the phenomena of life ought therefore to be sought in the essentially different character of the conditions of investigation concerned. On a previous occasion (B) I have tried to express this situation by saying that every experiment arrangement suitable for following the behavior of the atoms constituting an organism in as exhaustive a way as implied by the possibilities of physics observation and definition would be incompatible with the maintaining of the life of the organism. This would in fact be quite analogous to the circumstance that all observations obtained by experiment arrangements which allow of a space-time account of the behavior of the constituents of atoms and molecules stand in a complementary relation to those obtained under conditions permitting study of the intrinsic stability of atom structures so essential for the physics and chemistry properties of matter.

To make this view clearer, it was pointed out in the article cited that the continuous metabolism of organisms inseparably connected with life prevents us even from distinguishing strictly which atoms belong to a living organism, and that we are thus presented with a problem the treatment of which, quite apart from its complication, is beyond the scope of the methods of atom mechanics. These methods, which govern our entire knowledge of physics and chemistry concern, just as do those of classical mechanics, in fact only systems for which it is possible in principle to specify what are to be regarded as the elementary constituents. This situation suggests that those essential features of living organisms which are brought to light only under circumstances which exclude an exact account of their atom constituents are laws of a nature which stands in a complementary relationship to those with which we are concerned in physics and chemistry. Thus the existence of life itself would have to be regarded in biology, both as regards the possibilities of observation and of definition, as no more subject to analysis than the existence of the quantum of action in atom physics.

I have endeavored to make it clear that in such considerations there is no question whatever – as has been sometimes feared by philosophers and biologists – of so-called purely metaphysical speculations or of an arbitrary renunciation of the possibility by continued research, of further increasing our knowledge of the functioning of organisms. Rather, they aim at avoiding futile controversies by an analysis of the presuppositions and of the appropriateness of the concepts and structures involved. Though the viewpoint of complementarity rejects every compromise with any anti-rationalistic vitalism, it ought at the same time to be suited for revealing certain prejudices in so-called mechanism. On the one hand, any violation of physicochemistry laws in organic life – such as the often mistakenly maintained contradiction between the activities of life and the fundamental theorems of thermo-dynamics – would be excluded from this point of view; on the other hand any insistence on an analogy between the existence of life itself and such laws should be rejected as irrational. As already emphasized in the article mentioned, this situation therefore implies no limitation whatever in the application to biology of the physicochemistry methods of description and investigation; in fact, the appropriate use of such methods – just as even in atom physics all our experiences must rest upon experiment arrangements classically described – remains our sole and inexhaustible source of information about biology phenomena.

According to its tendency to make room for the phenomena of life within the conceptions suited to the description of material systems, the viewpoint discussed stands far removed from every attempt to exploit

in a spurious sense the failure of causal description in atom physics. On the contrary, the view-point toward fundamental biology questions which we have here discussed, would rather seem suited to put the old problem of psycho-physic parallelism in a new light. The considerations which I have presented on previous occasions (, B) on questions of psychology in connection with problems of atom physics followed indeed two essentially different aims. The one was by means of well-known examples of the difficulties of analysis and synthesis of psychic phenomena connected with introspection to remind ourselves that in this region of knowledge we had already been forced to face a situation presenting in several respects a formal similarity with that with which, to the great disquietude of many physicists and philosophers, we have met in atom physics. The other aim was to express the hope that the epistemological attitude which had led to the clarification of the much simpler physic problems could prove itself helpful also in the discussion of psychological questions. In fact, the use which we make of words like "thought" and "feeling," or "instinct" and "reason" to describe psychic experiences of different types, shows the existence of characteristic relationships of complementarity conditioners by the peculiarity of introspection. Above all, just the impossibility in introspection of sharply distinguishing between subject and object as is essential to the ideal of causality would seem to provide the natural play for the feeling of free will.

I am afraid that the short indications to which I have been obliged to restrict myself wide respect to the last and many other points of this lecture will remind you only too well that in the last resort the direct use of any word must stand in a complementary relationship to an analysis of its meaning. I hope, however, that I have to some extent succeeded in giving you the impression that my attitude is in no way in conflict with our common endeavors to arrive at as great a unification of knowledge as possible by the combating of prejudices in every field of research.