

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA

Patrick Ribeiro Rodrigues

Emaranhamento e não localidade em mecânica quântica: uma abordagem via
metodologia POE e Instrução entre Pares

Juiz de Fora

2025

Patrick Ribeiro Rodrigues

Emaranhamento e não localidade em mecânica quântica: uma abordagem via metodologia POE e Instrução entre Pares

Dissertação apresentada ao Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física da Universidade Federal de Juiz de Fora/Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física. Área de concentração: Física na Escola Básica.

Orientador: Prof. Dr. Thales Costa Soares

Coorientador: Prof. Dr. Bruno Ferreira Rizzuti

Juiz de Fora

2025

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Rodrigues, Patrick Ribeiro Rodrigues.

Emaranhamento e não localidade em mecânica quântica : uma abordagem via metodologia POE e Instrução entre Pares / Patrick Ribeiro Rodrigues Rodrigues. -- 2025.

148 p. : il.

Orientador: Thales Costa Soares Soares

Coorientador: Bruno Ferreira Rizzuti Rizzuti

Dissertação (mestrado profissional) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Instituto Federal Sudeste de Minas Gerais, ICE/Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, 2025.

1. Mecânica Quântica. 2. Metodologias Ativas. 3. Física Contemporânea. I. Soares, Thales Costa Soares, orient. II. Rizzuti, Bruno Ferreira Rizzuti, coorient. III. Título.

Patrick Ribeiro Rodrigues

Emaranhamento e não localidade em mecânica quântica: uma abordagem via metodologia POE e Instrução entre Pares

Dissertação apresentada ao Polo 24 do Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física da Universidade Federal de Juiz de Fora / Instituto Federal Sudeste de Minas Gerais como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física. Área de concentração: Física na Escola Básica.

Aprovado em 26 de setembro de 2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Thales Costa Soares - Orientador

Instituto Federal Sudeste de Minas Gerais-Campus Juiz de Fora

Prof. Dr. Bruno Ferreira Rizzuti - Coorientador

Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Mario de Souza Reis Junior

Universidade Federal Fluminense

Prof. Dr. Alysson Miranda de Freitas

Universidade Federal de Juiz de Fora

Juiz de Fora, 29/09/2025.



Documento assinado eletronicamente por **Bruno Ferreira Rizzuti, Professor(a)**, em 29/09/2025, às 10:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Thales Costa Soares, Usuário Externo**, em 29/09/2025, às 14:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Alysson Miranda de Freitas, Professor(a)**, em 29/09/2025, às 18:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Mario de Souza Reis Junior, Usuário Externo**, em 30/09/2025, às 09:50, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no Portal do SEI-Ufjf (www2.ufjf.br/SEI) através do ícone Conferência de Documentos, informando o código verificador **2645871** e o código CRC **96789E11**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida e por me permitir trilhar mais um passo nesta jornada tão esperada. Estar aqui sempre foi um dos meus sonhos — e também parte de sonhos futuros.

Agradeço aos meus pais pelo apoio, pelos sacrifícios, pelo investimento, por todas as orações e por cada palavra de carinho. Sou grato porque vocês nunca deixaram de acreditar em mim.

Agradeço aos meus irmãos pelo apoio, pela companhia e por todo o afeto.

Agradeço aos meus demais parentes por promoverem um ambiente de leveza e acolhimento — em especial à minha avó, por cada oração e pelo carinho.

Agradeço aos meus amigos por todo o apoio e pela leveza que trouxeram durante este mestrado — apoio esse que vem de longa data.

Agradeço aos colegas e professores com quem tive contato ao longo do meu percurso no MNPEF.

Agradeço ao professor Mario Reis, meu orientador na graduação e grande apoio até hoje. Você é peça fundamental na minha formação acadêmica. Obrigado por todo o suporte, pelo carinho e pelo cuidado com os meus passos na carreira acadêmica.

Agradeço ao meu orientador Thales Soares por todo o apoio, carinho e atenção. Você é um verdadeiro guerreiro. Obrigado por fazer parte da minha jornada acadêmica e por toda a sua contribuição.

Agradeço ao meu coorientador Bruno Rizzuti por todo o apoio, especialmente nos momentos difíceis em que me encontrei. Obrigado por todos os ensinamentos, pela compreensão e por todo o suporte. Trabalhar com você tem sido gratificante.

Agradeço aos alunos do Colégio Centro Cultural Manilha, que possibilitaram o desenvolvimento do tema deste trabalho.

Agradeço à UFJF e ao IF Sudeste MG por me acolherem e proporcionarem uma formação de excelência. Conhecer Minas Gerais e Juiz de Fora foi uma experiência enriquecedora e prazerosa.

Este trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Not only is the Universe stranger than we think, it is stranger than we can think.

Werner Heisenberg

RESUMO

O ano de 2025 foi decretado pela Organização das Nações Unidas como Ano Internacional da Ciência e das Tecnologia Quânticas. Comemora-se o centenário dos trabalhos que marcaram o início da formulação matemática da mecânica quântica (MQ). Neste contexto, poderíamos nos perguntar: é possível ensinar tópicos avançados de MQ para estudantes do ensino médio, sem ter que recorrer aos detalhes matemáticos presentes nos cursos superiores e pós-graduações? Embora alguns tópicos de Química abordados no ensino médio estejam relacionados, de certa forma, à mecânica quântica, nossa proposta é levar para esse nível de ensino conceitos quânticos modernos e pouco explorado. Neste trabalho, apresentaremos uma proposta de sequência didática (bem como os resultados de sua aplicação) que abordará, de forma introdutória, conceitos associados ao fenômeno de emaranhamento quântico e ao de não localidade, como superposição, notação de Dirac, colapso da função de onda, quebra de causalidade. Para tal, esta sequência didática contará com o uso de duas metodologias: o Predizer, Observar e Explicar (POE) e a Instrução entre Pares, pautada no conflito cognitivo. Utilizaremos como recurso didático simuladores, com o intuito de facilitar a compreensão. Esperamos que esta sequência didática contribua para a maior inserção de tópicos tão importantes, mas que, em geral, são raramente explorados no ensino básico, especialmente considerando que muitos dos avanços tecnológicos atuais — e certamente futuros — estão fundamentados nos conceitos da teoria quântica. O nosso objetivo é que este estudo contribua para o ensino de tópicos contemporâneos de física no ensino médio, ao sugerir uma abordagem mais acessível à mecânica quântica, especialmente no que se refere à complexidade matemática, às notações formais e ao elevado grau de abstração característico da teoria, articulando a inserção desses temas por meio de simuladores e metodologias que colocam o estudante em posição ativa na construção do conhecimento.

Palavras-chave: mecânica quântica; metodologias ativas; física contemporânea.

ABSTRACT

In 2025, the United Nations declared the International Year of Quantum Science and Technology, marking the centenary of the mathematical foundations of quantum mechanics. This raises an important question: is it possible to teach advanced QM topics to high school students without relying on the complex mathematics typically found in higher education? Although some Chemistry topics taught at the high school level are, to some extent, related to quantum mechanics, our proposal aims to introduce modern and rarely explored quantum concepts at this educational level. In this work, we present a proposal for a didactic sequence — as well as the results of its application — that will address, in an introductory manner, concepts associated with quantum entanglement and nonlocality, such as superposition, Dirac notation, wave function collapse, and the breakdown of causality. This didactic sequence will employ two methodologies: Predict, Observe, and Explain (POE) and Peer Instruction, based on cognitive conflict. Simulators will be used as teaching resources to facilitate understanding. We expect that this sequence will contribute to the broader inclusion of such important, yet generally underexplored, topics in basic education, especially considering that many current — and certainly future — technological advances are grounded in the concepts of quantum theory. The objective of this study is to contribute to the teaching of contemporary physics topics in high school by proposing a more accessible approach to quantum mechanics, particularly regarding mathematical complexity, formal notations, and the high degree of abstraction characteristic of the theory, while integrating these topics through simulators and methodologies that actively engage students in knowledge construction. The aim is to contribute to the integration of essential, yet often neglected, quantum topics into basic education, recognizing that many current and future technological advances are rooted in quantum theory. By proposing a more accessible approach to QM — especially regarding its mathematical and abstract challenges — we seek to support contemporary physics education in high school through methodologies that promote active student engagement in knowledge construction.

Keywords: quantum mechanics; active learning; modern physics.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	– Aparato do experimento de Stern-Gerlach	17
Figura 2	– Predição clássica do experimento de Stern-Gerlach	18
Figura 3	– Resultado obtido no experimento de Stern-Gerlach	18
Figura 4	– Simulador PhET Colorado do experimento de Stern-Gerlach	21
Figura 5	– Arranjo com dois Stern-Gerlach via PhET Colorado	25
Figura 6	– Arranjo com dois Stern-Gerlach e mudança de orientação via PhET Colorado	26
Figura 7	– Arranjo com três Stern-Gerlach via PhET Colorado	27
Figura 8	– Projeção do espaço tridimensional no espaço bidimensional	31
Figura 9	– Projeção do espaço-tempo	31
Figura 10	– Representação de trajetórias no espaço e suas respectivas linhas de universo no espaço-tempo	32
Figura 11	– Representação do trem e dos raios luminosos pelo referencial dos trilhos e do referencial do trem	35
Figura 12	– Diagrama de Minkowski	35
Figura 13	– Exemplo de eventos que, se fossem conectados por um sinal superluminoso, quebrariam causalidade.	36
Figura 14	– Estágios do desenvolvimento cognitivo	40
Figura 15	– O desenvolvimento cognitivo através da assimilação, acomodação e equi- libração	43
Figura 16	– Tipos de desequilíbrio cognitivo: externo e interno	46
Figura 17	– Etapas do POE	49
Figura 18	– Visão bancária de ensino	53
Figura 19	– Etapas da Instrução entre Pares	55
Figura 20	– Registro da aplicação do produto educacional	58
Figura 21	– Registro da introdução do experimento de Stern-Gerlach	59
Figura 22	– Captura de tela do vídeo <i>spin</i> : Stern and Gerlach Experiment . . .	63
Figura 23	– Pergunta 1 do Questionário 1	64
Figura 24	– Pergunta 2 do Questionário 1	64
Figura 25	– Arranjo Stern-Gerlach da Pergunta 3	65
Figura 26	– Pergunta 3 do Questionário 1	65
Figura 27	– Pergunta 4 do Questionário 1	66
Figura 28	– Arranjo Stern-Gerlach da Pergunta 5	66
Figura 29	– Pergunta 5 do Questionário 1	67
Figura 30	– Pergunta 6 do Questionário 1	67
Figura 31	– Arranjo Stern-Gerlach da Pergunta 7	68
Figura 32	– Pergunta 7 do Questionário 1	68

Figura 33	– Pergunta 8 do Questionário 1	69
Figura 34	– Pergunta 9 do Questionário 1	69
Figura 35	– Representação de eventos, linhas de universo, cone de luz, eixos de coordenadas temporais-espaciais no espaço tempo de Minkowski	71
Figura 36	– Pergunta 1 - Instrução por Pares	72
Figura 37	– Pergunta 2 - Instrução por Pares	73
Figura 38	– Pergunta 3 - Instrução por Pares	73
Figura 39	– Pergunta 4 - Instrução por Pares	74
Figura 40	– Pergunta 5 - Instrução por Pares	75
Figura 41	– Emissão de um par emaranhado	77
Figura 42	– Pergunta 1 - Questionário 2	77
Figura 43	– Parte do arranjo utilizado no Questionário 2	78
Figura 44	– Pergunta 2 do Questionário 2	78
Figura 45	– Pergunta 1 do Questionário 1	81
Figura 46	– Distribuição das Respostas da Pergunta 1 do Questionário 1	81
Figura 47	– Pergunta 2 do Questionário 1	83
Figura 48	– Pergunta 3 do Questionário 1	85
Figura 49	– Distribuição das Respostas da Pergunta 3 do Questionário 1	85
Figura 50	– Pergunta 4 do Questionário 1	87
Figura 51	– Pergunta 5 do Questionário 1	89
Figura 52	– Pergunta 6 do Questionário 1	90
Figura 53	– Pergunta 7 do Questionário 1	92
Figura 54	– Distribuição das Respostas da Pergunta 7 do Questionário 1	92
Figura 55	– Pergunta 8 do Questionário 1	94
Figura 56	– Pergunta 9 do Questionário 1	96
Figura 57	– Simulador de diagramas espaço-tempo	100
Figura 58	– Pergunta 1 - Instrução por Pares	101
Figura 59	– Pergunta 2 - Instrução por Pares	101
Figura 60	– Pergunta 3 - Instrução por Pares	102
Figura 61	– Pergunta 4 - Instrução por Pares	102
Figura 62	– Pergunta 5 - Instrução por Pares	103
Figura 63	– Arranjo do par emaranhado	104
Figura 64	– Pergunta 1 do Questionário 2	105
Figura 65	– Distribuição das Respostas da Pergunta 1 do Questionário 2	105
Figura 66	– Compartilhamento de um par emaranhado entre dois laboratórios	106
Figura 67	– Pergunta 2 do Questionário 2	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Descrição da sequência didática	61
Tabela 2 – Sugestão de adaptação na sequência didática para reaplicações	108

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	MECÂNICA QUÂNTICA E RELATIVIDADE: REVISÃO DE CONCEITOS	17
2.1	EXPERIMENTO DE STERN-GERLACH	17
2.2	NOTAÇÃO DE DIRAC	19
2.3	SUPERPOSIÇÃO DE ESTADOS	20
2.4	OBSERVÁVEIS E OPERADORES	21
2.5	PROCESSO DE MEDIÇÃO	23
2.6	EMARANHAMENTO QUÂNTICO	26
2.7	ESPAÇO-TEMPO	29
2.8	RELATIVIDADE RESTRITA: POSTULADOS E FORMULAÇÃO MATEMÁTICA	32
2.9	SIMULTANEIDADE RELATIVA E CAUSALIDADE	34
3	REFERENCIAL TEÓRICO-METODOLÓGICO	38
3.1	PIAGET: BIOGRAFIA E OBRA	38
3.2	PIAGET: PERÍODOS DO DESENVOLVIMENTO COGNITIVO, ASSIMILAÇÃO, ACOMODAÇÃO E EQUILIBRAÇÃO	39
3.3	IMPLICAÇÕES DA TEORIA PIAGETIANA NA APRENDIZAGEM	43
3.4	POE: UMA BREVE REVISÃO DO PREDIZER, OBSERVAR E EXPLICAR	48
3.5	INSTRUÇÃO ENTRE PARES: UMA BREVE REVISÃO	52
4	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	58
4.1	METODOLOGIA DA PESQUISA	59
4.2	O PRODUTO EDUCACIONAL	60
4.2.1	ENCONTRO 1	62
4.2.2	ENCONTRO 2	66
4.2.3	ENCONTRO 3	70
4.2.4	ENCONTRO 4	74
4.2.5	ENCONTRO 5	76
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	80
5.1	ENCONTROS 1 E 2	80
5.2	ENCONTRO 3	98
5.3	ENCONTRO 4	104
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	109
	REFERÊNCIAS	111
	APÊNDICE A – Produto Educacional	117
	APÊNDICE B – Questionário 1	143

APÊNDICE C – Perguntas não localidade (Instrução entre Pares)	146
APÊNDICE D – Questionário 2	149

1 INTRODUÇÃO

O ano de 2025 foi declarado pela Organização das Nações Unidas como o Ano Internacional da Ciência e da Tecnologia Quânticas, em comemoração ao centenário de trabalhos que marcaram o início da formulação da mecânica quântica (MQ) via uma formulação matricial (Stariolo, 2025). Destacam-se nesse processo os trabalhos de pesquisadores como Einstein, Bohr, Heisenberg, Schrödinger, Planck, entre outros, cujas contribuições transformaram profundamente a compreensão da natureza.

A teoria quântica revolucionou a física ao confrontar as intuições da mecânica clássica e introduzir conceitos inovadores, como a quantização da energia, o princípio da incerteza, emaranhamento quântico e não-localidade — ideias que ainda hoje intrigam e desafiam a comunidade científica (Sociedade Brasileira de Física, 2025; Vieira; Ramathan; Cabello, 2025), assim como já o faziam há cerca de um século. A importância dessas discussões é tamanha que, em 2022, os estudos sobre emaranhamento quântico e fundamentos da MQ foram reconhecidos com o Prêmio Nobel de Física (Aspect; Clauser; Zeilinger, 2022).

As implicações desses estudos são amplamente perceptíveis no cotidiano, por meio de tecnologias essenciais como transistores, *lasers* e ressonâncias magnéticas, além de outras inovações que prometem transformar a sociedade no futuro, como os computadores quânticos. Diante disso, é legítimo questionar: seria o mundo de hoje o mesmo sem os impactos da mecânica quântica? As comunicações modernas, os sistemas de produção, os avanços nas técnicas industriais e até mesmo a medicina contemporânea foram profundamente influenciados pelos desdobramentos dessa teoria.

É, portanto, inegável a relevância histórica, científica e tecnológica da mecânica quântica, cujo impacto se estende às relações sociais, econômicas e de saúde. Dado esse impacto, é fundamental que seus conceitos estejam presentes em um espaço essencial à formação dos cidadãos: a escola.

De maneira geral, o ensino de tópicos dessa natureza na escola alinha-se com a primeira competência geral da Educação Básica, conforme estabelecido na Base Nacional Comum Curricular (BNCC), que propõe:

“Valorizar e utilizar os conhecimentos historicamente construídos sobre o mundo físico, social, cultural e digital para entender e explicar a realidade, continuar aprendendo e colaborar para a construção de uma sociedade justa, democrática e inclusiva.” (Brasil, 2018, p.9)

Ainda de acordo com a BNCC, a terceira competência específica da área de Ciências da Natureza para o ensino médio estabelece:

“Investigar situações-problema e avaliar aplicações do conhecimento científico e tecnológico e suas implicações no mundo, utilizando procedimentos e linguagens próprios das Ciências da Natureza, para propor soluções que considerem demandas locais, regionais e/ou globais, e comunicar suas descobertas e conclusões a públicos variados, em diversos contextos e por meio de diferentes mídias e tecnologias digitais de informação e comunicação (TDIC)”. (Brasil, 2018, p.558)

São amplamente reconhecidos os desafios que o ensino de física precisa superar, os quais envolvem diferentes aspectos, como deficiências na formação docente, escassez de recursos (financeiros, didáticos, entre outros) e a falta de conexão entre os conceitos abordados e a realidade dos estudantes.

“Desde as últimas décadas, a deterioração da qualidade do ensino de física nas escolas, sobretudo da rede pública, é uma situação alarmante. Não é difícil constatar a baixa qualificação acadêmica dos professores, a desmotivação dos estudantes, a abordagem excessivamente formulística da física, enfim, uma visão do tipo “colcha de retalhos” dessa ciência, com demasiada ênfase no ensino da cinemática, a ausência da física moderna e contemporânea nos currículos escolares, apenas para citar alguns problemas nesta área específica. Transformar esta realidade não é trivial, pois ela está contextualizada em um cenário mais amplo de pouca vontade política de melhorar a educação em nosso país.” (Ostermann; Cavalcanti, 2001, p.13)

De modo similar, segundo Ostermann e Moreira (2001):

“[...] É fundamental preparar adequadamente os futuros professores para essa complexa tarefa de inovação curricular se o objetivo é implementá-la nas escolas. [...] Colocar futuros professores na participação da transposição didática de tópicos de FMC pode permitir que aprofundem seus conhecimentos, desenvolvam uma preocupação em tornar o assunto acessível aos alunos nas escolas e responsabilizem-se de forma mais efetiva pelo processo ensino-aprendizagem como um todo.” (Ostermann; Moreira, 2001, p.146)

No ensino médio, embora alguns conceitos de Física Moderna e Contemporânea (FMC) também estejam presentes na Química, em especial a mecânica quântica, quando abordados em um contexto moderno, como no caso do conceito de superposição, apresentam dificuldades adicionais, como a complexidade do formalismo matemático, a abstração conceitual e o caráter contraintuitivo da área, que impõem desafios tanto para professores quanto para estudantes, conforme apontam Siqueira (2012) e Silva, Carvalho e Philippsen (2022).

Ostermann e Moreira (2000) também apontam como dificuldade a escolha dos tópicos de Física Moderna e Contemporânea (FMC) a serem ensinados nas escolas, de modo que seja possível uma transposição didática adequada para o ensino médio.

De acordo com Oliveira, Vianna e Gerbassi (2007):

“Não basta introduzir novos assuntos que proporcionem análise e estudos de problemas mais atuais se não houver uma preparação adequada dos alunos das licenciaturas para esta mudança e se o profissional em exercício não tiver a oportunidade de se atualizar. Os professores precisam ser os atores principais no processo de mudança curricular, pois serão eles que as implementarão na sua prática pedagógica”. (Oliveira; Vianna; Gerbassi, 2007, p.448)

Neste contexto, poderíamos nos perguntar: é possível ensinar tópicos modernos de MQ para estudantes do ensino médio, sem ter que recorrer aos detalhes matemáticos presentes nos cursos superiores e pós-graduações?

Neste trabalho, propomos uma sequência didática voltada para alunos dos anos finais do ensino médio, com foco em conceitos associados aos fenômenos de emaranhamento quântico e indícios de não localidade, além de tópicos como superposição, notação de Dirac, colapso da função de onda e quebra de causalidade. A proposta foi construída com base na metodologia POE (Predizer – Observar – Explicar) de White e Gunstone (2014), aliada à estratégia de Instrução entre Pares; veja por exemplo, o trabalho de Crouch e Mazur (2001). Com o intuito de promover uma abordagem menos abstrata e mais acessível dos fundamentos da mecânica quântica, recorreu-se à utilização de simuladores interativos como recurso didático.

“Uma simulação é capaz de traduzir o que é “impossível” de ser feito por palavras e, no caso da Física Moderna, pode reproduzir o que não pode ser feito em laboratório. Talvez uma característica importante da simulação é que ela é capaz de “embutir” todo o formalismo matemático de determinadas partes da Física. Assim, o aluno mesmo sendo incapaz de fazer ou compreender a sofisticação matemática envolvida em um determinado experimento ou fenômeno, pode usar a simulação e entender a Física ali apresentada. As simulações, diferentemente das animações, podem fazer previsões, podendo então testar hipóteses construídas pelos alunos. As simulações são capazes de fazer a mediação entre o pensar e colocar o pensamento em ação.” (Pietrocola; Brockington, 2003, p.4)

A sequência foi aplicada em uma turma de 28 alunos de uma escola particular no município de Itaboraí – RJ, sendo avaliada por meio de instrumentos de coleta de dados qualitativos, com o uso de questionários mistos.

A fundamentação teórica baseia-se na perspectiva construtivista de Jean Piaget, com ênfase no conceito de conflito cognitivo como motor para a aprendizagem. Foram

utilizados os simuladores (a) PhET (para o experimento de Stern-Gerlach) e (b) um simulador on-line para visualização de eventos no espaço-tempo de Minkowski para diferentes observadores, aliados às metodologias previamente citadas, como estratégias para favorecer o engajamento e a compreensão mais significativa dos conceitos propostos.

Dentre os resultados obtidos, destaca-se um maior envolvimento dos estudantes nas atividades que utilizaram o simulador do experimento de Stern-Gerlach, especialmente nas discussões relacionadas ao colapso da função de onda. Por outro lado, observou-se dificuldade inicial na compreensão do conceito de linhas de universo, sobretudo em situações envolvendo eventos ocorrendo em referenciais distintos.

A proposta demonstrou potencial para tornar os conceitos da mecânica quântica mais acessíveis — tais como superposição, colapso da função de onda, notação de Dirac e emaranhamento quântico —, embora ainda existam desafios metodológicos e conceituais a serem superados, especialmente no que se refere à aplicação mais eficaz da metodologia de Instrução entre Pares e à abstração envolvida em alguns temas introdutórios à não localidade.

Em um estudo recente, envolvendo 15 países (Stadermann; Van den Berg; Goedhart, 2019), mostrou-se que cursos de física quântica foram implementados já no ensino médio. Foram identificados sete tópicos comuns às propostas de inserção, que incluíam:

1. Níveis de energia atômicos discretos;
2. Interação entre matéria e luz;
3. Dualidade onda-partícula;
4. Comprimento de onda de de Broglie;
5. Aplicações tecnológicas;
6. Princípio da incerteza de Heisenberg;
7. Natureza probabilística da física quântica.

Nossa proposta dá um passo à frente ao propor a abordagem de tópicos modernos, ultrapassando os itens acima que são utilizados ao se estudar os primórdios da teoria quântica.

Dessa forma, esta dissertação busca contribuir para a ampliação das discussões sobre o ensino de mecânica quântica no ensino médio, por meio da promoção de uma proposta didática que contribua para a inserção deste tema tão relevante no contexto escolar, refletindo sobre suas potencialidades e limitações.

2 MECÂNICA QUÂNTICA E RELATIVIDADE: REVISÃO DE CONCEITOS

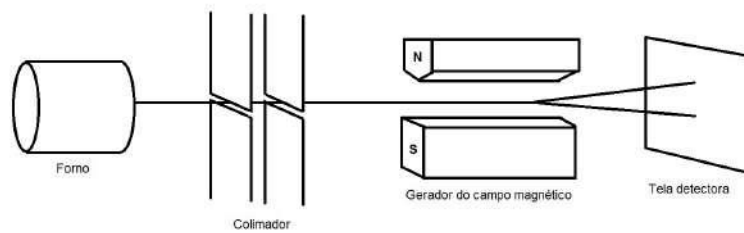
Este capítulo apresenta uma breve revisão de alguns tópicos de mecânica quântica e relatividade. Neste trabalho, adotamos a abordagem matricial da MQ, utilizando a notação de *bra-ket*, com ênfase na análise de sistemas de dois níveis, como o experimento de Stern-Gerlach - veja por exemplo (Gomes; Pietrocola, 2011; Grossi *et al.*, 2023). Para isso, utilizamos como referência trabalhos destas áreas (Lesche, 2005; Perez, 2016; Novaes; Studart, 2016; Amaral; Baraviera; Cunha, 2011; Venancio, 2014; Guandalin, 2018; Vanzella, 2020; Terini, 2022a,b)

2.1 EXPERIMENTO DE STERN-GERLACH

O experimento de Stern-Gerlach foi realizado entre 1921 e 1922, resultado das proposições de Otto Stern em colaboração com Walther Gerlach. O objetivo principal era determinar se o momento angular dos átomos era quantizado, conforme proposto pelo modelo atômico de Bohr. Além disso, previa-se teoricamente pela extensão do modelo de Bohr — o modelo de Bohr-Sommerfeld, que o plano da órbita teria inclinações discretas (Gomes; Pietrocola, 2011).

O experimento funciona da seguinte forma: um feixe de átomos é direcionado perpendicularmente a um gradiente de campo magnético não uniforme. Ao atravessar o campo magnético, os átomos são depositados em uma tela detectora. Abaixo, a figura 1 detalha o experimento de Stern-Gerlach.

Figura 1 – Aparato do experimento de Stern-Gerlach



Fonte: Valle (2023, p.30).

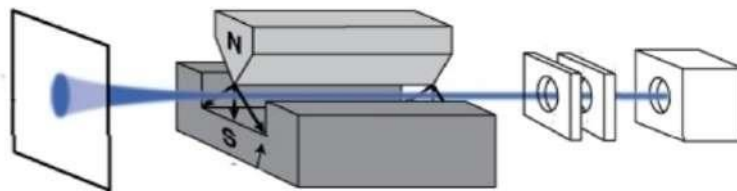
Nesse processo, surge uma força resultante da interação entre o momento de dipolo magnético e o gradiente do campo magnético, descrita por

$$\vec{F} = \nabla (\vec{\mu} \cdot \vec{B}), \quad (2.1)$$

que tende a curvar a trajetória dos átomos. Essa curvatura pode ser compensada por um campo elétrico.

Seguindo os conceitos clássicos, esperava-se que os átomos formassem uma distribuição contínua na tela detectora (figura 2).

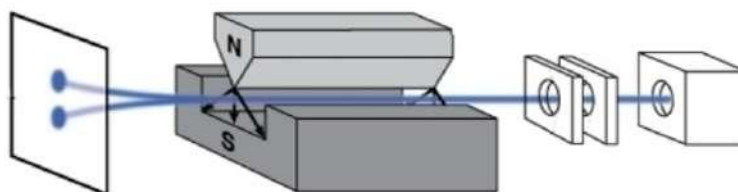
Figura 2 – Predição clássica do experimento de Stern-Gerlach



Fonte: Adaptado de Venancio (2014).

Contudo, o resultado observado foi surpreendente. O padrão na tela revelou que os átomos estavam concentrados em apenas duas regiões bem definidas (figura 3). A causa desse comportamento é o *spin*, embora esta propriedade quântica não fosse conhecida à época.

Figura 3 – Resultado obtido no experimento de Stern-Gerlach



Fonte: Adaptado de Venancio (2014).

O *spin* é uma propriedade inerente ao elétron, também conhecido como momento angular intrínseco, que gera de forma associada um momento magnético intrínseco. No experimento Stern-Gerlach, o feixe de átomos é defletido em dois, o que chamamos de *spin up* e *spin down*. Assim, os átomos foram defletidos para uma dessas duas regiões na tela detectora, refletindo a quantização do *spin*.

O experimento de Stern-Gerlach desempenhou um papel fundamental na ideia da quantização do momento angular e discretização de grandezas físicas, estabelecendo uma base sólida para a discussão dos fundamentos da mecânica quântica.

Além disso, ele apresenta grande potencial didático ao utilizar a abordagem matricial (*spin*) como alternativa à abordagem tradicional, que se fundamenta na função de onda e na resolução da equação de Schrödinger. Essa abordagem torna o experimento um excelente ponto de partida para explorar tópicos relevantes da MQ, como o conceito de superposição de estados, o colapso da função de onda e a notação de Dirac.

2.2 NOTAÇÃO DE DIRAC

É uma notação universal quando se trata de mecânica quântica. Em vez de escrevermos uma função de onda para um sistema, representamos o estado do sistema por um vetor em um espaço vetorial munido de um produto interno. Tecnicamente espaços deste tipo são conhecidos como espaços de Hilbert.¹ Esse estado é descrito por um vetor chamado **ket** $|n\rangle$, por exemplo:

$$|n\rangle = \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \\ \vdots \\ n_n \end{bmatrix}. \quad (2.2)$$

Além do **ket**, a notação de Dirac também permite representar outro vetor, o **bra**. O $\langle n|$ é o conjugado transposto do **ket**:

$$\langle n| = |n\rangle^\dagger. \quad (2.3)$$

De maneira mais geral,

$$|n\rangle^\dagger = \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \\ \vdots \\ n_n \end{bmatrix}^\dagger = \begin{bmatrix} n_1^* & n_2^* & n_3^* & \cdots & n_n^* \end{bmatrix}. \quad (2.4)$$

O produto interno na notação de Dirac é representado por $\langle m|n\rangle$. Matematicamente, temos o seguinte:

$$\langle m|n\rangle = \begin{bmatrix} m_1^* & m_2^* & m_3^* & \cdots & m_n^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \\ \vdots \\ n_n \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^n m_i^* n_i. \quad (2.5)$$

É costume expressar vetores no espaço de Hilbert como combinação linear dos vetores de uma base ortonormal, isto é:

- O produto interno entre dois vetores diferentes é nulo.

¹ A função de onda também é um vetor de um espaço de Hilbert - aquele de funções complexas de quadrado integráveis. Para os propósitos deste trabalho, focaremos, contudo, em espaços de dimensão finita.

- Os vetores satisfazem uma condição de normalização, ou seja: $\langle n|n \rangle = 1$.

Com os itens acima em mente, o produto interno entre dois vetores ortonormais é representado da seguinte forma:

$$\langle m|n \rangle = \delta_{mn} = \begin{cases} 1, & \text{se } m = n, \\ 0, & \text{se } m \neq n, \end{cases} \quad (2.6)$$

onde δ_{mn} é a delta de Kroenecker.

2.3 SUPERPOSIÇÃO DE ESTADOS

O princípio da superposição de estados quânticos é um dos fundamentos da mecânica quântica. Ele afirma o seguinte: “Dados dois estados possíveis para um objeto/sistema quântico, a combinação linear desses estados também é um estado possível.”

Por exemplo, dados dois vetores que representam estados possíveis de um sistema quântico, digamos, $|a_1\rangle$ e $|a_2\rangle$, o vetor representado por $|\Psi\rangle$, escrito como a combinação linear desses dois vetores, $|a_1\rangle$ e $|a_2\rangle$,

$$|\Psi\rangle = c_1 |a_1\rangle + c_2 |a_2\rangle \quad (2.7)$$

também pode representar um estado do sistema.

No caso particular em que o espaço de Hilbert correspondente seja bidimensional, poderíamos pensar que $|a_1\rangle$ e $|a_2\rangle$ respeitam a condição de normalização $\langle a_1|a_1 \rangle = 1$ e $\langle a_2|a_2 \rangle = 1$, além de serem ortogonais, $\langle a_1|a_2 \rangle = 0$, formando uma base para o espaço. Uma breve análise desta construção revela que um sistema pode ter um número infinito de estados, já que é possível formar infinitas combinações lineares, embora o espaço de estados associado tenha dimensão finita.

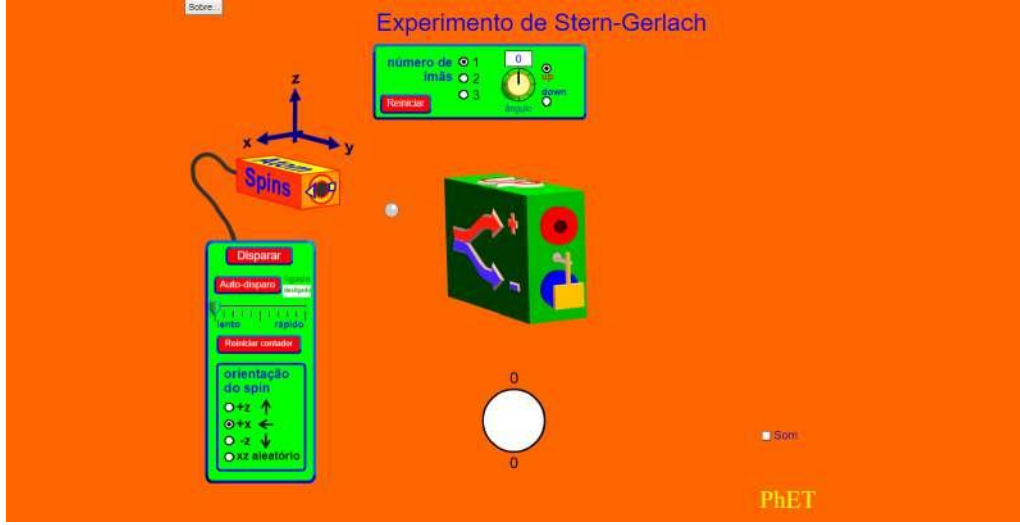
O experimento de Stern-Gerlach (figura 4) é um bom exemplo para ilustrar o conceito de superposição em sistemas de dois níveis. Com o apoio da notação de Dirac, é possível representar o vetor de estado antes de o átomo passar pelo campo magnético não uniforme.

A seguir, temos uma representação de estado possível:

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle + |1\rangle). \quad (2.8)$$

Na equação (2.8), $|0\rangle$ representa o *spin* para cima, e o $|1\rangle$ representa o *spin* para baixo. O fator $\frac{1}{\sqrt{2}}$ está relacionado a um aspecto probabilístico. Matematicamente, a ideia de superposição está diretamente relacionada às combinações lineares. No contexto físico, a superposição significa que, no exemplo do experimento de Stern-Gerlach, o *spin* tem probabilidade não nula de ter tanto o *spin* para cima quanto o *spin* para baixo (antes de

Figura 4 – Simulador PhET Colorado do experimento de Stern-Gerlach



Fonte: Captura de tela retirada do simulador PhET Colorado do experimento de Stern-Gerlach. PhET Interactive Simulations (2024).

passar pelo campo magnético). Após a passagem pelo campo, ocorre o que chamamos de colapso da medida ou colapso da função de onda, o qual será discutido na próxima seção.

2.4 OBSERVÁVEIS E OPERADORES

Um observável é uma quantidade física que pode ser medida e (às vezes) observada. Na teoria clássica, a descrição matemática dos observáveis é feita por meio de funções, que podem ter valores escalares ou vetoriais. Na MQ, um observável é representado por operadores hermitianos definidos no espaço de Hilbert.

De maneira geral, embora já tenhamos mencionado acima, um espaço de Hilbert pode ser entendido como:

1. Uma generalização de espaços vetoriais de Euclides² reais;
2. Um espaço vetorial (finito ou infinito) dotado de um produto interno (no caso finito dimensional tal produto pode ser dado por (2.5));
3. Novamente, no caso finito dimensional, a base é dada por um conjunto de vetores $\{|1\rangle, |2\rangle, \dots, |n\rangle\}$ ortonormais, tal que qualquer vetor do espaço pode ser escrito pela combinação linear

$$|\psi\rangle = \sum_{i=1}^n C_i |i\rangle. \quad (2.9)$$

² O espaço euclidiano é um espaço vetorial real, de dimensão finita, no qual está definido um produto interno.

Assim como operadores representam observáveis, vetores em um espaço de Hilbert também possuem um papel fundamental na formulação matemática da teoria quântica: eles representam estados do sistema.

Um operador é uma função ou mapeamento que atua sobre um vetor de um espaço vetorial, transformando-o em outro vetor do mesmo espaço ou de um espaço relacionado. Em mecânica quântica, nos interessam operadores lineares, que são aqueles que satisfazem,

$$A(\alpha |u\rangle + \beta |v\rangle) = \alpha A(|u\rangle) + \beta A(|v\rangle). \quad (2.10)$$

onde A é um operador, $|u\rangle$, $|v\rangle$, α e β são vetores e escalares, respectivamente arbitrários.

Dados operadores T e S , também é possível definir as seguintes transformações: $(T + S)$ e λT . Elas são dadas por,

$$(T + S) |u\rangle = T |u\rangle + S |u\rangle \quad \text{e} \quad (\lambda T) |u\rangle = \lambda T |u\rangle,$$

onde $|u\rangle$ é um vetor arbitrário.

É comum na literatura que operadores sejam descritos da seguinte forma: $\hat{A}$. Por exemplo, operadores de momento e posição são representados, respectivamente, por $\hat{p}$ e $\hat{x}$.

Os operadores da MQ são transformações lineares da álgebra linear; assim, podem ser representados por matrizes quadradas para o caso de espaços de dimensão finita.

Uma outra operação entre mapeamentos é o comutador, que pode ser definido como:

$$[\hat{A}, \hat{B}] = \hat{A}\hat{B} - \hat{B}\hat{A}. \quad (2.11)$$

Vamos tomar como exemplo dois operadores, chamados de operadores ou matrizes de Pauli:

$$\hat{\sigma}_x = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad \hat{\sigma}_z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}. \quad (2.12)$$

Ao calcular o comutador $[\hat{\sigma}_x, \hat{\sigma}_z]$ é possível verificar que o resultado é diferente de zero, ou seja, estes dois operadores não comutam. Se os operadores comutassem, claro, o resultado anterior seria zero.

A ordem dos operadores tem certa relevância. Quando dois operadores $\hat{A}$ e $\hat{B}$ comutam, as medições de $\hat{A}$ não influenciam as de $\hat{B}$ e vice-versa, ou seja, eles podem ser medidos simultaneamente. Já quando esses operadores não comutam, isso significa que a medição de $\hat{A}$ pode influenciar a medição de $\hat{B}$. Aqui estamos já antecipando que operadores de um tipo específico (hermitianos) representam observáveis de um sistema, como veremos na próxima subseção.

Um operador é hermitiano quando ele é igual ao seu adjunto, ou seja, $\hat{A} = \hat{A}^\dagger$. Tomando as matrizes de Pauli anteriores, $\hat{\sigma}_x$ e $\hat{\sigma}_z$, é fácil ver que elas representam

operadores hermitianos. Ou seja:

$$\hat{\sigma}_x = \hat{\sigma}_x^\dagger = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad \hat{\sigma}_z = \hat{\sigma}_z^\dagger = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}.$$

Ao atuarmos com um operador, digamos, $\hat{A}$ sobre um estado, encontramos um outro vetor no espaço de Hilbert. Uma equação de interesse em mecânica quântica é aquela em que atuamos com o operador sobre um estado e o resultado é proporcional ao próprio estado,

$$\hat{A}|\psi\rangle = \lambda|\psi\rangle, \quad (2.13)$$

onde λ é algum escalar. Equações deste tipo são chamadas de equação de autovalores e autovetores.

Vamos considerar a equação (2.13) para um operador específico, o hamiltoniano. O hamiltoniano é um operador que está relacionado à energia do sistema. Assim:

$$\hat{H}|\psi_n\rangle = E_n|\psi_n\rangle. \quad (2.14)$$

Os E_n correspondem aos autovalores do operador $\hat{H}$ e $|\psi_n\rangle$ são os chamados autovetores.

Na próxima seção, em que discutiremos o processo de medição, alguns dos tópicos abordados aqui serão revisitados, conectando o formalismo matemático com a teoria quântica.

2.5 PROCESSO DE MEDIÇÃO

O resultado de uma medição na mecânica quântica é completamente diferente daquele encontrado na física clássica. Na teoria clássica é possível prever com 100% de certeza o resultado de uma medição, sendo este resultado único e sem restrições para os valores obtidos, enquanto na MQ, existem restrições quanto aos valores obtidos para certo observável.

Por exemplo, considere um sistema com uma única partícula em um certo sistema de coordenadas, onde a partícula está inicialmente na posição $x = 5$ e possui velocidade inicial nula. Como essa velocidade é constante, a medida da posição da partícula em qualquer instante posterior fornecerá o mesmo valor. Em outras palavras, a partícula permanecerá na mesma posição, mesmo que sejam realizadas N medições.

Para entendermos como é descrito o processo de medida na mecânica quântica, vamos nos basear em três postulados.

Primeiro postulado: Os únicos resultados possíveis para a medição de uma quantidade física caracterizado pelo operador $\hat{A}$ são os seus autovalores, a_n .

Na seção anterior, abordamos a equação dos autovalores - veja a equação (2.14). A interpretação deste postulado para essa equação é a seguinte: os únicos resultados possíveis para a energia do sistema são os autovalores E_n .

Segundo postulado: Quando a quantidade física associada ao operador é medida no sistema preparado em um estado $|\psi\rangle$, a probabilidade de se obter um específico autovalor a_n é dada por:

$$Pr(a_n | |\psi\rangle) = |\langle a_n | \psi \rangle|^2, \quad (2.15)$$

onde $\langle a_n |$ é o bra correspondente autovetor associado.

Um estado pode ser representado como combinação linear de outros estados (vide equação (2.9)). Os coeficientes C_n são dados por

$$C_n = \langle a_n | \psi \rangle \quad (2.16)$$

A probabilidade, neste caso, é proporcional à contribuição do autovetor associado na combinação linear do estado.

Terceiro postulado: Se a medida de uma quantidade física representada por $\hat{A}$ em um sistema inicialmente no estado representado por $|\psi\rangle$ fornece o resultado a_n , então o estado do sistema imediatamente após a medida muda instantaneamente para o respectivo autoestado $|a_n\rangle$.

O processo de medida perturba o sistema, alterando seu estado após a medição. Esse fenômeno é conhecido como colapso da medida ou colapso da função de onda.

Munidos dos postulados, tomaremos o experimento de Stern-Gerlach como exemplo. Vimos na equação (2.8) a representação de um possível estado no experimento de Stern-Gerlach. Vamos definir alguns objetos: Os vetores $|0\rangle$ e $|1\rangle$ serão os estados do sistema quando dividimos o feixe de partículas incidente com um campo magnético na direção z . Eles são representados por:

$$|0\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad |1\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (2.17)$$

Os vetores $|+\rangle$ e $|-\rangle$ descrevem os estados quando dividimos o feixe por um campo magnético na direção x e são representados por:

$$|+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad |-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}. \quad (2.18)$$

Como vimos anteriormente, $\hat{\sigma}_z$ é um operador hermitiano e como tal, pode representar um observável do experimento de Stern-Gerlach. Um cálculo direto mostra que $\hat{\sigma}_z |0\rangle = +|0\rangle$ e $\hat{\sigma}_z |1\rangle = -|1\rangle$. Assim, este operador representa o *spin* do sistema, que pode ter dois valores, *up* ou $+1$ e *down* ou -1 .

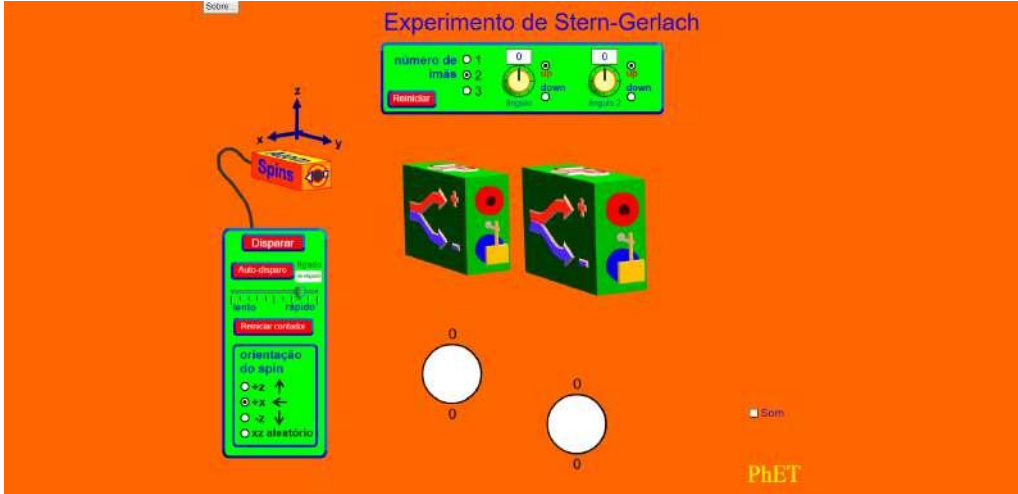
Suponhamos que o estado do sistema seja representado por (2.8). Com base na equação (2.15), as probabilidades de se encontrar os estados $|0\rangle$ e $|1\rangle$, ou seja, encontramos *up* e *down* são, respectivamente:

$$Pr(0|+)) = |\langle 0|+ \rangle|^2 = \frac{1}{2}, \quad (2.19)$$

$$Pr(1|+)) = |\langle 1|+ \rangle|^2 = \frac{1}{2}. \quad (2.20)$$

Vamos agora considerar o mesmo experimento, mas inserindo um segundo Stern-Gerlach (figura 5). Na passagem do primeiro para o segundo, o estado $|1\rangle$ é bloqueado de tal forma que o novo estado é: $|\psi'\rangle = |0\rangle$. As probabilidades de encontrar os estados $|0\rangle$ e $|1\rangle$ são, respectivamente:

Figura 5 – Arranjo com dois Stern-Gerlach via PhET Colorado



Fonte: Captura de tela retirada do simulador PhET Colorado do experimento de Stern-Gerlach. PhET Interactive Simulations (2024).

$$Pr(0|0)) = |\langle 0|0 \rangle|^2 = 1, \quad (2.21)$$

$$Pr(1|0)) = |\langle 1|0 \rangle|^2 = 0. \quad (2.22)$$

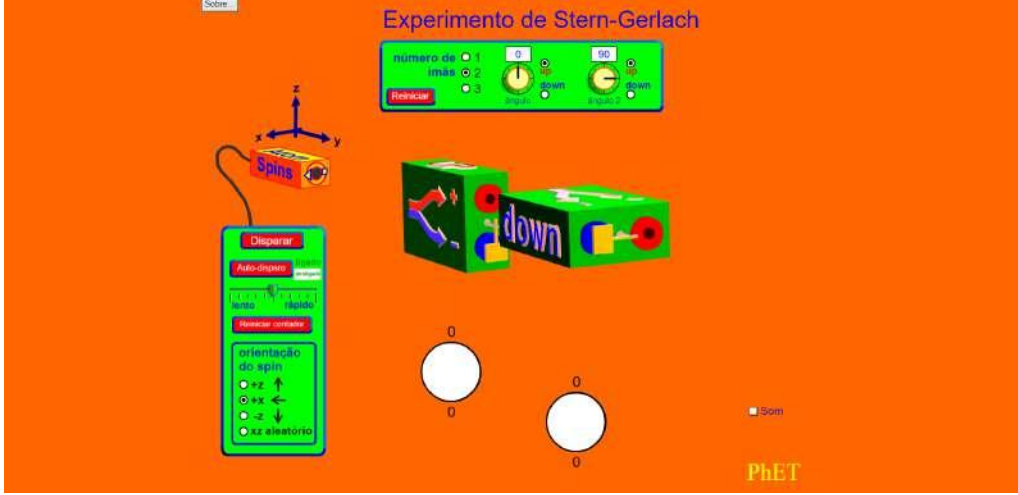
Os resultados acima são razoáveis, afinal, a probabilidade de encontrar *spin up* é 1 dado que o sistema já está no estado de *spin up*. No segundo caso, a probabilidade de encontrar *spin down* em um sistema preparado no estado de *spin up* é nula.

Vamos agora considerar o experimento anterior, mas com o segundo Stern-Gerlach na orientação x (figura 6). Sabemos que o novo estado é: $|0\rangle$. As probabilidades de encontrar os estados $|+\rangle$ e $|-\rangle$ são, respectivamente:

$$Pr(+|0)) = |\langle +|0 \rangle|^2 = \frac{1}{2}. \quad (2.23)$$

$$Pr(-|0\rangle) = |\langle -|0\rangle|^2 = \frac{1}{2}. \quad (2.24)$$

Figura 6 – Arranjo com dois Stern-Gerlach e mudança de orientação via PhET Colorado



Fonte: Captura de tela retirada do simulador PhET Colorado do experimento de Stern-Gerlach. PhET Interactive Simulations (2024).

Vamos agora considerar a situação anterior, mas com o acréscimo de um terceiro Stern-Gerlach na orientação z e com o estado $|-\rangle$ bloqueado (figura 7). O novo estado é: $|+\rangle$. As probabilidades de encontrar os estados $|0\rangle$ e $|1\rangle$ são, respectivamente:

$$Pr(0|0\rangle) = |\langle 0|+\rangle|^2 = \frac{1}{2}. \quad (2.25)$$

$$Pr(1|0\rangle) = |\langle 1|+\rangle|^2 = \frac{1}{2}. \quad (2.26)$$

Os resultados nesses exemplos, onde ocorre mudança de orientação no experimento de Stern-Gerlach, estão relacionados à não comutação dos operadores de Pauli (equação (2.12)).

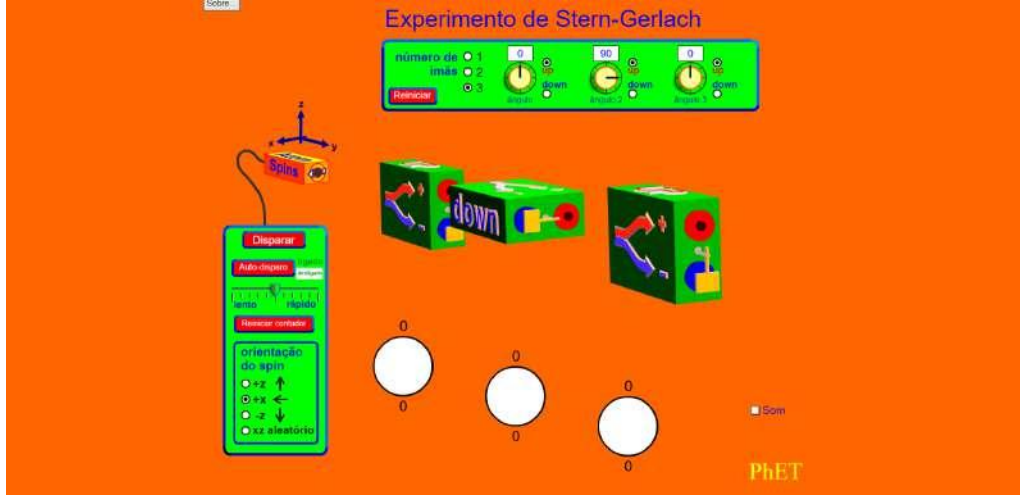
2.6 EMARANHAMENTO QUÂNTICO

Um outro ponto central para este trabalho é a noção de emaranhamento quântico. Para abordarmos conceitos relacionados ao emaranhamento, começaremos pela definição de produto tensorial.

Dados dois espaços de Hilbert V_a e V_b , podemos construir um novo espaço vetorial $V_a \otimes V_b$, onde $\{|i\rangle; i = 1, \dots, n\}$ é uma base de V_a e $\{|a\rangle; a = 1, \dots, m\}$ é uma base de V_b . O produto tensorial é definido como:

$$|i\rangle \otimes |a\rangle = |ia\rangle, \quad (2.27)$$

Figura 7 – Arranjo com três Stern-Gerlach via PhET Colorado



Fonte: Captura de tela retirada do simulador PhET Colorado do experimento de Stern-Gerlach. PhET Interactive Simulations (2024).

com $n \cdot m$ vetores ao todo, formamos uma base $V : \{|i\rangle \otimes |a\rangle = |ia\rangle\}$.

Um vetor $|v\rangle \in V_a \otimes V_b$ é dito decomponível se pode ser escrito na forma $|v_a\rangle \otimes |v_b\rangle$, com $|v_a\rangle \in V_a$ e $|v_b\rangle \in V_b$. Um vetor $|\psi\rangle$ qualquer em $V_a \otimes V_b$ toma a forma

$$|\psi\rangle = \sum_{i,a} C_{ia} |ia\rangle$$

com C_{ia} coeficientes complexos. No caso geral, não conseguimos escrevê-lo da forma decomponível e vetores que não podem ser decompostos são chamados de emaranhados.

Podemos definir também o produto interno em $V_a \otimes V_b$:

$$\langle v_a v_b | u_a u_b \rangle = \langle v_a | u_a \rangle \langle v_b | u_b \rangle, \quad (2.28)$$

o que faz de $V_a \otimes V_b$ um espaço de Hilbert.

O exemplo utilizado em nosso trabalho é uma base que pode ser descrita por $\mathbb{C}^4 = \mathbb{C}^2 \otimes \mathbb{C}^2$. Por razões históricas, uma base para V é o conjunto $\{|0\rangle, |1\rangle\}$. Para uma base de $\mathbb{C}^2 \otimes \mathbb{C}^2$, podemos considerar, por exemplo, o conjunto $\{|00\rangle, |01\rangle, |10\rangle, |11\rangle\}$. Todos os vetores dessa base são decomponíveis. No entanto, podemos formar outra base com 4 vetores, como os vetores conhecidos como de Bell:

$$|\Phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|00\rangle + |11\rangle), \quad (2.29)$$

$$|\Phi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|00\rangle - |11\rangle), \quad (2.30)$$

$$|\Psi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|01\rangle + |10\rangle), \quad (2.31)$$

$$|\Psi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|01\rangle - |10\rangle), \quad (2.32)$$

Vamos verificar se os vetores de Bell podem ser vetores decomponíveis. Suponhamos que $|\Phi^+\rangle$ possa ser escrito como um produto tensorial, na forma:

$$|\Phi^+\rangle = |\alpha\rangle \otimes |\beta\rangle, \quad (2.33)$$

onde:

$$\begin{aligned} |\alpha\rangle &= a|0\rangle + b|1\rangle \\ |\beta\rangle &= \gamma|0\rangle + \delta|1\rangle \end{aligned} \quad (2.34)$$

Com base nas equações (2.29) e (2.34), a equação (2.33) segue:

$$\begin{aligned} |\Phi^+\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} (|00\rangle + |11\rangle) = (a|0\rangle + b|1\rangle) \otimes (\gamma|0\rangle + \delta|1\rangle) \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} (|00\rangle + |11\rangle) = a\gamma|00\rangle + a\delta|01\rangle + b\gamma|10\rangle + b\delta|11\rangle \end{aligned} \quad (2.35)$$

Comparando, temos:

$$\begin{aligned} a\gamma &= \frac{1}{\sqrt{2}} \Rightarrow a \neq 0 \text{ e } \gamma \neq 0 \\ a\delta &= 0 \Rightarrow a = 0 \text{ ou } \delta = 0 \\ b\gamma &= 0 \Rightarrow b = 0 \text{ ou } \gamma = 0 \\ b\delta &= \frac{1}{\sqrt{2}} \Rightarrow b \neq 0 \text{ e } \delta \neq 0 \end{aligned} \quad (2.36)$$

Repare a contradição: onde $a = 0$ e $a \neq 0$, $b = 0$ e $b \neq 0$. Logo, esse vetor é emaranhado, assim como os outros vetores de Bell.

Vamos agora discutir o que ocorre quando fazemos medições em sistemas compostos. O conjunto $\{|00\rangle, |01\rangle, |10\rangle, |11\rangle\}$ pode descrever o estado de dois qubits:

$$|\Psi\rangle = \alpha_{00}|00\rangle + \alpha_{01}|01\rangle + \alpha_{10}|10\rangle + \alpha_{11}|11\rangle, \quad (2.37)$$

onde a probabilidade de obter o par ij em uma medição que mede, digamos, o *spin* na direção z em ambas as entradas é $|\alpha_{ij}|^2$.

Vamos usar agora o $|\Phi^+\rangle$ (equação (2.29)). Podemos imaginar um par de partículas, uma com *spin* “para cima” $|0\rangle$ e a outra com *spin* “para baixo” $|1\rangle$. Imagine que uma partícula viaje para a direita e a outra para a esquerda, a descrição do sistema é feita por $\mathbb{C}^2 \otimes \mathbb{C}^2$, onde $\mathbb{C}^2$ corresponde ao espaço de estados da partícula da esquerda e o outro $\mathbb{C}^2$ corresponde ao espaço associado à partícula da direita. Por exemplo:

$$|\Psi\rangle = |0\rangle_E |0\rangle_D \quad (2.38)$$

é um vetor de estado em que a partícula da esquerda tem *spin* “para cima” e a partícula da direita também.

É possível formar experimentalmente um par emaranhado (usando luz) com a seguinte forma (Li, 2020):

$$|\Phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle_E |0\rangle_D + |1\rangle_E |1\rangle_D). \quad (2.39)$$

Digamos que você faça uma medição no laboratório da esquerda e encontre *spin* “para cima” (0 na nossa descrição). Como a operação é realizada pelo sistema composto, o colapso é descrito pelo operador $|0\rangle\langle 0|_E \otimes \mathbb{1}_D$, que projeta o setor da esquerda para o estado $|0\rangle_E$ e atua como a identidade no setor da direita, uma vez que a medição (local) é feita somente em uma das partes. O resultado, após a normalização é

$$|\Phi'\rangle = |0\rangle_E |0\rangle_D. \quad (2.40)$$

Antes, a partícula da direita tinha 50% de chance de ter *spin* para cima e 50% de ter *spin* para baixo. Ao realizar uma operação local no laboratório da esquerda, conseguimos alterar o estado do laboratório da direita. Como se sabia $|\Phi^+\rangle$ antes, era possível ligar para o laboratório da direita e pedir para medir o *spin*, e com certeza encontraria *spin* “para cima”.

Estados de sistemas compostos descritos no espaço $\mathbb{C}^2 \otimes \mathbb{C}^2$ só possuem resultados independentes de medição (a medição no laboratório da esquerda não influencia no laboratório da direita) se (e somente se) o estado for decomponível (Cunha, 2007).

As correlações quânticas (ou emaranhamento) estão relacionadas ao caráter não local da MQ, um aspecto que foi discutido inicialmente no paradoxo EPR e na ideia de “ação fantasmagórica à distância” proposta por Einstein, Podolsky e Rosen (1935).

2.7 ESPAÇO-TEMPO

Deixemos a mecânica quântica de lado para podermos entrar em outro tópico central para este trabalho: o espaço-tempo. O conceito de espaço-tempo foi introduzido por Minkowski em 1908. O espaço-tempo é uma entidade absoluta, independente da escolha de referenciais. O conceito de espaço absoluto não é relevante para descrever a natureza. Por exemplo, quando alguém diz que esteve na escola onde se formou há três anos, essa pessoa considerou o deslocamento da Terra? Ou o deslocamento do Sistema Solar? Agora, a perspectiva muda se a mesma pessoa faz a afirmação anterior estando dentro da escola, dizendo simplesmente que esteve na escola há três anos.

Há uma relação entre a pessoa que fala e a superfície da Terra. O espaço deve ser compreendido em termos das relações estabelecidas por um corpo de referência. Em um corpo de referência, é possível marcar pontos e medir as distâncias entre eles utilizando barras métricas em contato direto com esses pontos. A medição de uma distância envolve a noção de tempo. Corpos de referência rígidos (não necessariamente corpos fisicamente

rígidos) são aqueles em que todas as medidas entre os pontos marcados permanecem independentes do tempo.

Considerando C_1 e C_2 como dois corpos de referência rígidos, a junção dos dois pode ser vista como um novo corpo de referência rígido, desde que C_1 esteja em repouso em relação a C_2 , pertencendo ao mesmo referencial rígido. Ao conjunto de pontos marcados em um referencial rígido damos o nome de espaço (associado ao referencial). Deste modo, não existe o **espaço único**, mas sim **espaços**, um para cada referencial.

Os referenciais inerciais são uma categoria específica de referenciais rígidos e podem ser definidos da seguinte forma: uma partícula pontual descreve, durante seu movimento, uma curva no referencial, chamada de trajetória da partícula. Essa curva pode se reduzir a um único ponto quando a partícula está em repouso no referencial. Partículas livres são aquelas isoladas de influências de outros corpos e, por isso, descrevem os movimentos mais simples.

Um referencial é inercial quando a trajetória de todas as partículas livres são linhas retas ou pontos. O tempo pode ser definido através das partículas livres, utilizando o movimento de uma partícula livre em um referencial inercial como um relógio padrão. Por exemplo, uma partícula livre pode percorrer $4m$ enquanto outra percorre $1m$, mantendo sempre a proporção das distâncias de $4 : 1$. Porém, ao definir o tempo dessa maneira, é necessária uma discussão sobre a simultaneidade.

Na física não relativística, dois eventos e_1 e e_2 podem ser simultâneos independentemente do referencial. Podemos verificar se a marcação do relógio padrão é simultânea com o evento e e atribuir essa marcação ao evento como seu tempo. Dessa forma, o tempo assume o perfil de uma entidade única e absoluta.

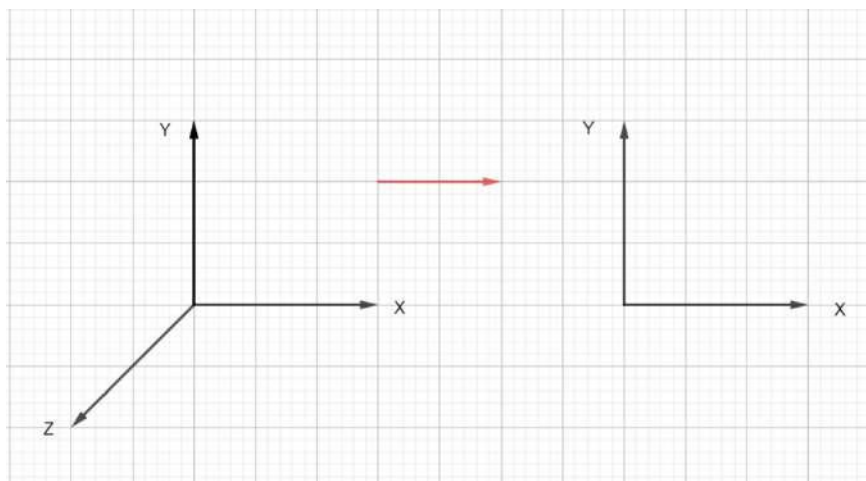
Na física não relativística, o espaço é um conceito relativo e depende da escolha de um referencial, enquanto o tempo é um conceito absoluto e independe dessa escolha. Já na física relativística, o tempo torna-se um conceito relativo, mas o espaço-tempo é absoluto e independe da escolha de um referencial.

O conceito de evento é análogo ao conceito de ponto. Um evento é um acontecimento que ocorre em uma região espacial tão pequena (podendo ser representada por um ponto) e com uma duração tão curta que pode ser considerado um instante. Um evento pode ser representado por quatro coordenadas:

$$e \rightarrow \{t, x, y, z\}. \quad (2.41)$$

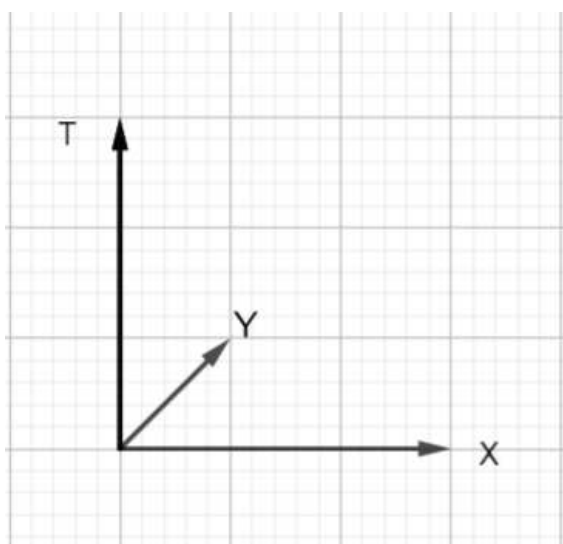
O espaço-tempo é quadridimensional, e sua representação pode ser feita por meio de projeções. Ou seja, assim como a projeção do espaço tridimensional no espaço bidimensional é realizada (figura 8), também pode ser feita a redução do espaço-tempo (figura 9).

Figura 8 – Projecção do espaço tridimensional no espaço bidimensional



Fonte: Elaboração Própria.

Figura 9 – Projecção do espaço-tempo

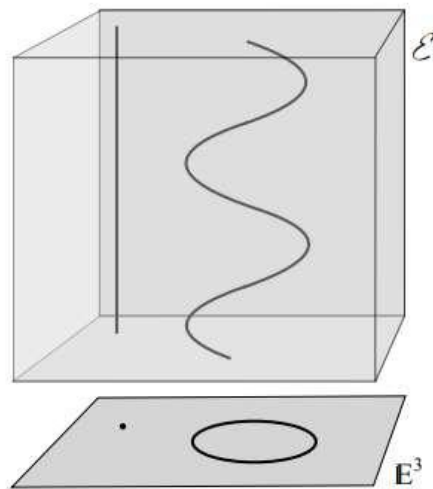


Fonte: Elaboração Própria.

Um objeto em movimento no espaço euclidiano descreve uma trajetória nesse espaço. A trajetória é definida como o conjunto de todos os pontos pelos quais o objeto passa em determinados instantes. De forma análoga, no espaço-tempo, essa situação é descrita pelas chamadas linhas de universo ou linhas-de-mundo: o conjunto de todos os eventos ocupados pelo objeto ao longo de sua história.

Uma trajetória espacial pode se resumir a um único ponto (no caso de um objeto em repouso no espaço); entretanto, no espaço-tempo, essa mesma situação corresponde a uma linha de universo que se estende ao longo do eixo temporal (ver figura 10).

Figura 10 – Representação de trajetórias no espaço e suas respectivas linhas de universo no espaço-tempo



Fonte: Vanzella (2020).

2.8 RELATIVIDADE RESTRITA: POSTULADOS E FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

A teoria da Relatividade restrita possui dois postulados:

I. As leis da física são as mesmas em todos os referenciais inerciais.

II. A velocidade da luz no vácuo sempre tem o mesmo valor c em qualquer referencial inercial.

Para esses postulados, a definição de tempo está associada à ideia de um relógio atômico, no qual um segundo é definido como a duração de 9.192.631.770 oscilações de um átomo de césio-133, livre de forças externas, durante a transição entre dois estados da estrutura hiperfina do nível fundamental. Essa definição é absoluta e válida em qualquer referencial, permitindo determinar a distância temporal de eventos.

Seja e_1 um evento no espaço-tempo e e_2 um evento posterior a e_1 em um determinado referencial. Podemos “enconstar” um relógio atômico nos eventos, de forma análoga a encostar um bastão métrico em dois pontos marcados no espaço de um referencial. O relógio deve passar pelos eventos e_1 e e_2 , de modo que sua linha de universo também passe por esses eventos. A linha de universo desse relógio corresponde à mesma linha de universo de uma partícula livre.

As transformações de Galileu abaixo

$$\begin{aligned} x' &= x - vt, \\ y' &= y, \\ z' &= z, \\ t' &= t. \end{aligned} \tag{2.42}$$

violam o primeiro postulado da relatividade restrita, pois a troca de velocidades entre referenciais distintos descrita em (2.42) implica que a velocidade da luz teria valores diferentes nos referenciais “linha” e “sem linha”. As equações de Maxwell também não são covariantes para transformações de Galileu.

As transformações de Lorentz foram introduzidas como substitutas:

$$\begin{aligned}x' &= \gamma(x - vt), \\y' &= y, \\z' &= z, \\t' &= \gamma\left(t - \frac{vx}{c^2}\right),\end{aligned}\tag{2.43}$$

onde o fator de Lorentz γ é dado por:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.\tag{2.44}$$

O fator $\frac{v}{c}$ pode ser definido como:

$$\beta = \frac{v}{c} < 1.\tag{2.45}$$

Assim a expressão (2.44) toma a forma

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} > 1.\tag{2.46}$$

Um invariante de Lorentz é aquela grandeza que assume o mesmo valor em qualquer referencial inercial, como a velocidade da luz. Ainda sobre os invariantes de Lorentz, consideremos o intervalo Δs entre dois eventos em um determinado referencial S :

$$(\Delta s)^2 = (\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2 - (c\Delta t)^2.\tag{2.47}$$

Δs é um invariante a translações e rotações no espaço, a translações no tempo e às transformações de Lorentz. De fato, vamos supor que o mesmo intervalo seja representado no referencial S' , que se move com velocidade v em movimento uniforme na direção x em relação ao referencial S . Já usando (2.43),

$$(\Delta s')^2 = (\Delta x - \beta c\Delta t)^2 + (\Delta y)^2 + \gamma^2(\Delta z)^2 - \gamma^2(c\Delta t - \beta\Delta x)^2,\tag{2.48}$$

ou:

$$(\Delta s')^2 = (\Delta z)^2 + (\Delta y)^2 + \gamma^2(1 - \beta)^2[\Delta x^2 - c^2\Delta t^2].\tag{2.49}$$

Da equação (2.46):

$$\gamma^2(1 - \beta)^2 = 1\tag{2.50}$$

Assim, a equação (2.49) assume a forma

$$(\Delta s')^2 = (\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2 - (c\Delta t)^2 = (\Delta s)^2. \quad (2.51)$$

Desta forma, temos o mesmo valor para $(\Delta s)^2$ em qualquer referencial inercial. Em geral, $(\Delta s)^2$ pode assumir três valores: positivo, negativo ou zero.

- $(\Delta s)^2 > 0$ Intervalo tipo-espaço
- $(\Delta s)^2 = 0$ Intervalo tipo-luz
- $(\Delta s)^2 < 0$ Intervalo tipo-tempo

No intervalo tipo-tempo, um par de eventos pode ser conectado por um sinal que viaja com uma velocidade v tal que $v < c$. No intervalo tipo-luz, um par de eventos pode ser conectado por um sinal viajando na velocidade da luz. No intervalo tipo-espaço, um par de eventos só pode estar conectado se existir uma velocidade v em que esse sinal viaje de modo que $v > c$. Mas, com as transformações de Lorentz, é possível obter um referencial em que este par de eventos seja simultâneo (ou seja, são espaçados espacialmente).

Esses conceitos de intervalos (tipo-espaço, tipo-tempo e tipo-luz) estão diretamente relacionados à discussão que será desencadeada na próxima seção, **inclusive por fornecerem a estrutura causal entre eventos no espaço-tempo**.

2.9 SIMULTANEIDADE RELATIVA E CAUSALIDADE

Vamos discutir a simultaneidade de Einstein

Simultaneidade de Einstein: Sejam a e b eventos que, em um referencial K , acontecem nos pontos A e B , respectivamente. Seja M o ponto que divide o segmento $\overline{AB}$ ao meio. Os eventos a e b são simultâneos relativamente ao referencial K se um pulso de luz emitido nos eventos a e b se encontrar em M .

Ambos os critérios de simultaneidade definem uma simultaneidade relativa a um referencial. Ou seja, em geral, dois eventos que são simultâneos em um referencial não são simultâneos em outro.

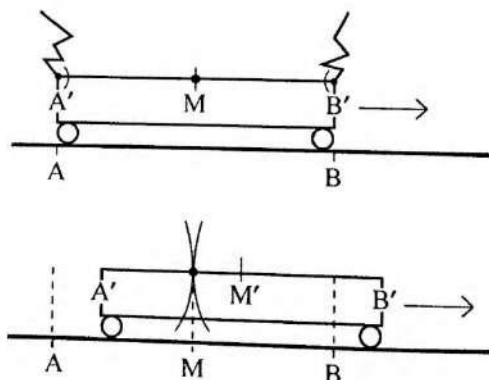
Vamos imaginar a seguinte situação: um trem que se move com uma alta velocidade v em relação à aos trilhos fixos na superfície da Terra, onde dois raios luminosos atingem o trem, um na parte dianteira e outro na parte traseira.

Um observador no referencial dos trilhos observa os raios encontrando-se no ponto médio do segmento $\overline{AB}$ (a metade do intervalo entre as posições A e B , marcadas nos trilhos). Para esse observador, os eventos causados pelos raios são simultâneos.

Sejam A' e B' os pontos onde os raios atingem o trem no referencial do trem. Para um observador no referencial do trem, o encontro dos pulsos luminosos não ocorre no

ponto médio, o que o faz julgar que esses eventos não são simultâneos. A figura 11 ilustra a situação abordada. Para trabalharmos o conceito de causalidade, vamos nos apoiar no

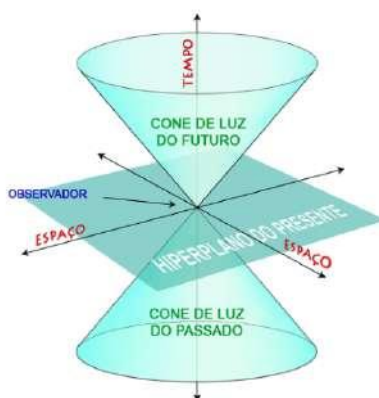
Figura 11 – Representação do trem e dos raios luminosos pelo referencial dos trilhos e do referencial do trem



Fonte: Lesche (2005, p.38).

Diagrama de Minkowski. Na figura 12, há um diagrama de Minkowski onde os eixos x e y são representados por um único eixo ρ , onde $\rho^2 = x^2 + y^2$. Os cones de luz são definidos por $\rho^2 + z^2 = c^2 t^2$ e O é um evento que ocupa a origem.

Figura 12 – Diagrama de Minkowski



Fonte: Wikimedia Commons (2025)

Seja O e e_L um evento na superfície do cone de luz; o intervalo entre esses eventos é do tipo-luz, ou seja, ambos os eventos só podem ser conectados por um sinal luminoso que se move com $v = c$.

Seja O e e_E um evento fora do cone de luz; o intervalo entre esses eventos é do tipo-espaco, ou seja, ambos os eventos só podem ser conectados por um sinal luminoso que se move com $v > c$ ou por um referencial em que o par é distante espacialmente, sendo simultâneos.

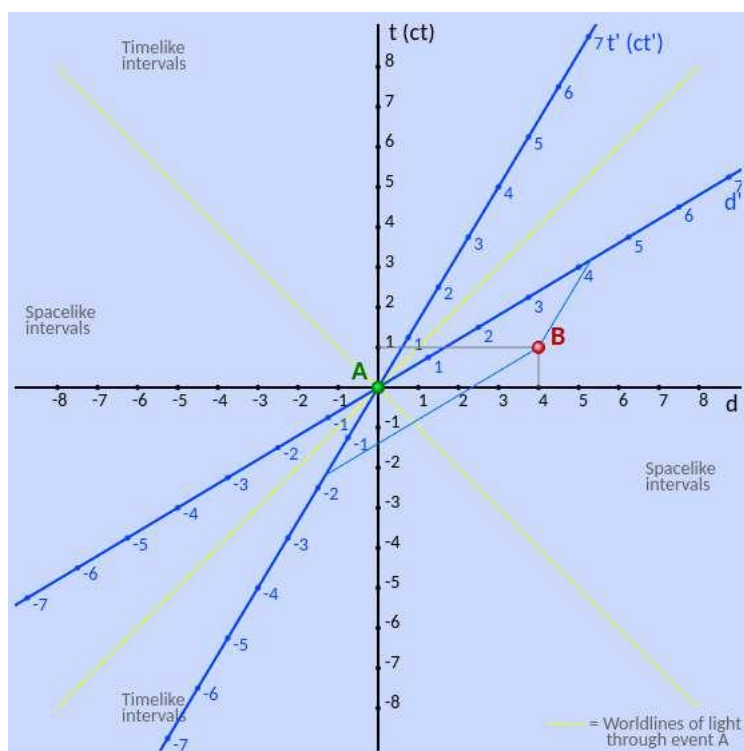
Seja O e e_T um evento dentro do cone de luz; o intervalo entre esses eventos é do tipo-tempo, ou seja, ambos os eventos só podem ser conectados por um sinal (por exemplo, um som) que se move com $v < c$.

As situações acima estão indicadas na figura 12.

Dentro do cone $v < c$, acima de O está o seu ‘futuro’ e abaixo de O está o seu ‘passado’. A ideia de causalidade vem da seguinte questão: dentro dos cones, eventos abaixo de O (passado) acontecem sempre antes dos eventos acima de O (futuro), numa relação de causa e efeito, ou seja, eventos no passado são a única causa possível para eventos futuros. Claramente esta ordem não pode ser invertida.

Consideremos agora o par A e B de eventos do tipo espaço, como indicado na figura 13. Suponhamos que A fosse a causa de B , desde que eles fossem conectados por um sinal superlumínico, isto é, que viaje de A até B com velocidade maior do que c . Neste, no referencial S' , que se desloca em relação a S , a coordenada temporal do evento B é anterior ao do evento A . Ao admitirmos a existência de sinais com velocidades mais altas do que c , gerariamos situações absurdas como esta.

Figura 13 – Exemplo de eventos que, se fossem conectados por um sinal superlumínico, quebrariam causalidade.



Fonte: Captura de tela do simulador de diagramas espaço-tempo de Minkowski. Disponível em: <http://www.trell.org/div/minkowski.html>. Evensen (2002).

Duas situações hipotéticas e análogas à quebra de causalidade citada acima são as seguintes:

- Um filho nascer antes da sua mãe;
- Uma televisão ser ligada antes de o controle remoto ser acionado.

Com este comentário, concluimos esta seção sobre relatividade restrita, completando os assuntos de interesse para a sequência didática.

3 REFERENCIAL TEÓRICO-METODOLÓGICO

Neste capítulo, discutiremos as bases teóricas e metodológicas que dão suporte a este trabalho. Nas seções que o compõem, abordaremos Jean Piaget, com um breve resumo de sua biografia e a revisão de alguns conceitos de sua teoria, realizando a conexão desses conceitos com o ensino e a aprendizagem de ciências, em particular física. Em seguida, trataremos das bases metodológicas, que são o POE e a Instrução entre Pares, realizando, de forma sistemática, a articulação dos conceitos dessas metodologias.

3.1 PIAGET: BIOGRAFIA E OBRA

Jean Piaget (1896–1980) nasceu em Neuchâtel, na Suíça. Desde muito jovem, demonstrou grande interesse pela vida acadêmica, tendo publicado seu primeiro artigo científico aos 11 anos de idade. Inicialmente, dedicou-se aos estudos nas áreas da Biologia e da Filosofia. Formou-se em Ciências Naturais e, posteriormente, voltou-se para as áreas da Psicologia e da Psiquiatria.

Foi professor em diversas universidades suíças, membro de inúmeras instituições científicas e recebeu o título de doutor *honoris causa* por mais de 30 universidades, dentre as quais se destaca a Universidade Federal do Rio de Janeiro (antiga Universidade do Brasil). Recebeu importantes honrarias, como o Prêmio Erasmo e a medalha da Universidade de Moscou. Atuou como subdiretor-geral da UNESCO e foi responsável pelo Departamento de Educação da Suíça.

Piaget escreveu uma vasta obra, composta por inúmeros livros e artigos, muitos dos quais publicados no Brasil. Dentre os principais títulos traduzidos e amplamente utilizados em pesquisas na área da Psicologia e da Educação, destacam-se: *Seis Estudos de Psicologia*, *A Construção do Real na Criança*, *A Epistemologia Genética*, *O Desenvolvimento da Noção de Tempo na Criança*, *Da Lógica da Criança à Lógica do Adolescente* e *A Equilibração das Estruturas Cognitivas*.

Um dado curioso é que parte significativa de sua teoria do desenvolvimento cognitivo foi elaborada com base em observações do comportamento de suas filhas durante a primeira infância.

Jean Piaget faleceu em Genebra, em 1980. Seu legado permanece como referência nas áreas da Psicologia e da Educação, com seus trabalhos sendo amplamente utilizados como base teórica em trabalhos acadêmicos e pesquisas em todo o mundo.

3.2 PIAGET: PERÍODOS DO DESENVOLVIMENTO COGNITIVO, ASSIMILAÇÃO, ACOMODAÇÃO E EQUILIBRAÇÃO

Piaget é um dos pioneiros da perspectiva construtivista relacionada ao desenvolvimento cognitivo. Destacam-se também outros teóricos construtivistas, como Bruner, Vygotsky e Ausubel. Segundo Moreira (1999), é comum haver confusão entre o construtivismo e a teoria de Piaget.

De acordo com El-Hani e Bizzo (2002):

"[...] uma análise mais aprofundada do ‘construtivismo’ traz à tona a percepção de que esse termo não designa uma tendência unificada de pensamento sobre a aprendizagem, ocultando uma variedade de abordagens e visões diferenciadas que frequentemente é obscurecida pela mera referência àquele rótulo (El-Hani; Bizzo, 2002, p. 41).

Dentro dessa abordagem, segundo Castañon (2015), o construtivismo piagetiano manifesta-se por meio da visão de Piaget acerca do conhecimento. Para o autor suíço, a construção do conhecimento exige a interação entre o sujeito que conhece e o objeto conhecido. É por meio da ação que o sujeito constrói suas representações de mundo, interagindo com o objeto.

A teoria piagetiana apresenta elementos centrais, como os estágios do desenvolvimento cognitivo e os conceitos de assimilação, acomodação e equilíbrio.

Os períodos do desenvolvimento cognitivo (figura 14) são os seguintes: sensório-motor, pré-operacional (ou simbólico), operacional concreto (ou operatório concreto) e operacional formal (ou operatório abstrato). As nomenclaturas apresentam ligeiras variações, como é possível observar nos trabalhos de Moreira (1999) e De Oliveira Lima (1999). Para a descrição dessas etapas, apoiaremos-nos em Moreira (1999) e em Piaget (2013).

O período sensório-motor (do nascimento até aproximadamente 2 anos de idade) é caracterizado por um egocentrismo fundamental da criança, decorrente do fator de referência. Nesse estágio, a única referência comum e total para a criança é o próprio corpo; assim, ela não distingue entre o “eu” e o meio externo. Os objetos existem em função da criança.

A criança é capaz de manipular objetos para satisfazer sua fome ou curiosidade, bem como imitar comportamentos de adultos. Também demonstra a capacidade de responder a objetos que não estão diretamente visíveis — ou seja, os objetos passam a integrar uma realidade mental para além da realidade física. Um exemplo disso é quando a criança chora ao ouvir o latido de um cachorro na casa vizinha.

À medida que sua cognição se desenvolve, a criança gradualmente descentraliza suas ações, deixando de se perceber como o centro das experiências e passando a reconhecer-se

Figura 14 – Estágios do desenvolvimento cognitivo



Fonte: De Oliveira Lima (1999, p.11).

como parte de um meio que inclui outros objetos e sujeitos.

No período pré-operacional, ou simbólico (dos 2 aos 7 anos), ocorre a inserção do uso da linguagem, de símbolos e de imagens. De acordo com Piaget (2013) “[...] é importante constatar que, na criança, a aquisição da linguagem – portanto, do sistema dos signos coletivos – coincide com a formação do símbolo, ou seja, do sistema dos significantes individuais.”

De acordo com Tassinari (2016) e Piaget (2013), símbolos e signos são significantes (ou seja, utilizados para designar um significado). Um símbolo possui um vínculo de semelhança com o significado, enquanto o signo apoia-se necessariamente em uma

convenção. O símbolo pode ser elaborado pelo indivíduo de forma autônoma, enquanto o signo necessita da vida social para ser constituído.

Para exemplificar, uma criança, ao brincar, pode tratar um pedaço de pau como se fosse uma espada. O pedaço de pau é um símbolo de uma espada real, elaborado por meio da imaginação da criança. Por outro lado, ao ver uma imagem de uma espada em um livro, a mesma criança pode exclamar: “Veja, uma espada!”. Neste caso, a palavra é um signo (aprendido socialmente por meio da linguagem) utilizado para representar a espada.

O pensamento da criança, nesse estágio, ainda não é reversível — ou seja, ela não consegue percorrer cognitivamente um caminho e, em seguida, refazê-lo em sentido inverso. É comum que as crianças apresentem contradições em seu raciocínio, mantendo ainda uma visão egocêntrica da realidade, a qual é interpretada com base em suas próprias experiências. Elementos mais chamativos ou perceptíveis tendem a influenciar sua percepção e as conclusões que tira sobre os acontecimentos.

Um exemplo típico desse período é a situação em que a mesma quantidade de água é transferida de um copo alto e fino para outro mais baixo e largo. Nesses casos, é comum que a criança conclua que há mais água no copo mais alto, baseando-se em aspectos chamativos ou perceptíveis como a altura, sem compreender ainda a conservação de volume.

Segundo Piaget (2013):

“Assim, pode-se dizer também que a intuição permanece, por um lado, fenomenista por imitar os contornos do real sem corrigi-los e, por outro, egocêntrica, por estar centrada constantemente em função da ação do momento: falta-lhe, por isso, o equilíbrio entre a assimilação das coisas aos esquemas do pensamento e a acomodação destes à realidade.” (Piaget, 2013, p.180).

Esse exemplo ilustra a ausência de noção de transitividade — como na relação ($A < D$, a partir de $A < B$ e $B < D$) —, bem como a falta de compreensão das noções de conservação. A criança ainda não entende que determinadas propriedades, como a quantidade de líquido, permanecem inalteradas independentemente de transformações na altura ou a largura dos recipientes.

O período operacional concreto, ou operatório concreto (dos 7 aos 12 anos), marca uma progressiva descentralização da visão egocêntrica observada nas fases anteriores. A criança passa a apresentar um pensamento mais organizado, com equilíbrio entre reversibilidade — por exemplo, se $A = B$, então, se A está à esquerda de B , B está à direita de A — e noção de negação — como na relação $A - A = 0$.

Apesar dos avanços, o pensamento ainda é limitado. Embora o egocentrismo não seja mais a base de suas explicações, a criança ainda depende de objetos e acontecimentos concretos para compreender ou antecipar situações ausentes, o que revela uma dificuldade em operar com hipóteses abstratas.

O período operacional formal, ou operatório abstrato (dos 12 anos em diante), inicia-se na adolescência e pode se estender até a vida adulta. Nessa fase, o indivíduo não necessita mais recorrer ao concreto para elaborar explicações, sendo capaz de formular hipóteses verbais e operar mentalmente a partir delas. O adolescente consegue deduzir os resultados de operações concretas por meio de proposições e continuar o raciocínio em nível abstrato.

“O adolescente, por oposição à criança, é um indivíduo que reflete fora do presente e elabora teorias sobre todas as coisas, comprazendo-se em particular nas considerações inatuais. Pelo contrário, a criança limita-se a refletir no decorrer da ação e não elabora teorias, mesmo que o observador, tendo anotado o retorno periódico de reações análogas, seja capaz de discernir uma sistematização espontânea em suas ideias.” (Piaget, 2013, p.192).

Nesse estágio, a realidade passa a ser subordinada ao possível, permitindo ao indivíduo manipular construtos mentais e identificar relações entre eles. A dedução lógica torna-se uma ferramenta cognitiva central na interpretação de fatos e fenômenos.

É importante destacar que, embora os períodos do desenvolvimento cognitivo sejam descritos com base em faixas etárias, sua transição não ocorre de forma abrupta. Cada indivíduo apresenta um ritmo próprio de desenvolvimento, com características específicas. Isso significa, por exemplo, que uma criança de quatro anos pode ainda apresentar traços do estágio sensório-motor, enquanto um adolescente de quinze anos pode demonstrar dificuldades em lidar com hipóteses abstratas, típicas do período operacional formal.

Feita a apresentação dos estágios do desenvolvimento cognitivo, passamos agora à discussão dos conceitos de assimilação, acomodação e equilíbrio.

Segundo Moreira (1999), Piaget compreende o crescimento cognitivo da criança por meio dos processos de assimilação e acomodação. O indivíduo possui um organismo (a mente), constituído por estruturas que, ao receberem estímulos do meio, respondem com base nessas estruturas.

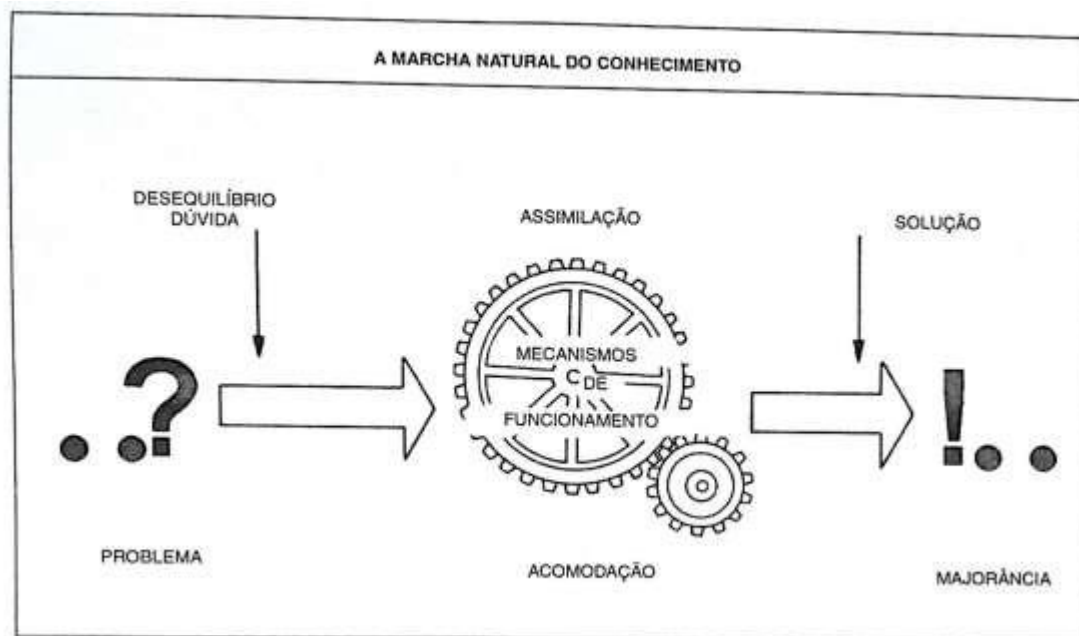
No processo de assimilação, o indivíduo constrói esquemas para abordar a realidade, internalizando elementos do meio exterior (Ferracioli, 1999). Nesse processo, o organismo não se modifica. A modificação ocorre quando os esquemas existentes não são capazes de assimilar determinadas situações, provocando um estado de desequilíbrio.

Diante de uma situação de desequilíbrio, o indivíduo busca uma forma de equilibrar ou reequilibrar seu funcionamento cognitivo por meio da acomodação. A acomodação é a etapa em que ocorre a modificação dos esquemas de assimilação, gerando assim uma mudança nas estruturas cognitivas e o surgimento de novos esquemas. Os esquemas anteriores não são descartados, mas modificados.

O desenvolvimento cognitivo ocorre, portanto, por meio de um processo em que os esquemas de assimilação não são capazes de responder adequadamente a determinadas

situações do meio, surgindo um desequilíbrio, que leva à acomodação e, conseqüentemente, a uma reorganização da estrutura cognitiva, gerando um novo equilíbrio — ou majorância (figura 15).

Figura 15 – O desenvolvimento cognitivo através da assimilação, acomodação e equilibração



Fonte: De Oliveira Lima (1999, p.29).

De acordo com Moreira (1999)

“Não há acomodação sem assimilação, pois acomodação é reestruturação da assimilação. O equilíbrio entre assimilação e acomodação é a adaptação à situação. Experiências acomodadas dão origem, posteriormente, a novos esquemas de assimilação e um novo estado de equilíbrio é atingido. Novas experiências, não assimiláveis, levarão a novas acomodações e a novos equilíbrios (adaptações) cognitivos.” (Moreira, 1999, p.100).

Uma teoria pode ser entendida como um esquema de assimilação (quando o indivíduo já possui um grau elevado de desenvolvimento cognitivo), sustentado por uma série de esquemas anteriores, bem como pelos processos de desequilíbrio e reequilíbrio vivenciados. A estrutura cognitiva de um indivíduo pode ser compreendida como um complexo de esquemas de assimilação organizados em rede (Moreira, 1999).

3.3 IMPLICAÇÕES DA TEORIA PIAGETIANA NA APRENDIZAGEM

Piaget não foi educador nem pedagogo; sua teoria concentra-se no desenvolvimento cognitivo de crianças e adolescentes. Embora não tenha sido elaborada com foco direto nos processos de ensino e aprendizagem, seus conceitos foram amplamente interpretados e discutidos sob a perspectiva educacional. É inegável a influência de suas obras no

campo do Ensino, sendo frequentemente utilizadas como base para reflexões e práticas pedagógicas.

Segundo Moreira (1999), Piaget não enfatiza diretamente o termo “aprendizagem”, mas sim o conceito de “aumento de conhecimento”. Para Piaget, esse aumento de conhecimento ocorre apenas quando um esquema de assimilação é modificado por meio do processo de acomodação. Em outras palavras, a aprendizagem só acontece quando o sujeito é levado a reorganizar seus esquemas mentais diante de novas informações que não podem ser plenamente assimiladas pelos esquemas já existentes.

De Oliveira Lima (1999) aponta o seguinte:

“Para J. Piaget, educar é provocar a atividade (motora, verbal e mental). E a atividade é, por natureza, criadora, tanto do ponto de vista vivencial quanto do ponto de vista tecnológico e político (democracia). Educar é estimular a capacidade de transformação (De Oliveira Lima, 1999, p.27).

É possível perceber a importância do aspecto social no processo de educar. Quando se considera a linguagem como um signo coletivo — adquirida durante o período pré-operacional — observa-se que o social se manifesta de maneira significativa na forma como esse signo é internalizado. Esse processo ocorre, em grande parte, por meio das interações da criança com seus familiares, sendo essas relações fundamentais para o desenvolvimento das primeiras palavras e expressões linguísticas.

Afinal, esse signo — como a língua portuguesa, por exemplo — é introduzido à criança antes mesmo de qualquer experiência escolar formal, por meio do convívio e das interações com seus familiares, especialmente os pais. A interação social, portanto, exerce papel fundamental não apenas nas fases iniciais do desenvolvimento cognitivo, mas também ao longo dos demais estágios, particularmente aqueles associados à escolarização. Em outras palavras, a interação social é um elemento essencial tanto para o desenvolvimento da atividade quanto para a construção da aprendizagem da criança.

No processo de equilíbrio, o comportamento (ou atividade) é constituído a partir de interações tanto socioculturais quanto com o meio físico (Moreira, 1999). Exemplos desse processo incluem o desenvolvimento da linguagem, a internalização de costumes familiares, a aquisição de habilidades manuais — como as relacionadas à confecção de objetos —, bem como a incorporação de crenças e outros hábitos culturais. Tais elementos são assimilados por meio das vivências no seio familiar, na vizinhança, no bairro, na cidade, no estado e até mesmo no país, revelando a importância do contexto sociocultural na constituição do sujeito.

Ensinar, segundo Moreira (1999) e De Oliveira Lima (1999), consiste em provocar desequilíbrios no organismo (mente) de modo que esse organismo seja levado a buscar novas formas de reequilíbrio, resultando na construção de esquemas de assimilação mais complexos. Nessa perspectiva, o ensino deve oferecer à criança situações que gerem

desequilíbrios cognitivos, incentivando a reorganização mental necessária para alcançar um novo estado de equilíbrio.

Assim, é possível inferir que o papel do educador é o de agente mediador, responsável por propiciar situações que provoquem desequilíbrios cognitivos nos discentes. Nessa perspectiva, qualquer conteúdo pode ser apresentado, desde que se respeitem os níveis de desenvolvimento cognitivo da criança, de modo a favorecer a construção ativa do conhecimento por meio da reestruturação de seus esquemas mentais.

“O professor não pode simplesmente usar seus esquemas de assimilação e ignorar os do aluno. Ensino reversível não significa eliminar o desequilíbrio, e sim, passar de um estado de equilíbrio para outro por meio de uma sucessão de estados de equilíbrio muito próximos, tal como em uma transformação termodinâmica reversível” (Moreira, 1999, p.104).

Um dos conceitos relacionados à etapa de desequilíbrio é o de conflito cognitivo. Embora o termo ‘conflito cognitivo’ não tenha sido utilizado diretamente por Piaget, ele foi desenvolvido por outros teóricos construtivistas. No entanto, o núcleo dessa ideia está presente nas concepções piagetianas sobre o desenvolvimento cognitivo.

“Todo esquema de assimilação se vê obrigado a acomodar-se aos elementos que assimila, ou seja, a modificar-se em função de suas particularidades, mas sem perder por isso sua continuidade (e, portanto, seu fechamento enquanto ciclo de processos interdependentes), nem seus poderes anteriores de assimilação” (Piaget, 1978, p.9).

As etapas de assimilação e acomodação dependem do desequilíbrio, que funciona como a ponta de lança (figura 15) do desenvolvimento cognitivo.

“[...] É evidente que, sob uma perspectiva de equilibração, uma das fontes de progresso no desenvolvimento dos conhecimentos deve ser buscada nos desequilíbrios como tais, que por si só obrigam um sujeito a superar seu estado atual e a buscar algo em novas direções” (Piaget, 1978, p.14).

Segundo Piaget (1978), o desequilíbrio pode ter origem interna, decorrente da ação do sujeito, ou externa, por meio de situações históricas ou sociais. Na figura 16, o desequilíbrio externo é ilustrado por meio de uma situação onde uma criança que sempre viu cachorros pequenos encontra-se com um cachorro gigante. O cachorro gigante não se enquadra no esquema mental que esta criança tem de ‘cachorro’.

O desequilíbrio interno, por sua vez, é representado pelo conflito vivido por uma criança que aprendeu que multiplicar significa “aumentar” e, ao se deparar com uma multiplicação envolvendo frações, percebe que o resultado pode ser menor, gerando dúvida e confusão dentro de seu próprio esquema de conhecimento.

Figura 16 – Tipos de desequilíbrio cognitivo: externo e interno



Fonte: Ilustração gerada com auxílio do ChatGPT (OpenAI), a partir de descrição textual fornecida pelo autor. OpenAI (2025).

O desequilíbrio, segundo Da Silva (2012), produz a motivação necessária para que o indivíduo retome o estado de equilíbrio.

De acordo com Pansera *et al.* (2016), existem diferentes definições para o conceito de motivação. Uma delas a descreve como algo subjetivo e intrínseco ao sujeito.

Existe também a chamada motivação extrínseca que, conforme apresentado no trabalho de Pansera *et al.* (2016), está relacionada a fatores externos que podem atuar como alavancas, como, por exemplo, uma premiação, uma punição ou um aumento salarial.

Nesse contexto, a motivação extrínseca é melhor compreendida como um estímulo externo, e não necessariamente como a motivação em si. Ou seja, a motivação é algo intrínseco e pessoal, embora elementos externos possam funcionar como estímulos para que o indivíduo se motive.

Assim, no contexto do que é apresentado por Da Silva (2012) sobre o desequilíbrio, não são os conflitos cognitivos que motivam diretamente o sujeito ao equilíbrio. Na verdade, os conflitos cognitivos — sejam internos ou externos — funcionam como estímulos que podem levar o sujeito a buscar a motivação necessária para restabelecer o equilíbrio.

Alguns parágrafos atrás, discutimos que o papel do educador é o de agente mediador, responsável por propiciar situações que provoquem desequilíbrios cognitivos nos discentes. Sendo assim, ao se falar em promover situações desequilibrantes, referimo-nos àquelas que geram conflitos cognitivos nos estudantes.

Devemos considerar também o que é tratado por Piaget, no sentido de que nem todo desequilíbrio gera uma equilibração majorante. Ou seja, uma situação de conflito não necessariamente levará o estudante à reorganização de suas estruturas cognitivas diante

do problema proposto, sendo necessárias outras situações de equilíbrio até que se atinja a equibração majorante.

Em essência, uma simples pergunta pode ser suficiente para provocar um conflito cognitivo, seja ela feita pelo professor ou mesmo por um colega. Por exemplo, um estudante que aprendeu que uma velocidade positiva indica maior rapidez pode se deparar com uma situação em que um carro, apesar de ter velocidade positiva, se move cada vez mais devagar.

De acordo com Da Silva (2012), a motivação é um dos pontos centrais na questão do conflito cognitivo, de forma que esse tipo de conflito pode tanto estimular quanto prejudicar a motivação do estudante.

Um conflito cognitivo pode ser considerado interessante e desafiador ou totalmente desinteressante, dependendo do aluno. No contexto de uma sala de aula, onde coexistem diversos indivíduos com interesses e motivações distintos, propor um conflito cognitivo sobre o conceito de forças, utilizando blocos e roldanas, pode ser empolgante para alguns e entediante para outros.

Ademais, a postura do professor diante dessa questão também deve ser considerada. Em uma perspectiva na qual o docente é a figura ativa e os estudantes são passivos, nem todo conflito cognitivo proposto (e a forma como é proposto) terá o impacto desejado. Uma aula expositiva pode ser interessante para metade da turma, assim como uma atividade com um recurso digital (como um simulador) pode agradar apenas parte dos alunos.

Mortimer (1996) aponta que, na literatura, diversos autores destacam que os trabalhos de Piaget não atribuem a devida importância às concepções alternativas dos estudantes. Já de acordo com Moreira (1999), para Piaget, a construção do conhecimento deve estar acompanhada da ação dos estudantes, a qual deve estar integrada às argumentações do docente. Sem essa integração, tais ações não possuem o “poder” de produzir conhecimento.

As concepções espontâneas dos estudantes, assim como o erro, são elementos importantes no processo de aprendizagem, podendo inclusive servir como ponto de partida para a geração de um conflito cognitivo. Dessa forma, consideramos fundamental que as concepções alternativas recebam a devida atenção por parte do docente, pois representam engrenagens que podem impulsionar o movimento da construção do conhecimento.

No caso do que é tratado por Piaget, apesar de sua ênfase em uma perspectiva ativa, centrada nas ações dos estudantes, também se observa a ideia de que a produção do conhecimento não ocorre sem a intervenção do docente. Isso pode ser interpretado, em certa medida, como uma visão alinhada a práticas do chamado ensino tradicional, que frequentemente apresenta uma característica passiva por parte dos discentes, resultando, em geral, em insatisfação e em um baixo nível de motivação.

Retomando o que foi discutido sobre o papel do educador no contexto do conflito cognitivo, pode-se inferir que cabe ao docente apresentar o problema de forma que o estudante atue como parte ativa do processo. Sabe-se que uma turma é composta por indivíduos com diferentes características, repertórios e histórias, mas, ao conhecer bem sua turma, o professor deve promover estratégias que assegurem a participação ativa dos estudantes. A perspectiva do estudante como agente ativo no processo de ensino-aprendizagem é amplamente discutida na literatura, sendo apontado que a motivação e o engajamento tendem a ser maiores nesse modelo do que em abordagens centradas na passividade discente.

Além disso, é fundamental que as concepções alternativas dos estudantes sejam consideradas, pois elas podem funcionar como ponto de partida para novos conflitos cognitivos e contribuir significativamente para o processo de equilíbrio majorante.

Mortimer (1996) destaca ainda outro aspecto relevante: as lacunas no processo de equilíbrio. Para o autor, essas lacunas são tão importantes quanto os próprios conflitos. Elas podem ser compreendidas como a ausência de uma informação ou conhecimento necessário para interpretar determinado fenômeno ou resultado.

As lacunas também se configuram como formas de desequilíbrio. Por exemplo, um estudante que nunca foi exposto aos conceitos de propagação do calor e é confrontado com o funcionamento de um ar-condicionado não vivenciará, necessariamente, um conflito cognitivo, pois não possui concepções prévias sobre os processos físicos envolvidos. Nesse caso, a ausência de uma base conceitual impede a construção de um confronto entre ideias, o que caracteriza uma lacuna.

Essas lacunas são relevantes porque revelam ao professor não apenas a presença de concepções alternativas ou de esquemas cognitivos não majorantes, mas também a falta de conhecimento em determinados campos conceituais. Dessa forma, tornam-se necessárias estratégias didáticas voltadas ao preenchimento dessas lacunas, como atividades introdutórias, experimentações ou explicações conceituais estruturadas. Só então, a partir desse alicerce, será possível gerar conflitos cognitivos significativos que, de fato, favoreçam a equilíbrio majorante.

3.4 POE: UMA BREVE REVISÃO DO PREDIZER, OBSERVAR E EXPLICAR

Nesta seção e na próxima, trataremos da discussão de duas metodologias ativas: Predizer, Observar e Explicar e Instrução entre Pares, respectivamente.

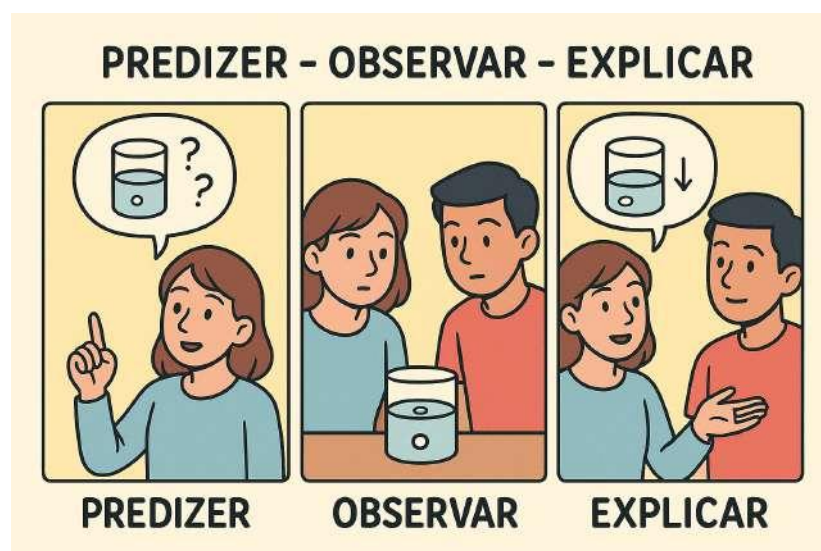
O uso de metodologias ativas é relevante para o ensino como um todo — seja em Ciências, Linguagens, Matemática ou demais áreas. Na literatura (Diesel; Baldez; Martins, 2017; Lovato; Michelotti; Da Silva Loreto, 2018; Morán, 2015) destaca-se a necessidade de se colocar o estudante como figura central no processo de ensino-aprendizagem, buscando

um rompimento com o chamado ensino tradicional. Nesse sentido, este trabalho também se apoia nesse consenso acadêmico.

Vejamos, nesta seção, uma breve abordagem sobre a metodologia Predizer, Observar e Explicar.

O Predizer, Observar, Explicar (POE) é uma metodologia ativa decorrente do trabalho de White e Gunstone (2014), que consiste em três etapas (figura 17): no primeiro momento, os alunos precisam predizer o resultado de determinado evento, experimento ou fenômeno; no segundo, descrevem o que observam acontecendo; e, por fim, realizam uma explicação sobre a situação, de modo a reconciliar as informações previstas com o que de fato foi observado.

Figura 17 – Etapas do POE



Fonte: Ilustração gerada com auxílio do ChatGPT (OpenAI), a partir de descrição textual fornecida pelo autor. OpenAI (2025).

A etapa de predição-observação possui uma base construtivista-piagetiana (Olimpio; De Medeiros, 2024), presente na perspectiva ativa do estudante e no possível conflito cognitivo gerado entre as fases de predição e observação.

“A metodologia POE é ancorada em duas características principais. A primeira é promover a eliciação das ideias prévias dos aprendizes, isto é, proporcionar situações e mecanismos que estimulem o aluno a expressar as suas concepções debatendo-as com os colegas de grupo e depois apresentá-las de forma organizada, por escrito. A segunda é possibilitar uma aprendizagem ativa, isto é transferir o foco da aula do professor que descreve e explica fenômenos, geralmente abstratos, para os próprios alunos que se tornam protagonistas do processo de aprendizagem” (Santos; Sasaki, 2015, p.2).

De acordo com White e Gunstone (2014), os materiais didáticos frequentemente apresentam perguntas do tipo: “Explique por que, ao soltarmos duas bolas de pesos

diferentes de uma mesma altura, elas parecem chegar ao chão ao mesmo tempo.” Para esses autores, quando o questionamento é formulado dessa maneira, o estudante já recebe o resultado do fenômeno e precisa apenas explicar um fenômeno completamente descrito.

Esse tipo de questionamento gera pouca reflexão, especialmente em situações onde é possível realizar o experimento. Antes de soltar as bolas, pode-se perguntar ao estudante: “O que acontece quando essas duas bolas são soltas dessa altura?” Essa pergunta permite que o aluno reflita, raciocine e utilize seus conhecimentos para formular uma resposta. Além disso, com o apoio da questão visual, o estudante tem mais chances de avaliar o fenômeno físico do que apenas com a descrição oral apresentada anteriormente.

Na etapa da predição, o estudante decide qual raciocínio ou conhecimento deve utilizar como base. É importante que, nesse momento, o aluno justifique suas previsões. White e Gunstone (2014) comparam a ausência de justificativas nas predições ao ato de construir mapas conceituais sem realizar as devidas conexões entre os conceitos, o que evidencia a necessidade de traçar uma linha conceitual clara. Segundo os autores, realizar previsões sem justificá-las pode representar perdas significativas no processo de aprendizagem.

Nessa etapa, cabe ao professor promover uma situação cognitivamente conflitante, seja por meio de uma situação-problema ou de uma questão norteadora. Segundo Da Rosa e De Pinho Alves Filho (2008), são atividades que primam pela interação entre o aprendiz e o objeto do conhecimento, permitindo que o estudante reflita e formule hipóteses. É fundamental que os alunos levantem suas próprias hipóteses, com o mínimo de interferência possível do docente, que, em essência, assume o papel de mediador.

Quanto à etapa de observação, os alunos podem realizar o experimento proposto na fase de predição — ou, dependendo do caso, o professor pode realizá-lo — e observar os fenômenos que ocorrem.

De acordo com White e Gunstone (2014), é importante que, nesta etapa, os estudantes descrevam o que está sendo observado. Em alguns estudos, essa descrição é feita por meio de anotações e desenhos (Schwahn; Oiagen, 2008) e também por meio de glossários (Olimpio; De Medeiros, 2024). No trabalho de Da Rosa e De Pinho Alves Filho (2008), observa-se ainda a possibilidade de realizar essa descrição por meio de discussões em pequenos grupos:

“Outra característica que se faz presente neste momento é saber compartilhar com os colegas o que foi observado, saber ouvir, discutir, expor suas idéias e aceitar a dos outros. O trabalho em equipe é o espaço no qual cada membro é instigado a trazer suas contribuições pessoais e assim elaborar um resultado compartilhado” (Da Rosa; De Pinho Alves Filho, 2008, p.7).

Na etapa de observação, espera-se o surgimento do conflito cognitivo, pois os alunos podem ter seus conceitos confrontados pelo experimento.

Na fase de explicação, o aluno contribui para a resolução do problema, confirmando ou refutando sua hipótese inicial. Dentro de um grupo, cada estudante traz sua contribuição. Assim, conforme abordado por De Oliveira (2003), é fundamental que o professor esteja ciente do seu papel como mediador, conduzindo os estudantes, a partir das informações levantadas por eles mesmos, à explicação do fenômeno.

Apesar de o termo “experimento” ter sido mencionado anteriormente, o POE pode ser adaptado para simulações e vídeos (Santos; Sasaki, 2015) e/ou para eventos que não podem ser observados diretamente (White; Gunstone, 2014).

White e Gunstone (2014) destacam a relevância do envolvimento adequado dos estudantes, enfatizando que a etapa de discussão — decorrente do conflito cognitivo — é uma das mais importantes nesse processo. Segundo os autores, uma observação controversa (contrária à previsão) pode gerar efeitos positivos para a aprendizagem, desde que ocorra uma discussão genuína, e não apenas um consenso sem debate. Cabe ao docente conduzir esse processo.

Por fim, elencamos algumas das características presentes nas etapas do POE, descritas nos trabalhos citados ao longo da seção que podem contribuir significativamente para o processo de ensino-aprendizagem:

- participação ativa dos estudantes no desenvolvimento das atividades;
- levantamento de hipóteses e formulação de previsões com base em seus conhecimentos;
- valorização e mobilização dos conhecimentos prévios dos alunos;
- trabalho colaborativo, incentivando a cooperação entre os pares;
- discussão de ideias entre grupos, promovendo a troca de diferentes pontos de vista;
- papel do professor como mediador do conhecimento e facilitador do diálogo;
- estímulo ao pensamento crítico e reflexivo por meio da comparação entre previsões e observações;
- promoção da argumentação científica, incentivando justificativas fundamentadas;
- confronto com concepções alternativas e reorganização do pensamento dos alunos diante de resultados inesperados;
- valorização do erro como parte do processo de aprendizagem;
- estímulo à curiosidade e ao engajamento dos estudantes nas atividades;
- integração entre teoria e prática, favorecendo a compreensão de conceitos científicos aplicados a situações concretas.

3.5 INSTRUÇÃO ENTRE PARES: UMA BREVE REVISÃO

Nesta seção, discutiremos brevemente alguns tópicos relacionados à metodologia da Instrução entre Pares. O objetivo é apresentar seus fundamentos e, assim como na seção anterior, destacar, a partir de trabalhos da literatura, as possibilidades decorrentes de sua utilização.

A metodologia de Instrução entre Pares (*Peer Instruction*), proposta por Mazur e Somers (1999), apresenta uma discussão sobre os conceitos prévios dos estudantes e como essas noções influenciam a forma como interpretam determinados fenômenos.

Mazur e Somers (1999) também apontam outros aspectos importantes: o ensino tradicional e a memorização.

O chamado ensino tradicional é um dos principais dilemas do ensino de física, tanto no nível médio quanto no superior. De acordo com o autor, uma das maiores dificuldades enfrentadas pelos estudantes de graduação está na frustração vivenciada nos cursos de física básica. Para o autor, um dos fatores que contribuem para isso é a forma como a disciplina é ensinada, que, segundo ele, pouco difere daquela utilizada no século XIX.

Essa abordagem está diretamente associada às aulas expositivas, em que o professor ocupa o papel central como detentor do conhecimento, enquanto o aluno assume uma postura passiva, sendo visto como um recipiente no qual o saber é depositado.

“[...] Se de fato as aulas expositivas não estão entre os principais fatores que nos auxiliam a desenvolver as competências e habilidades que nos são caras, o que justifica ainda o investimento maciço de tempo e energia dispensados a elas? Em parte talvez possa ser explicado por tradição. Fazia o maior sentido em outros tempos, quando as informações eram raras e o professor era, antes de mais nada, um erudito, que ele investisse em ditar ou copiar no quadro o que estava em suas anotações, ou em livros de difícil acesso. Desse modo, cada aluno seria capaz de ter uma cópia para si dos materiais. Entretanto, o que justifica ainda esse modelo de ensino, claramente voltado para a disseminação de informações, quando poucas coisas são tão baratas e acessíveis hoje quanto a informação?” (Araujo; Mazur, 2013, p.380)

Com relação a memorização, segundo o autor, ao tratar de certos conceitos físicos, como a terceira lei de Newton, é possível observar que muitos estudantes conseguem realizar os cálculos e dominam as estruturas matemáticas, mas, por outro lado, carecem de uma base conceitual sólida. Por exemplo, se perguntarmos, em um impacto entre um carro e um caminhão, qual dos dois exerce uma força maior sobre o outro, é comum, devido ao senso comum e às experiências pessoais, que os estudantes respondam que o caminhão exerce uma força maior sobre o carro, por conta de seu tamanho.

É possível observar, neste relato, que os alunos se apoiam na aprendizagem de estratégias de resolução de problemas no sentido de adquirir receitas, fórmulas, e

procedimentos matemáticos, sem, de fato, compreenderem o conceito abordado. Aprendem a fazer o proposto, mas não compreendem o que é proposto.

De acordo com Moreira (2017), em uma perspectiva freiriana de educação bancária, observa-se que “estudar é memorizar conteúdos mecanicamente, sem significados. O que se espera do educando é a memorização dos conteúdos nele depositados. A compreensão e a significação não são requisitos, a memorização mecânica sim.”

Ainda de acordo com Mazur e Somers (1999), os livros didáticos reforçam a memorização por parte dos estudantes ao descreverem as questões como sendo do tipo “é só substituir e calcular”, sem considerar os conceitos envolvidos, contribuindo para a visão do aluno como mero receptor (figura 18) de conteúdos de uma determinada fonte (livro didático, professor, entre outras).

Figura 18 – Visão bancária de ensino



Fonte: Ilustração gerada com auxílio do ChatGPT (OpenAI), a partir de descrição textual fornecida pelo autor. OpenAI (2025).

Diante da necessidade de se trabalhar os conceitos de forma mais profunda, Mazur desenvolve a metodologia de Instrução entre Pares, cujo foco principal é o entendimento e a aplicabilidade dos conceitos, numa perspectiva em que o aluno ocupa o papel central no processo de aprendizagem. Mazur defende que o conhecimento conceitual é o primeiro passo para a aquisição do conhecimento em uma determinada área (Koehler, 2012).

Neste método, as aulas são divididas em pequenas sequências de apresentações orais feitas pelo professor, focadas nos principais conceitos a serem trabalhados, seguidas da apresentação de questões conceituais para que os alunos respondam, primeiro individu-

almente e, em seguida, discutam com os colegas. Após uma breve exposição oral (cerca de 15 a 20 minutos), o professor propõe aos alunos uma questão conceitual, geralmente de múltipla escolha, com o objetivo de promover e avaliar a compreensão dos conceitos apresentados (Araujo; Mazur, 2013).

Ao inserir os estudantes em uma postura mais ativa, a Instrução entre Pares se distancia do chamado ensino tradicional (Chicon; Quaresma; Garcês, 2018). O método busca promover maior interação entre os estudantes, por meio de explicações entre pares, da elaboração de hipóteses e da aplicação de conceitos para a resolução das questões conceituais.

De acordo com o que é apresentado nos trabalhos de Mazur e Somers (1999) e Araujo e Mazur (2013), a metodologia pode ser descrita pelas seguintes etapas:

Etapla I. Apresentação oral sobre os elementos centrais de um determinado conceito é feita por cerca de 15 a 20 minutos.

Etapla II. Uma pergunta conceitual, usualmente de múltipla escolha, é colocada aos alunos sobre o conceito apresentado anteriormente.

Etapla III. Os alunos têm entre um e dois minutos para pensarem individualmente, e em silêncio, sobre a questão apresentada formulando hipóteses que justifiquem suas respostas.

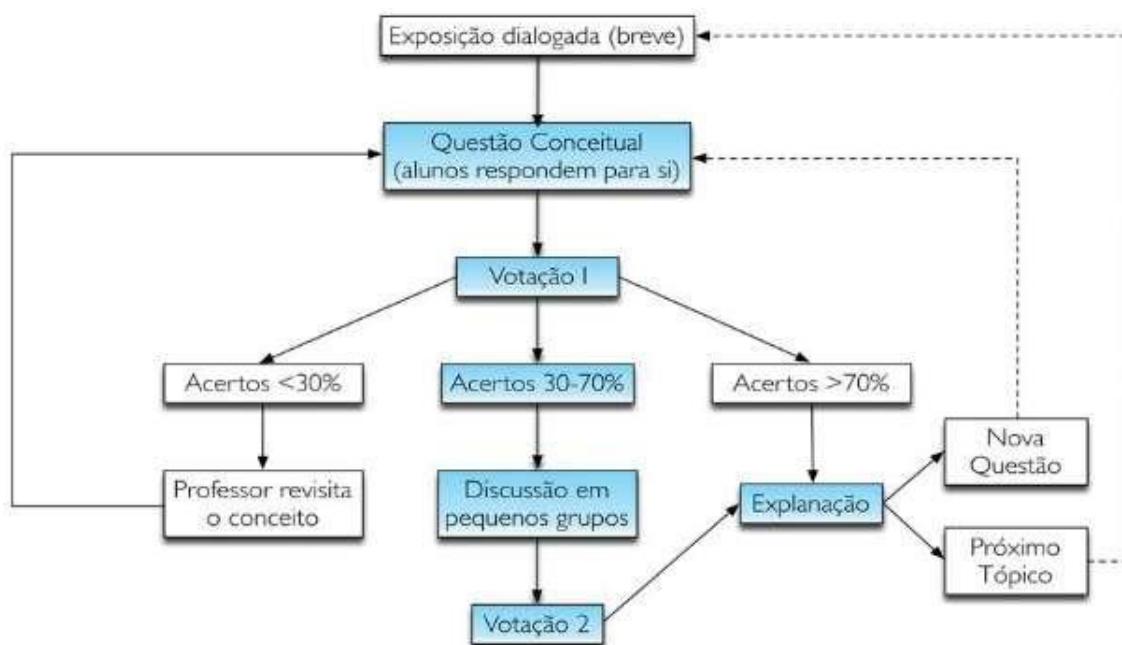
Etapla IV. Os alunos apresentam suas respostas ao professor.

Etapla V. De acordo com as respostas, o professor seguirá um dos preceitos abaixo.

- Com um número de acertos maior que 70%, o professor pode explicar a questão, reiniciar o processo de exposição dialogada e apresentar uma nova questão conceitual sobre um novo tópico.
- Com um número de acertos entre 30% e 70%, o professor pode agrupar alunos em pequenos grupos, preferencialmente que tenham escolhido respostas diferentes, pedindo que eles tentem convencer uns aos outros usando as justificativas pensadas ao responderem individualmente. Passado um tempo, o professor coleta novamente a resposta dos alunos e se julgar necessário, pode apresentar novas questões sobre o mesmo tópico, ou passar diretamente para a exposição do próximo tópico.
- Com um número de acertos inferior a 30%, o professor irá revisitar o conceito explicado, através de nova exposição dialogada e apresentará uma questão conceitual (preferencialmente a mesma da votação anterior) ao final da explicação, recomeçando o processo.

A figura 19 apresenta um diagrama de implementação das etapas da Instrução entre Pares.

Figura 19 – Etapas da Instrução entre Pares



Fonte: Araujo; Mazur (2013, p.370).

Em Harvard, foram utilizados dispositivos individuais fornecidos aos alunos, que operam por meio de frequências de rádio e permitem que as respostas sejam computadas instantaneamente. Esses dispositivos são chamados de *clickers*. Como alternativa aos *clickers*, existem ferramentas como o Plickers, uma plataforma digital gratuita que utiliza cartões com códigos QR. No site ou no aplicativo do Plickers, o docente pode criar as perguntas a serem aplicadas em aula. Durante a atividade, o professor distribui os cartões (disponíveis para impressão no próprio site), e as respostas dos alunos são registradas automaticamente por meio da leitura desses cartões com o aplicativo, sendo posteriormente armazenadas e contabilizadas pela plataforma.

De acordo com Araujo e Mazur (2013), os *clickers* não são o elemento central dessa metodologia, mas sim a interação social. Manter a estrutura tradicional de ensino e utilizar a ferramenta apenas como um sistema de votação, embora possa promover certa motivação, reduz uma das principais potencialidades do método: o engajamento interativo em sala de aula, centrado no diálogo.

Os autores também destacam a importância de se ter cuidado na coleta das respostas, para garantir que os alunos votem sem tomar conhecimento prévio das escolhas

feitas pelos colegas. Dessa forma, recomenda-se que os professores não disponibilizem, em tempo real, a distribuição das respostas, seja por meio dos *clickers* ou do Plickers.

Além disso, é altamente recomendável que os estudantes não tenham acesso à resposta correta antes de realizarem a discussão em grupo. Ambas as situações podem enviesar os resultados e gerar uma falsa impressão de que os conceitos foram plenamente compreendidos, o que é extremamente prejudicial ao processo de ensino-aprendizagem. Por isso, é necessário que o professor tenha atenção especial a esses aspectos.

Embora a proposta tenha sido inicialmente aplicada por Mazur em turmas de ensino superior, e existam na literatura experiências de implementação do método nesse nível de ensino (Chicon; Quaresma; Garcês, 2018; Koehler, 2012), em diferentes áreas do conhecimento, a metodologia não se limita ao ensino superior. Ela pode ser adaptada e aplicada também na Educação Básica, incluindo turmas do ensino fundamental e do ensino médio, em diversas áreas, não se restringindo apenas à física, por exemplo.

Por fim, elencamos algumas das características presentes na Instrução entre Pares, descritas nos trabalhos de Oliveira *et al.* (2017) e Lôbo *et al.* (2024) e nos trabalhos citados ao longo da seção que podem contribuir significativamente para o processo de ensino-aprendizagem:

- Ressignificação do papel do aluno;
- Professor como mediador;
- Participação ativa dos estudantes;
- Aulas mais interativas;
- Levantamento de hipóteses;
- Trabalho em equipe;
- Discussão entre equipes;
- Possível facilitação nos conceitos;
- Enfoque na abordagem conceitual;
- Feedback instantâneo dos alunos para com o professor;
- Desenvolvimento do pensamento crítico;
- Promoção de um ambiente mais acolhedor;
- Identificação de concepções alternativas ou prévias;
- Adaptação em diferentes contextos e disciplinas;

- Promoção da equidade no processo de aprendizagem.

4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O presente trabalho foi desenvolvido em uma turma do segundo ano do ensino médio de uma escola particular localizada no município de Itaboraí, na região metropolitana do estado do Rio de Janeiro (figuras 20 e 21). A escolha da turma se deu pelo fato de os estudantes estarem discutindo tópicos relacionados ao ensino de Física Moderna e Contemporânea, considerando que o colégio adota uma estrutura curricular em que os conteúdos de todo o ensino médio são abordados nos dois primeiros anos, sendo o terceiro ano voltado exclusivamente à revisão e preparação para os vestibulares.

Figura 20 – Registro da aplicação do produto educacional



Fonte: Elaboração Própria.

Para a realização da pesquisa, foi feita uma solicitação formal à direção e à coordenação da escola, com a apresentação do projeto a ser desenvolvido. Após a autorização da instituição, pais e estudantes foram comunicados a fim de obter o consentimento quanto à participação e à coleta de dados, uma vez que trechos escritos e falas em áudio das aulas seriam gravados e registrados. Em conformidade com os princípios éticos, os alunos não foram identificados por nome, sendo referidos como Aluno 1, Aluno 2, Aluno 3, e assim por diante.

A turma era composta por 28 estudantes, dos quais um solicitou sua exclusão da atividade, alegando motivos pessoais para não participar. As atividades foram aplicadas durante parte dos tempos regulares da disciplina de física. Na instituição, essa disciplina é

Figura 21 – Registro da introdução do experimento de Stern-Gerlach



Fonte: Elaboração Própria.

oferecida em dois tempos semanais de 50 minutos cada. Contudo, por exigência da escola concedente, foi disponibilizado apenas um tempo semanal de 50 minutos para a realização da pesquisa.

4.1 METODOLOGIA DA PESQUISA

Realizamos um estudo de caráter quanti-qualitativo com abordagem interpretativista, conforme propõe Saccol (2009), no qual buscamos identificar elementos que pudessem contribuir para o ensino de tópicos de mecânica quântica no ensino médio.

Este trabalho possui natureza de pesquisa aplicada, de acordo com Laville e Dione (1999), uma vez que visa utilizar instrumentos já consolidados — como referenciais teóricos, metodologias e recursos — para colaborar na resolução de um problema específico: a escassa abordagem de conteúdos de Física Moderna e Contemporânea no ensino médio, especificamente de temas ligados com mecânica quântica, como o seu aspecto não-local, aliado a conceitos básicos de relatividade especial.

Como instrumentos de coleta de dados, foram aplicados questionários com questões

abertas e fechadas ao longo do desenvolvimento da pesquisa. A análise das respostas seguiu os princípios da análise de conteúdo, conforme delineado por Bardin (2011), com foco na categorização e interpretação das respostas dos estudantes, buscando identificar padrões, significados e percepções relevantes à construção da sequência didática.

4.2 O PRODUTO EDUCACIONAL

O produto educacional consiste em uma sequência didática elaborada com o objetivo de abordar os conceitos de não localidade e emaranhamento quântico (ou pelo menos alguns de seus indícios). Embora a mecânica quântica trate predominantemente de fenômenos em escalas atômicas e subatômicas, as suas implicações geram impacto significativo no mundo macroscópico, com perspectivas transformadoras para o futuro. Um exemplo notável são os computadores quânticos, que apresentam potencial para revolucionar a estrutura tecnológica vigente e influenciar de forma profunda diferentes setores em escala global.

Apesar de sua relevância, a mecânica quântica ainda é pouco explorada no ensino médio. Entre os principais fatores que contribuem para essa lacuna, destacam-se: a carência de recursos didáticos referentes à área, o baixo número de professores licenciados em física, deficiências na formação inicial dos docentes (tanto licenciados em física quanto de áreas afins que lecionam a disciplina) e o grau de abstração dos conteúdos. Em geral, quando a MQ é levada ao Ensino Básico, os temas restringem-se aos primórdios da teoria quântica (Stadermann; Van den Berg; Goedhart, 2019).

Nesse contexto, o presente produto busca oferecer uma alternativa viável — ou, ao menos, um ponto de partida — para professores que desejam introduzir conteúdos de mecânica quântica em suas aulas, mas que enfrentam algumas das limitações mencionadas.

A proposta está organizada em cinco encontros de 50 minutos e fundamenta-se em duas metodologias: a Instrução entre Pares e a metodologia POE (Predizer, Observar, Explicar). Tais metodologias foram aplicadas em momentos distintos da sequência didática.

Para a aplicação da metodologia POE, nosso trabalho apresenta características semelhantes às propostas por Santos e Sasaki (2015). Ressaltamos que, na etapa de predição, priorizamos a justificativa das hipóteses formuladas pelos estudantes, conforme enfatizado por White e Gunstone (2014).

Na etapa de observação, a descrição das situações ocorreu por meio do diálogo entre os estudantes, com leve mediação do professor. Essa mediação incluiu intervenções como a reprodução de vídeos em diferentes velocidades (acelerando ou retardando trechos), bem como o uso de controles da simulação para destacar pontos importantes.

A etapa de explanação foi conduzida com base nas anotações dos estudantes, complementadas por intervenções do professor, que auxiliou na formalização dos conceitos

científicos envolvidos.

Quanto à metodologia da Instrução entre Pares (*Peer Instruction*), utilizamos o aplicativo Plickers para a coleta das respostas dos estudantes (De Oliveira Silva; Sales; De Castro, 2018). Cabe destacar que, conforme descrito por Mazur e Somers (1999) e apresentado no capítulo anterior, essa metodologia permite que, a depender do percentual de acertos obtido na turma, o professor possa optar por avançar para um novo conteúdo ou apresentar uma nova pergunta conceitual sobre o mesmo tema.

No contexto deste trabalho, devido ao tempo limitado, optamos por repetir a mesma pergunta conceitual nos casos em que os índices de acerto estiveram entre 30% e 70%.

A sequência didática é composta por cinco encontros, organizados em três partes. A primeira parte (encontros 1 e 2) tem como objeto de estudo o experimento de Stern-Gerlach. A segunda parte (encontros 3 e 4) aborda conceitos de causalidade e simultaneidade no espaço-tempo. Já a terceira parte trata do conceito de emaranhamento, a partir de um exemplo simples envolvendo um sistema bipartido formado por dois *spins* viajando em direções opostas.

A tabela 1 a seguir organiza, de forma resumida, os encontros, as atividades realizadas, as metodologias utilizadas e a duração correspondente. A descrição detalhada de cada encontro é apresentada a seguir.

Tabela 1 – Descrição da sequência didática

Encontro	Atividades	Metodologia	Duração
1	Apresentação do produto educacional, introdução ao experimento de Stern-Gerlach, discussão dos conceitos de superposição e colapso da função de onda (via Stern-Gerlach).	POE	50 minutos
2	Apresentação de diferentes arranjos do Stern-Gerlach, inserção da notação de Dirac.	POE	50 minutos
3	Discussão sobre referenciais, eventos, linhas de universo	Instrução entre Pares	50 minutos
4	Discussão sobre causalidade e quebra de causalidade.	Instrução entre Pares	50 minutos
5	Retomada dos conceitos anteriores, discussão acerca do fenômeno de emaranhamento quântico (via Stern-Gerlach) e encerramento da sequência didática.	POE	50 minutos

Fonte: Elaboração Própria.

O produto educacional, as perguntas utilizadas na etapa sobre não localidade e os questionários utilizados (Questionários 1 e 2) estão disponíveis nos apêndices deste trabalho, de modo que possam ser facilmente acessados por professores interessados em utilizá-los futuramente.

O produto encontra-se no Apêndice A, o Questionário 1, utilizado na atividade sobre o experimento de Stern-Gerlach, encontra-se no Apêndice B; as perguntas utilizadas na etapa sobre não localidade (Instrução entre Pares) estão no Apêndice C; e o Questionário 2, referente ao emaranhamento quântico, está no Apêndice D.

As perguntas feitas aos estudantes serão apresentadas ao longo do texto do produto, de forma a proporcionar maior fluidez à leitura.

4.2.1 ENCONTRO 1

Orientações iniciais para o primeiro encontro: recomenda-se reservar de 3 a 5 minutos para:

- Organizar a turma em duplas ou trios, conforme a disposição e o número de alunos. Por exemplo, com 30 alunos, 10 trios.
- Apresentar brevemente a proposta da sequência didática, destacando os principais tópicos que serão abordados: não causalidade e emaranhamento quântico.
- Ressaltar a importância de seguir corretamente cada metodologia, com especial atenção às etapas e à ordem em que devem ser realizadas.
- Entregar o Questionário 1 (presente no Apêndice B) e orientar os estudantes à responder conforme for solicitado.

O primeiro encontro utiliza a metodologia POE. Por isso, é importante destacar que a etapa de predição deve ser realizada individualmente, a fim de evitar que as respostas sejam influenciadas por colegas. Já a etapa de explicação pode ser conduzida de forma coletiva, promovendo o debate e a construção conjunta do conhecimento.

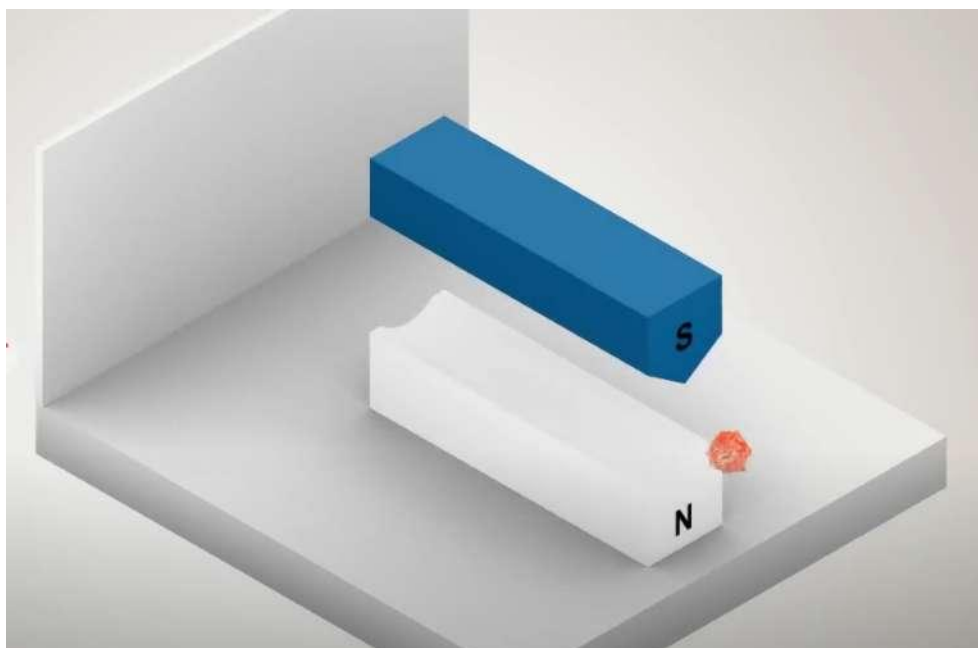
Oriente os alunos a não alterarem suas respostas após a conclusão de cada etapa, respeitando o processo investigativo proposto. Ressalte a importância de registrar observações e reflexões, uma vez que essas anotações são fundamentais para a sistematização e a organização do novo conhecimento adquirido ao longo da sequência.

Procure enfatizar que o objetivo da atividade não é identificar respostas certas ou erradas. Acreditamos que essa abordagem contribui para evitar respostas engessadas e estimula a livre expressão do pensamento dos alunos.

Apresente o vídeo *Spin: Stern and Gerlach Experiment* (disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=rg4Fnag4V-E>), que aborda o experimento de Stern-Gerlach, até o tempo 0:40. Em seguida, pause o vídeo e explique brevemente o que está acontecendo.

Em seguida, reproduza o vídeo até o tempo 0:44 (figura 22) e solicite que os estudantes respondam à primeira pergunta do Questionário 1 (figura 23), relacionada à etapa de Predizer. A ideia é provocar nos estudantes um conflito cognitivo ao questionar o comportamento do átomo ao atravessar um campo magnético não homogêneo.

Figura 22 – Captura de tela do vídeo *Spin: Stern and Gerlach Experiment*



Fonte: Captura de tela retirada do vídeo *Spin: Stern and Gerlach experiment*. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=rg4Fnag4V-E> (La Physique Autrement, 2012).

Dê de 5 a 10 minutos para que os alunos registrem suas respostas e, em seguida, avance para a etapa de Observar. A etapa de Observar consiste em verificar o que acontece no experimento e realizar a descrição entre os colegas de grupo, portanto reproduza o vídeo do tempo 0:44 até o final.

Após a observação, solicite que os alunos respondam à pergunta 2 (figura 24) do Questionário 1. Eles terão entre 3 e 5 minutos para responder, primeiro registrando em papel e depois realizando breves explicações. A pergunta está associada à etapa de Explicar.

Em seguida, reserve de 5 a 10 minutos para formalizar os conceitos. Como ferramenta para a formalização e para inserir os conceitos nas demais perguntas, utilize o simulador Stern-Gerlach do PhET Interactive Simulations (disponível em: <https://phet.colorado.edu/pt/simulations/stern-gerlach>).

Figura 23 – Pergunta 1 do Questionário 1

Pergunta 1

O que vai acontecer com o átomo (lembrando que ele se comporta como um ímã que foi reduzido em escala) ao passar pelo campo magnético? Marque a opção e justifique sua resposta

- a) irá parar em todas as direções da parede, como os ímãs no início do vídeo.
- b) irá parar nas direções em cima e embaixo da parede.
- c) irá parar no centro da parede.
- d) irá parar apenas na direção de baixo da parede.
- e) nenhuma das alternativas listadas acima (explicação na justificativa)

Justificativa:

Fonte: Elaboração Própria.

Figura 24 – Pergunta 2 do Questionário 1

Pergunta 2

O que você pode dizer sobre o fenômeno observado? A sua resposta anterior vai de encontro com o apresentado no vídeo? Justifique.

Fonte: Elaboração Própria.

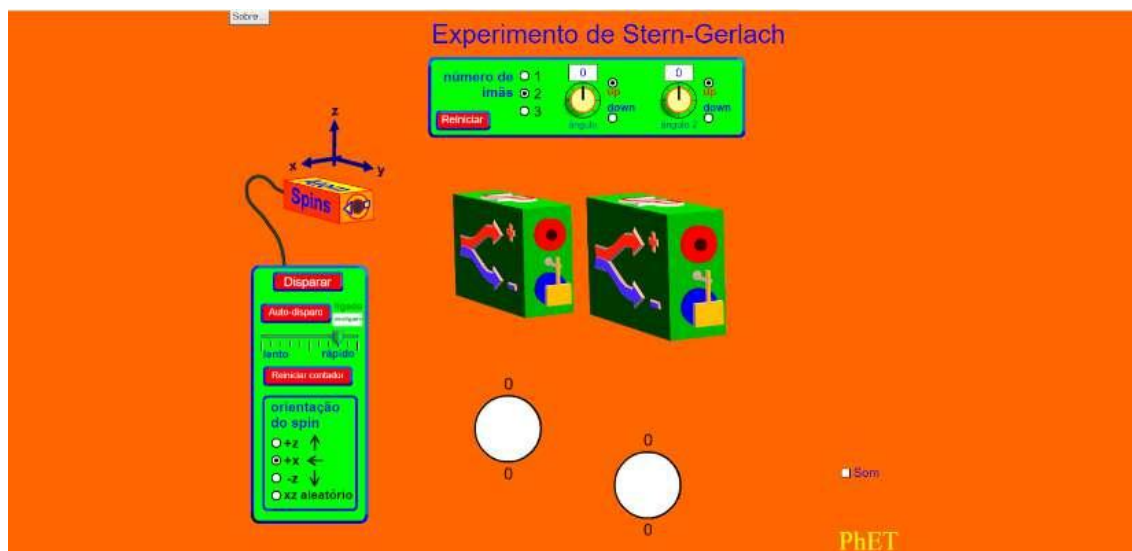
Caso haja algum problema com o Flash Player, sugerimos o uso de um navegador compatível com Flash. No nosso caso, utilizamos o FlashBrowser, que pode ser encontrado no GitHub (disponível em: <https://github.com/radubirsan/FlashBrowser>).

Algumas orientações:

- Solicitar aos alunos curtas explanações orais sobre o ocorrido
- Apresentar o simulador Stern-Gerlach do Phet Colorado e realizando as devidas conexões com o vídeo
- Utilizar o quadro para anotações, de preferência em tópicos, com poucos textos.
- Buscar na fala dos estudantes palavras-chave.

Realize a montagem no simulador conforme mostrado na figura 25. Explique brevemente aos estudantes o arranjo e peça para que respondam à pergunta 3 (figura 26) do Questionário 1. Esta pergunta corresponde à etapa de Predição, e os alunos terão entre 5 e 10 minutos para responder.

Figura 25 – Arranjo Stern-Gerlach da Pergunta 3



Fonte: Captura de tela retirada do simulador PhET Colorado do experimento de Stern-Gerlach. (PhET Interactive Simulations).

Figura 26 – Pergunta 3 do Questionário 1

Pergunta 3

Se colocarmos um “obstáculo” no “baixo/negativo” e mais um campo magnético, o que pode acontecer? Justifique

- a) passará apenas para parte de “cima/positiva”
- b) passará tanto em “cima/positivo” quanto em “baixo/negativo”.
- c) passará apenas na parte de “baixo/negativa”
- d) falta informação para responder
- e) nenhuma das alternativas listadas acima (explicação na justificativa)

Fonte: Elaboração Própria.

Após os alunos responderem, libere o simulador para que os alunos realizem em grupos a descrição do fenômeno. Nesta etapa, é possível ajustar os controles de velocidade e disparo (automático ou manual). Este momento corresponde à etapa de Observar.

Em seguida, solicite que os estudantes respondam à pergunta 4 (figura 27) do Questionário 1, relacionada à etapa de Explicar. Dê de 3 a 5 minutos para que possam responder e realizar explicações.

Realize a formalização, utilizando as instruções anteriores como base. Lembre-se de que o objetivo aqui é discutir a ideia de colapso da função de onda. Procure usar uma

Figura 27 – Pergunta 4 do Questionário 1

Pergunta 4:

O resultado esperado te surpreendeu? O que se pode dizer sobre o comportamento observado e qual sua relação com os valores que são observados abaixo dos aparatos que produzem campo magnético?

Fonte: Elaboração Própria.

linguagem acessível, evitando termos excessivamente técnicos.

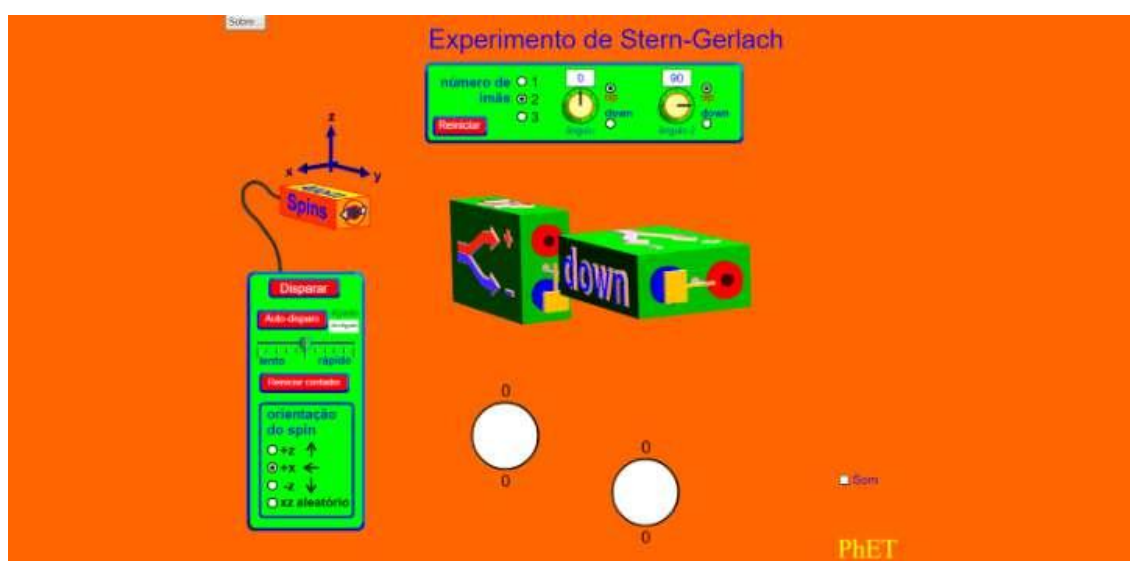
Finalizado o primeiro encontro, recolha os questionários dos estudantes e encerre esta etapa. Avise aos estudantes que este questionário será reentregue na próxima aula.

4.2.2 ENCONTRO 2

O segundo encontro também segue a metodologia POE, sendo uma continuação das atividades iniciadas no primeiro encontro, por meio do experimento Stern-Gerlach. Dê início às atividades entregando os questionários da aula anterior aos estudantes e faça uma breve recordação do que foi realizado até aquele momento, destacando os temas abordados.

Em seguida, realize a montagem no simulador conforme a figura 28. Explique brevemente o arranjo aos estudantes e peça para que respondam à pergunta 5 (figura 29) do Questionário 1. Esta pergunta corresponde à etapa de Predição, e os alunos terão entre 5 e 10 minutos para responder.

Figura 28 – Arranjo Stern-Gerlach da Pergunta 5



Fonte: Captura de tela retirada do simulador PhET Colorado do experimento de Stern-Gerlach. PhET Interactive Simulations (2024).

Figura 29 – Pergunta 5 do Questionário 1

Pergunta 5

Se mantermos o “obstáculo” no “baixo/negativo” e alterarmos a direção de um campo magnético, o que pode acontecer? Justifique

Justificativa:

Fonte: Elaboração Própria.

Após os alunos responderem, libere o simulador e solicite aos estudantes que realizem a descrição do fenômeno entre seus pares. Este momento corresponde à etapa de Observar. Caso desejem, os estudantes podem ajustar os controles de velocidade de lançamento e de autolancamento.

Em seguida, solicite que os estudantes respondam à pergunta 6 (figura 30) do Questionário 1. Esta pergunta está relacionada à etapa de Explicar, e eles terão entre 3 e 5 minutos para responder e em seguida realizar suas explicações.

Figura 30 – Pergunta 6 do Questionário 1

Pergunta 6

O que se pode dizer sobre o comportamento observado e qual sua relação com os valores que são observados abaixo dos aparatos que produzem campo magnético?

Fonte: Elaboração Própria.

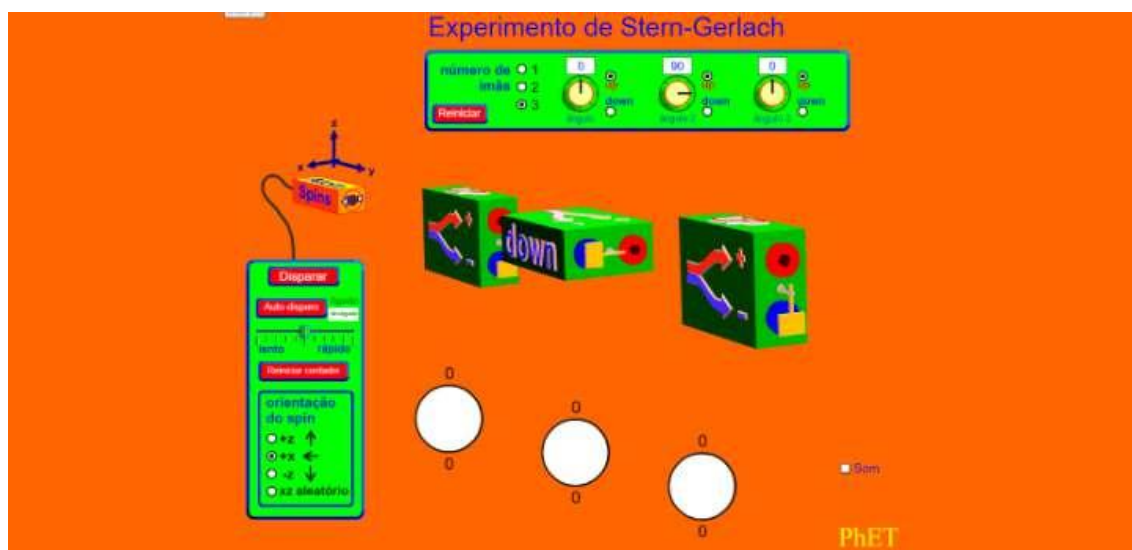
Após a etapa de Explicar, avance para um novo arranjo do experimento Stern-Gerlach (figura 31).

Apresente a nova montagem e peça para que os estudantes respondam à pergunta 7 (figura 32) do mesmo questionário. Esta pergunta corresponde à etapa de Predição, e os alunos terão entre 5 e 10 minutos para responder.

Após os alunos responderem, permita que observem a simulação. Este momento corresponde à etapa de Observar. Feita a observação e descrição, solicite que os estudantes respondam à pergunta 8 (figura 33), que corresponde à etapa de Explicar. Eles terão entre 3 e 5 minutos para responder a pergunta e em seguida realizar as explicações.

Após esse momento, realize a formalização. Procure discutir com os estudantes a ideia da orientação dos campos magnéticos. Pergunte-lhes se este seria um fator influente nos resultados encontrados e, em caso afirmativo, qual seria a relação entre a orientação e os valores dos *spins*. Separe de 5 a 10 minutos para essa formalização.

Figura 31 – Arranjo Stern-Gerlach da Pergunta 7



Fonte: Captura de tela retirada do simulador PhET Colorado do experimento de Stern-Gerlach. PhET Interactive Simulations (2024).

Figura 32 – Pergunta 7 do Questionário 1

Pergunta 7

Se mantermos a configuração anterior e acrescentarmos mais um campo magnético, o que pode acontecer? Justifique

- a) o átomo ficará “preso” no segundo campo magnético.
- b) o mesmo que na configuração anterior.
- c) passará apenas na parte de “cima/positiva”
- d) falta informação para responder.
- e) nenhuma das alternativas listadas acima (explicação na justificativa)

Justificativa:

Fonte: Elaboração Própria.

Para encerrar o segundo encontro, apresente aos estudantes a seguinte notação:

$$\uparrow = |0\rangle, \downarrow = |1\rangle \quad (4.1)$$

A notação representa o estado em que o sistema se encontra, ou seja, *spin* para cima no primeiro caso e para baixo no segundo. Cada um deles representam estados que respondem afirmativamente à “pergunta” feita pelo campo magnético. A interpretação é como se o campo magnético fosse uma espécie de tomógrafo sobre o sistema que nos

Figura 33 – Pergunta 8 do Questionário 1

Pergunta 8

O que se pode dizer sobre o comportamento observado e qual sua relação com os valores que são observados abaixo dos aparatos que produzem campo magnético? Será que há alguma relação com as configurações vistas anteriormente?

Fonte: Elaboração Própria.

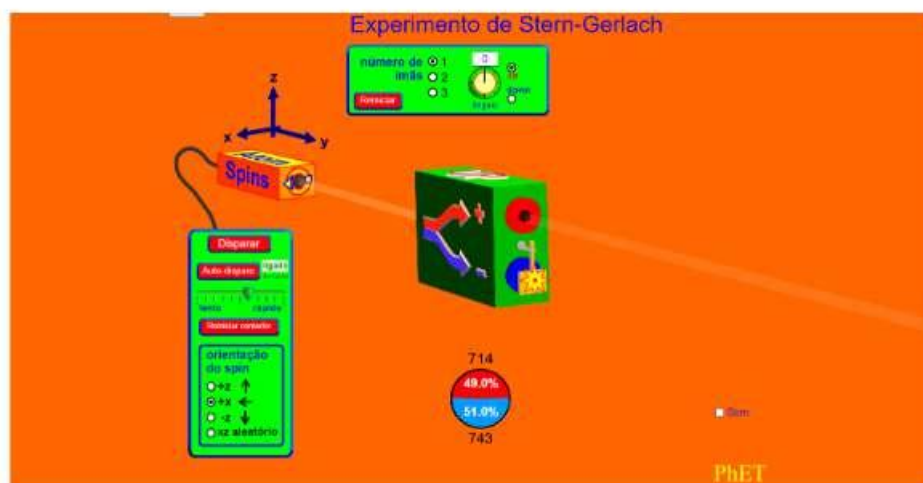
informa ou acaba preparando o feixe em determinado estado após a passagem pela região com o campo magnético.

A equação (4.1) apresenta uma forma menos “técnica” da Notação de Dirac. O objetivo é introduzir a notação aos estudantes (sem que eles saibam explicitamente que se trata da notação de Dirac) de maneira a evitar os grandes formalismos matemáticos.

Após a introdução da notação, solicite que os alunos respondam à última pergunta (figura 34) do Questionário 1. Nessa questão, eles devem representar, utilizando a notação apresentada, o que ocorre no experimento Stern-Gerlach no arranjo inicial (figura 22), antes e após a passagem dos *spins*. Ou seja, como é possível representar o sistema antes e depois da passagem dos *spins* usando a “nossa” notação.

Figura 34 – Pergunta 9 do Questionário 1

O sistema na configuração abaixo (antes e após a passagem dos átomos pelo campo magnético) pode ser representado na nossa notação de que forma?



Fonte: Captura de tela retirada do simulador PhET Colorado do experimento de Stern-Gerlach. PhET Interactive Simulations (2024).

Ao final do encontro, recolha os questionários dos estudantes e, caso haja dúvidas, reserve um espaço para atendê-las, além de abrir espaço para outras discussões.

4.2.3 ENCONTRO 3

O terceiro encontro tem como objetivo discutir conceitos relacionados à parte de relatividade, em particular linhas de universo, referenciais, eventos, causalidade e quebra de causalidade. Este encontro está pautado na metodologia de Instrução entre Pares.

Nos cinco minutos iniciais, separe a turma nas duplas e/ou trios dos encontros anteriores. Explique para os estudantes como funciona a metodologia de Instrução entre Pares, leve-os a entender a necessidade de seguir a metodologia como indicado, para que haja melhores resultados.

Como forma de coleta das respostas dos estudantes, utilizamos o aplicativo Plickers (<https://www.plickers.com>) que permite que as perguntas sejam realizadas e as respostas sejam analisadas em tempo real, com porcentagens de erros e acertos. O que facilita bastante como ferramenta de coleta para a metodologia.

Caso seja o seu primeiro contato com o aplicativo Plickers, sugerimos que assista a este tutorial: <https://www.youtube.com/watch?v=3Got8PtLXuc>.

Entregue os cartões do Plickers para os estudantes e também explique-lhes como poderão registrar, através do cartão, a alternativa que julgam correta. Mencione também, nesses minutos iniciais, a importância de registrar as informações para a sistematização e organização do novo conhecimento.

Realize uma breve discussão (entre 15 a 20 minutos) com os estudantes acerca do que são eventos, linhas de universo e como estes são representados graficamente.

Em nossa aplicação, utilizamos estalos de dedos para explicar o conceito de eventos. Para discutir a ideia de linhas de universo, nos apoiamos em três casos:

- Partícula em repouso no seu referencial;
- Partícula com velocidade constante $0,2c$ em seu referencial;
- Cone de luz.

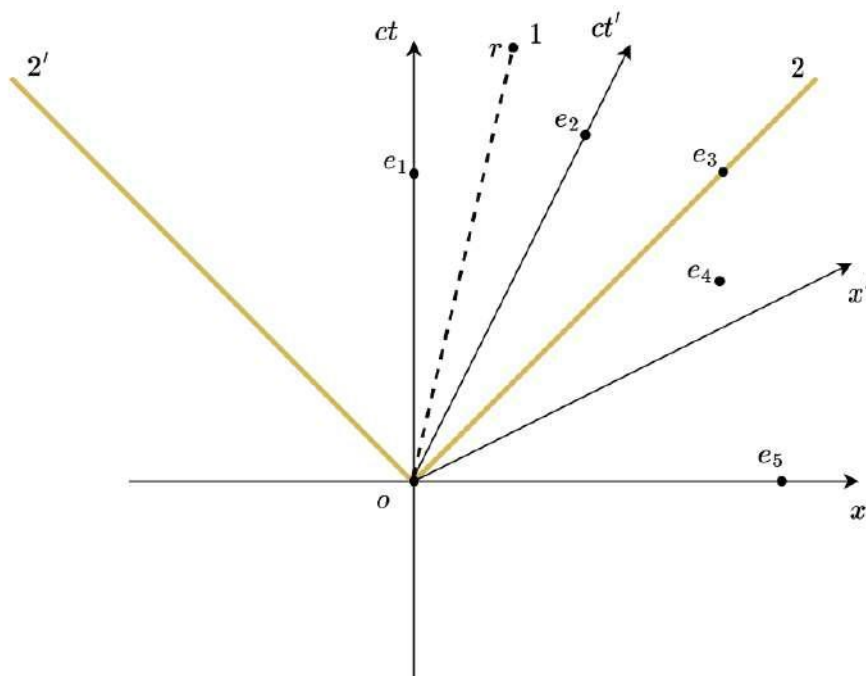
A figura 35 apresenta a representação do cone de luz do evento o , eixos de coordenadas espaciais e temporais de dois referenciais (com e sem linha), diversos eventos e uma linha de universo tracejada de uma partícula deslocando-se em relação aos referenciais com e sem linha.

Utilizamos a lousa para realizar os tracejados das linhas de universo. Em seguida, foram tratados dois exemplos para discutir a inclinação dos eixos espaço-tempo:

- Partícula que se move com velocidade constante de $0,2c$ com relação a outro referencial;

- Simultaneidade de Einstein.

Figura 35 – Representação de eventos, linhas de universo, cone de luz, eixos de coordenadas temporais-espaciais no espaço tempo de Minkowski



Fonte: Elaboração Própria.

Para a discussão sobre a simultaneidade em Einstein, utiliza-se o experimento mental conhecido como “trem de Einstein”. Nessa situação, considera-se um trem em movimento a alta velocidade em relação a uma plataforma de estação. Dois raios atingem simultaneamente a frente e a traseira do trem, segundo um observador que está na plataforma. No entanto, para um observador dentro do trem, os raios não atingem as extremidades ao mesmo tempo. Como a luz se propaga à mesma velocidade em ambos os referenciais, a diferença nos instantes em que os raios atingem as extremidades, do ponto de vista do observador no trem, deve-se à sua posição relativa.

Para ilustrar essa diferença de percepção temporal, utilizam-se os diagramas de linhas de universo para cada referencial (observador no trem e observador na plataforma), nos quais se apresenta a inclinação dos eixos espaço-tempo.

A nossa abordagem desses temas seguiu os preceitos geométricos, por isso, o uso da lousa foi importantíssimo na construção dos gráficos.

Feito isso, apresente o simulador de diagramas espaço-tempo de Minkowski (disponível em: <http://www.trell.org/div/minkowski.html>). Comente também sobre as funcionalidades do simulador e inicie a primeira pergunta.

No simulador, insira velocidade relativa igual a zero, $d = 2$ e $t = 4$ (para um evento B), e pergunte como será descrito esse mesmo evento no referencial linha. A figura 36 ilustra a forma como organizamos a pergunta (esta e as demais perguntas desta etapa estão no Apêndice C).

Figura 36 – Pergunta 1 - Instrução entre Pares

O que vai acontecer no referencial linha se colocarmos um evento B com $d = 2$, $t = 4$ e velocidade relativa igual à zero?

A O evento B ocorre depois de A e tem coordenadas diferentes do referencial d , ct .

B Não sei.

C O evento B ocorre depois de A e tem as mesmas coordenadas do referencial d , ct .

D O evento B ocorre antes de A e tem as mesmas coordenadas do referencial d , ct .

The screenshot shows a software interface for a physics simulation. At the top, there are input fields for 'Relative velocity' (set to 0.0), 'Event A: d = 0', 't = 0', 'Event B: d = 0', 't = 0', and 'd = 0', 't = 0'. There are buttons for 'Calculate', 'Clear', 'Toggle input mode', and 'Show / Hide light paths to observers'. Below these is a formula for the invariant interval: $s^2 = (ct)^2 - d^2 = (ct')^2 - d'^2$. The main part of the interface is a spacetime diagram with a vertical axis labeled 't (ct)' ranging from -8 to 8 and a horizontal axis labeled 'd' ranging from -8 to 8. Two diagonal lines representing light paths (45 degrees) intersect at the origin. The region above the light paths is labeled 'Time-like intervals' and the region below is labeled 'Space-like intervals'.

Fonte: Elaboração Própria.

Dê entre 3 a 5 minutos para que os estudantes levantem os cartões com as alternativas que julgam corretas, e não se esqueça de, em cada pergunta deste encontro, seguir os preceitos da Instrução entre Pares:

- Acima de 70% de acertos introduz-se uma nova questão
- Entre 30-70% de acertos é realizada uma discussão entre grupos e refeita a pergunta
- Abaixo de 30% de acertos é necessária a revisão dos conceitos por parte do professor e refeita a pergunta

Assim que alcançados os 70% de acertos, altere no simulador a velocidade relativa para $0,2c$ e realize a segunda pergunta (figura 37). Dê cerca de 3 a 5 minutos para que os alunos a respondam.

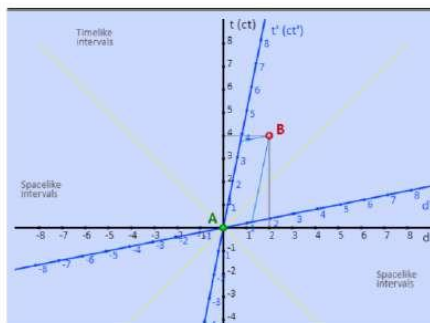
Assim que alcançados os 70% de acertos, altere no simulador a velocidade relativa para $0,5c$ e realize a terceira pergunta (figura 38). Dê cerca de 3 a 5 minutos para que os alunos a respondam.

Alcançados os 70% de acertos, discuta a relação de causalidade presente nos eventos das perguntas 1, 2 e 3. Mostre aos estudantes, através de diagramas e com exemplos do

Figura 37 – Pergunta 2 - Instrução entre Pares

Com base no exemplo anterior (evento B com $d = 2$, $t = 4$) e considerando agora uma velocidade relativa de $0,2c$, o que vai acontecer que vai acontecer no referencial linha?

- A** O evento B ocorre depois de A e tem coordenadas diferentes do referencial d , ct .
- B** O evento B ocorre antes de A e tem coordenadas diferentes do referencial d , ct .
- C** O evento B ocorre depois de A e tem as mesmas coordenadas do referencial d , ct .
- D** Não sei.

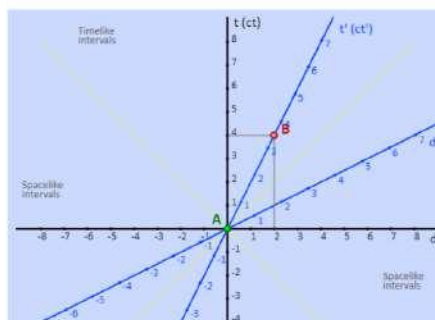


Fonte: Elaboração Própria.

Figura 38 – Pergunta 3 - Instrução entre Pares

Seguindo o exemplo anterior (evento B com $d = 2$, $t = 4$), substituindo a velocidade relativa de $0,2c$ para $0,5c$ é correto afirmar que:

- A** Não sei.
- B** No ref. linha "sinal" está em repouso.
- C** No ref. linha os eventos são simultâneos porque estão sob o eixo temporal.
- D** Os eventos são simultâneos em ambos os referenciais.



Fonte: Elaboração Própria.

cotidiano, o que seriam exemplos causais. Pode-se utilizar exemplos simples, como “chutar a geladeira e sentir dor”, “plantar e colher”. Gaste cerca de 10 minutos nessa discussão.

Sobre a causalidade, no caso dos eventos A e B apresentados anteriormente, A ocorre antes de B e, como tal, A pode ser considerado a causa de B. Observando as coordenadas temporais dos eventos nos dois referenciais, é possível constatar a preservação da ordem causal. Na figura 38, em ambos os referenciais o evento A possui as mesmas coordenadas temporais, $t = t' = 0$, enquanto o evento B apresenta coordenadas distintas,

$t = 4$ e $t' = 3,5$. Ainda assim, em ambos os referenciais o evento A ocorre antes do evento B, o que permite traçar entre eles uma conexão causal.

Finalizada a discussão sobre causalidade, encerre este encontro mencionando aos discentes a importância do conceito de causalidade para o que será discutido no encontro posterior.

4.2.4 ENCONTRO 4

O quarto encontro tem como objetivo dar continuidade na discussão de conceitos relacionados à parte de relatividade, em particular causalidade e quebra de causalidade. Este encontro também está pautado na metodologia de Instrução entre pares.

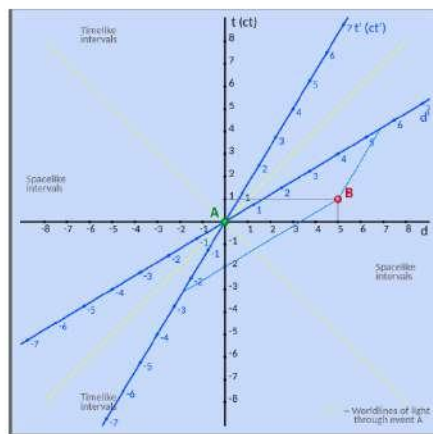
Reserve cerca de 5 a 10 minutos para uma breve revisão dos assuntos que foram discutidos anteriormente, sobretudo lembrando a última atividade, que discutia o conceito de causalidade.

No simulador utilizado na aula passada, insira velocidade relativa igual a $0,6c$, $d = 5$ e $t = 1$ (para um evento B) e pergunte como será descrito este mesmo evento no referencial linha. A figura 39 ilustra a forma como organizamos a pergunta.

Figura 39 – Pergunta 4 - Instrução entre Pares

No caso ao lado (evento B com $d = 5$, $t = 1$ e velocidade relativa de $0,6c$), o que pode-se dizer sobre os eventos A e B?

- ☐ A O evento B ocorre após o A em ambos os referenciais.
- ☐ B Não sei.
- ☐ C Os eventos são simultâneos no ref. linha.
- ☒ D O evento B ocorre antes do evento A no ref. linha.



Fonte: Elaboração Própria.

Os alunos terão cerca de 5 a 10 minutos para responder à pergunta. Alcançados os 70% de acertos, realize uma breve discussão com os estudantes, comparando a pergunta 3 com a pergunta 4.

Apresente a última pergunta (figura 40). Assim como a pergunta anterior, o objetivo é discutir os conceitos de quebra de causalidade. Dê cerca de 5 a 10 minutos para

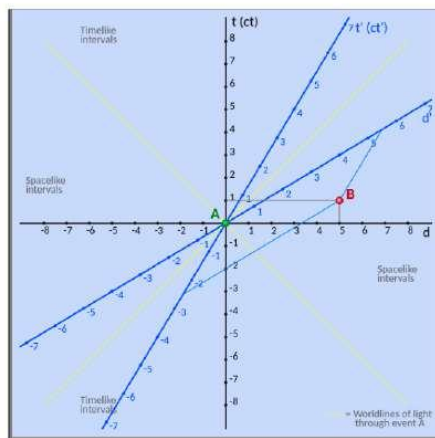
que os discentes respondam.

Figura 40 – Pergunta 5 - Instrução por Pares

Suponha que A é a emissão de um sinal com velocidade maior do que a luz, causando o evento B. (Uma situação análoga seria A como um raio infravermelho emitido para ligar uma televisão por controle remoto. A TV liga quando o recebe o sinal no evento B).

Voltando para a nossa situação hipotética, o que podemos dizer?

- ☐ A A TV ligaria antes do controle ser acionado.
- ☐ B A TV ligaria após o controle ser acionado.
- ☐ C Não sei.
- ☐ D A TV liga instantaneamente ao acionar o controle.



Fonte: Elaboração Própria.

Alcançados os 70% de acertos, realize uma discussão acerca dos conceitos de quebra de causalidade. Como sugestão, dê alguns exemplos hipotéticos, como:

- Comer antes de cozinhar.
- Nascer antes do nascimento da sua mãe.

Por fim, finalize através da discussão com uma pergunta: **Podemos ter velocidade maior que a velocidade da luz?**

Com os exemplos acima, fica claro que fixado um evento, digamos A, teremos 3 possibilidades para um outro evento, digamos, B:

1. Ele fica dentro do cone de luz de A. Neste caso, existe um referencial em que A e B são espaçados temporalmente. A pode ser visto como causa de B.
2. B fica sobre o cone de luz. Neste caso, A e B são conectados por um sinal luminoso e também é possível estabelecer uma relação de causalidade entre os dois.
3. B agora está fora do cone de luz. Neste caso não é possível estabelecer relação de causalidade entre o par. Contudo, existe um referencial em que A e B são simultâneos.

Graficamente, tem-se uma consequência das transformações de Lorentz, que conecta coordenadas de referenciais que se deslocam uma relação ao outro. Quando um referencial, digamos, S' , se afasta de outro referencial S , os eixos ct' e x' ficam inclinados, como bem representado nas figuras acima.

Suponhamos que mesmo assim (com A e B na situação 3), seja possível enviar um sinal de A para B com velocidade acima da velocidade da luz. Neste caso, conforme indica a figura 40, concluiríamos que B ocorre antes do que A, ou seja a causa ocorre depois da consequência, quebrando causalidade. Este fato estranho aconteceria se admitíssemos velocidades acima de c . Conduza a discussão levando estas considerações.

Como sugestão, diga aos alunos que eles retomem os exemplos anteriores e prestem atenção nas falas dos mesmos, encaminhando-os para uma discussão conceitual adequada. Feita a pergunta, encerre o quarto encontro.

4.2.5 ENCONTRO 5

O quinto e último encontro tem como objetivo discutir conceitos relacionados ao emaranhamento quântico e à não localidade. Este encontro está pautado na metodologia POE.

Separe cerca de 10 a 15 minutos para realizar uma breve revisão do que foi apresentado até o momento. Caso surjam dúvidas, não deixe de saná-las.

Organize a turma nas mesmas duplas ou trios formados anteriormente e entregue a cada estudante o Questionário 2 (Apêndice D).

Oriente novamente os alunos sobre a metodologia que será utilizada e solicite que não alterem suas respostas após a conclusão de cada etapa, respeitando o processo investigativo proposto. Ressalte a importância de registrar observações e reflexões, uma vez que essas anotações são fundamentais para a sistematização e organização do novo conhecimento adquirido ao longo da sequência.

Apresente a figura 41 aos estudantes. Explique que a figura é uma representação da emissão de um par de partículas liberadas para um lado e outro e que ambas estão correlacionadas com *spin up* e *down*.

Após a apresentação, dê cerca de 5 a 10 minutos para que os estudantes respondam à pergunta 1 do Questionário 2. Esta pergunta (figura 42) corresponde à etapa Predizer. Mencione aos estudantes a situação representada é de duas pessoas (Bruno e Patrick), cada uma em um laboratório separado, com uma distância considerável entre eles.

Figura 41 – Emissão de um par emaranhado



Fonte: Ilustração gerada com auxílio do ChatGPT (OpenAI), a partir de descrição textual fornecida pelo autor. OpenAI (2025).

Figura 42 – Pergunta 1 - Questionário 2

Pergunta 1

Suponha o arranjo do Stern-Gerlach acima, com duas pessoas localizadas numa distância elevadíssima (uma no Japão e a outra no Brasil, por exemplo). O que pode ocorrer?

- a) Ambos receberão o átomo apontando “para cima”
- b) Ambos receberão o átomo apontando “para baixo”
- c) Um receberá o átomo apontando “para cima” e o outro “para baixo”
- d) O átomo ficará perdido por conta da distância, não sendo possível medir em um dos casos
- e) nenhuma das alternativas listadas acima (explicação na justificativa)

Justificativa:

Fonte: Elaboração Própria.

Para a etapa Observar, apresente a figura 43. Explique que você liberou um par de partículas para um lado e outro e que ambos estão correlacionadas com *spin up* e *down*, cujo estado é representado por:

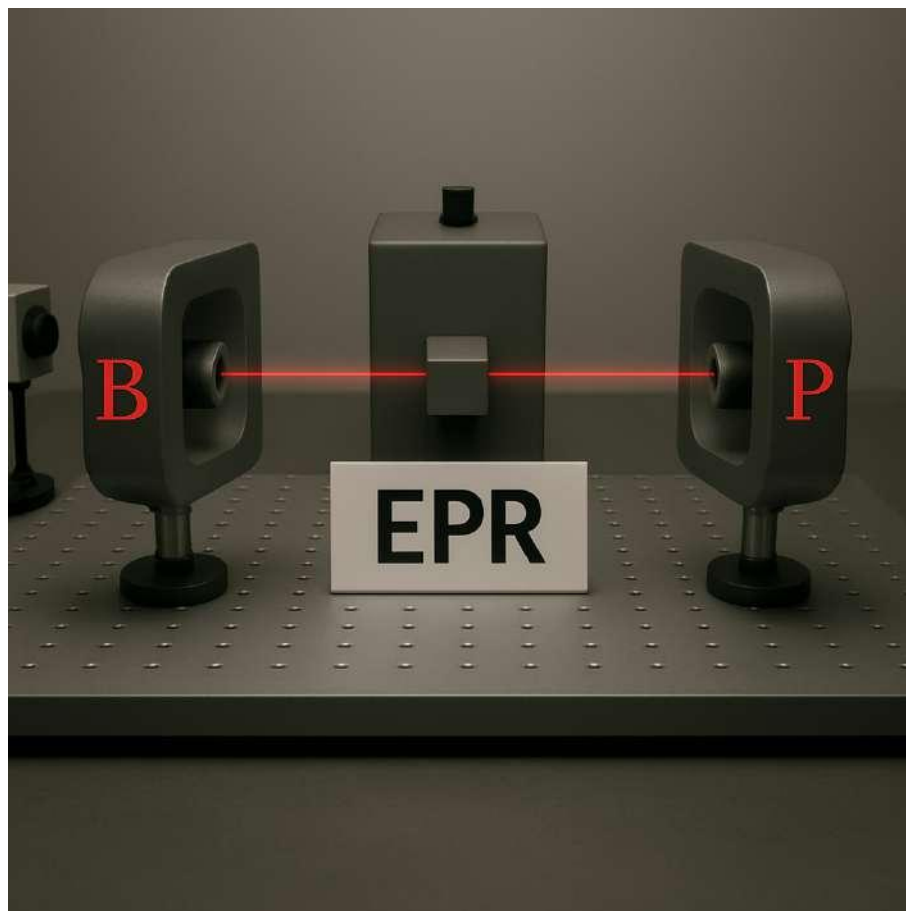
$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle_B |1\rangle_P + |1\rangle_B |0\rangle_P). \quad (4.2)$$

Explique também aos estudantes que as informações apresentadas correspondem à medida realizada no laboratório de Bruno.

Reserve cerca de 3 a 5 minutos para esta etapa, para que os alunos consigam

realizar a descrição entre equipes acerca do que foi observado.

Figura 43 – Parte do arranjo utilizado no Questionário 2



Fonte: Ilustração gerada com auxílio do ChatGPT (OpenAI), a partir de descrição textual fornecida pelo autor. OpenAI (2025).

Peça que os estudantes respondam à pergunta 2 (figura 44) e dê cerca de 5 a 10 minutos para que a realizem. Ao final da pergunta, e das explicações dos alunos, formalize com os mesmos alguns dos conceitos.

Figura 44 – Pergunta 2 do Questionário 2

Pergunta 2

Se o medido no laboratório do Bruno foi “cima”, qual seria a medida no laboratório de Patrick?

Uma medida pode influenciar instantaneamente no que ocorre no outro laboratório?

Fonte: Elaboração Própria.

Um possível conflito aqui ocorre quando um dos laboratórios, por exemplo, laboratório B do Bruno, afastado do laboratório P do Patrick faz uma medição sobre o sistema

e descobre o *spin*, digamos, *up*. Neste caso, pelo colapso já discutido anteriormente, o estado após a medição é:

$$|\Psi'\rangle = |0\rangle_B |1\rangle_P \quad (4.3)$$

A medição de Bruno poderia então influenciar o estado do sistema que está no laboratório do Patrick instantaneamente? Mas nossa discussão anterior mostrou que propagação de sinais com velocidade maior que c poderia gerar quebra de causalidade, certo?

Este simples exemplo retrata este caráter estranho da mecânica quântica - o emaranhamento, explícito no estado $|\Psi\rangle$, sugere que partículas possam afetar uma à outra instantaneamente, mesmo que afastadas.

Mesmo que a medição em uma partícula instantaneamente afete o estado da outra, para verificar a correlação, os dois experimentadores precisam comparar os resultados — e isso requer comunicação clássica, que obedece à limitação da velocidade da luz.

Aborde estas questões com os estudantes, retomando sempre que possível (e quando necessário) aos conceitos abordados previamente. Procure estabelecer conexões entre os conteúdos e suas aplicações tecnológicas, contribuindo para a contextualização dos temas discutidos.

Por exemplo, nos primeiros encontros, é possível discutir a computação quântica e os *qubits*. Nos encontros dedicados à relatividade, pode-se explorar a utilização do GPS e as correções relativísticas envolvidas. Já no encontro sobre emaranhamento quântico, a discussão pode ser direcionada para a internet quântica e suas implicações. Dessa forma, busca-se fornecer uma aprendizagem que aproxima os conceitos da realidade dos discentes. Assim, concluí-se a sequência didática chegando à não-localidade.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, discutiremos os resultados obtidos ao longo da aplicação do produto educacional. Como objeto de análise, utilizaremos as falas dos alunos (gravadas com o consentimento dos mesmos) e as respostas fornecidas por eles a dois questionários aplicados durante os encontros.

O capítulo está dividido em três seções, correspondentes, respectivamente, aos encontros de aplicação do produto.

Todas as informações expostas pelos estudantes foram transcritas para o computador devido a algumas delas possuírem uma grafia que poderia dificultar a leitura e compreensão.

Devido ao volume de dados e ao tempo limitado, utilizamos o ChatGPT como ferramenta para organizar as informações apresentadas pelos estudantes nos questionários. As perguntas redigidas foram inseridas na inteligência artificial, que ficou responsável apenas pela organização e pela geração de gráficos. Ressaltamos que toda a análise foi realizada por nós.

5.1 ENCONTROS 1 E 2

Nos primeiros encontros, foi utilizado o Questionário 1 (presente no produto educacional). Esse questionário contém nove perguntas, que foram trabalhadas ao longo dos dois encontros, das quais serão analisadas a seguir. O Questionário 1 possui perguntas abertas e perguntas mistas.

O Questionário 1 é fundamentado na metodologia POE. Dessa forma, as perguntas foram estruturadas para contemplar suas etapas. As fases de **Predizer** e **Explicar** estavam diretamente relacionadas às perguntas, enquanto a fase de **Observar** dizia respeito à análise e descrição do que ocorria na simulação, estabelecendo a conexão entre **Predizer** e **Explicar**.

A primeira pergunta corresponde à etapa de **Predizer** e introduz o experimento de Stern-Gerlach aos estudantes.

É possível observar (figura 46) que as respostas da primeira pergunta ficaram concentradas entre as alternativas A, B e C, sendo a alternativa C a que recebeu o maior volume de respostas.

Acreditamos que o pensamento dos estudantes que marcaram a alternativa A está embasado em um viés, digamos, clássico, no qual a redução de escala não influenciaria no fenômeno, sendo observado o mesmo padrão anterior (ímãs em escala real). Como exemplo dessa colocação, veja as justificativas dos alunos 7 e 16.

Figura 45 – Pergunta 1 do Questionário 1

Pergunta 1

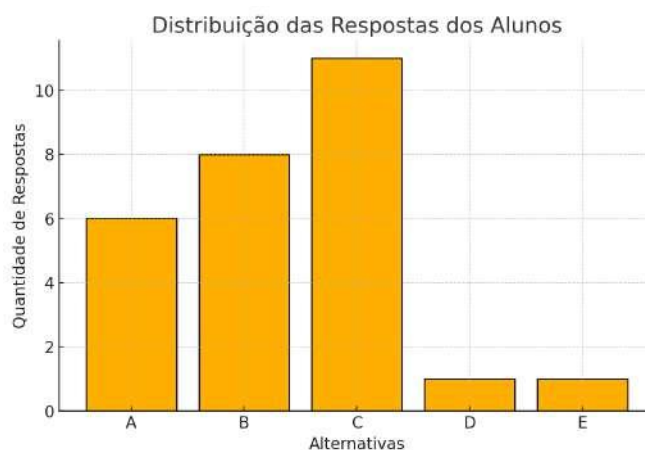
O que vai acontecer com o átomo (lembrando que ele se comporta como um ímã que foi reduzido em escala) ao passar pelo campo magnético? Marque a opção e justifique sua resposta

- a) irá parar em todas as direções da parede, como os ímãs no início do vídeo.
- b) irá parar nas direções em cima e embaixo da parede.
- c) irá parar no centro da parede.
- d) irá parar apenas na direção de baixo da parede.
- e) nenhuma das alternativas listadas acima (explicação na justificativa)

Justificativa:

Fonte: Elaboração Própria.

Figura 46 – Distribuição das Respostas da Pergunta 1 do Questionário 1



Fonte: Ilustração gerada com auxílio do ChatGPT (OpenAI), a partir de descrição textual fornecida pelo autor. OpenAI (2025).

- **Aluno 7** - “Pois mesmo estando reduzindo não deixa de ser um ímã”.
- **Aluno 16** - “Pois os ímãs só diminuíram seu tamanho”.

A alternativa B está alinhada com o que ocorre no experimento de Stern-Gerlach. No entanto, as justificativas de alguns alunos não são totalmente corretas. Por exemplo, observe as justificativas dos alunos 5 e 19.

- **Aluno 5** - “Pois ele é absorvido tanto pelo positivo ou negativo”.
- **Aluno 19** - “Pois está reduzida e pode ir em todas as direções”.

É compreensível, até mesmo pela natureza da mecânica quântica, a dificuldade dos estudantes em justificar a escolha que fizeram.

Ainda em relação à mesma pergunta, ressaltamos três justificativas um pouco incomuns. Veja abaixo as justificativas dadas pelos alunos 2, 3 e 24.

- **Aluno 2** - “O átomo se comporta como um dipolo magnético e é desviado para cima ou para baixo ao passar pelo campo magnético, parando em duas regiões distintas da parede”.
- **Aluno 3** - ‘Quando os átomos usados no experimento passam por um campo magnético, eles se dividem em duas direções: para cima e para baixo”.
- **Aluno 24** - “O átomo se desvia para cima e para baixo devido ao campo magnético não homogêneo”.

Pela formalidade na escrita e na abordagem conceitual (incomum em comparação com as demais justificativas), acredita-se que esses alunos tenham utilizado alguma ferramenta de pesquisa para formular suas respostas.

O maior número de estudantes marcou a alternativa C. Dentre as justificativas, destacam-se as dos alunos 12 e 15, que justificaram da mesma forma.

- **Aluno 12** - “Pois a força magnética mantém ao centro”.
- **Aluno 15** - “A força magnética o mantém no centro”.

A justificativa do aluno 18 não condiz com a opção marcada, aproximando-se com a alternativa A.

- **Aluno 18** - “Fará o mesmo que os outros, só que com tamanho reduzido”.

Acreditamos que o fato de o ímã ter sido reduzido ao tamanho atômico e estar visualmente em um formato diferente dos ímãs tradicionais (com polos norte e sul) tenha levado os estudantes a marcarem tal alternativa, como podemos ver no que foi descrito pelos alunos 4 e 6.

- **Aluno 4** - “Por conta que é apenas um, a direção é o centro”.
- **Aluno 6** - “Por conta que é um só”.

A segunda pergunta corresponde à etapa de **Explicar**. Nesse momento, os estudantes já haviam previsto o que ocorreria no experimento de Stern-Gerlach, por meio

da primeira pergunta, e já haviam passado pela etapa de **Observar**, que foi realizada através da observação do experimento através do vídeo e relatos entre os grupos do que ocorria. A segunda pergunta visava obter breves explicações dos estudantes sobre o que eles observaram e também uma comparação entre o que haviam predito e o que de fato foi observado. O objetivo aqui é verificar se houve alguma mudança conceitual entre os estudantes em relação ao experimento de Stern-Gerlach.

Figura 47 – Pergunta 2 do Questionário 1.

Pergunta 2

O que você pode dizer sobre o fenômeno observado? A sua resposta anterior vai de encontro com o apresentado no vídeo? Justifique.

Fonte: Elaboração Própria.

No que tange a indicar o que ocorria no fenômeno, muitos alunos indicaram corretamente (à sua maneira) o que acontecia no experimento de Stern-Gerlach, como é possível ver nos relatos abaixo.

- **Aluno 1** - “O átomo ficará nas direções de cima e embaixo, indo contra a minha resposta anterior”.
- **Aluno 9** - “Não, pois assinei que estava parando apenas no centro, mas o correto seria direções em cima e embaixo”.
- **Aluno 15** - “Não, porque no vídeo mostra um indo para cima e outro para baixo e eu respondi que ele se mantinha no centro”.

Destacamos que alguns alunos, como os alunos 16, 18 e 20, não compreenderam o fenômeno apresentado.

- **Aluno 16** - “Não sei porque não entendi o fenômeno”.
- **Aluno 18** - “Não entendi. Não está parecido, já que no vídeo vai para cima e para baixo”.
- **Aluno 20** - “Não compreendi o que foi apresentado no vídeo”.

Alguns desses alunos, na etapa de **Predizer**, indicaram uma alternativa com um viés mais clássico (a redução de tamanho não implicando no fenômeno). O aluno 17 também reforçou, por meio dessa pergunta, que possuía esse viés clássico no **Predizer**.

- **Aluno 17** - “Não. Eu acreditei que teria o mesmo fenômeno apenas quando move rápido por conta da menor escala”.

Os alunos 2, 3 e 24 (como na pergunta anterior) apresentam justificativas com um grau de formalidade, tanto na escrita quanto no aspecto conceitual, que nos causa certa desconfiança, como mencionado anteriormente.

- **Aluno 2** - “Os átomos se dividem em dois feixes, confirmando que possuem momentos magnéticos alinhados em direções opostas”.
- **Aluno 3** - ‘Demonstra que o campo magnético divide os átomos de acordo com seus estados, criando uma separação nas direções”.
- **Aluno 24** - “O fenômeno demonstra a quantização do momento magnético dos átomos que se desviam para duas direções distintas”.

Algumas concepções alternativas ainda estão presentes, como é possível verificar na fala do aluno 13.

- **Aluno 13** - “Os átomos foram para cima e para baixo, de certa forma sim, pois em marquei em várias direções”.

No geral, percebemos que os alunos não conseguiram estabelecer uma conexão entre o fenômeno e a questão da mudança de escala, ou seja, o fato de que a física que rege as escalas atômicas e subatômicas é diferente daquela que se aplica a uma escala ‘convencional’. Muitos associaram o fenômeno a uma causa magnética, citando, por exemplo, os polos magnéticos norte e sul.

- **Aluno 7** - “Sobre o fenômeno, para que cada átomo teria dois polos fazendo assim com que um desse repele o outro”.
- **Aluno 11** - ‘Acho que é a polaridade do campo magnético (polo sul e polo norte), onde um ocupa para baixo e outro para cima”.
- **Aluno 14** - “No fenômeno os polos dos ímãs foram separados fazendo assim eles irem para parte de cima e de baixo”.

A terceira pergunta busca explorar os conceitos de colapso da função de onda e está relacionada à etapa de **Predizer**. Antes de a pergunta ser apresentada, foi realizada uma breve discussão com os estudantes acerca do experimento de Stern-Gerlach. Apresentamos aos estudantes o simulador do PhET Colorado sobre Stern-Gerlach, no qual fizemos um

paralelo entre o que foi apresentado no vídeo e no simulador, explicando o funcionamento de cada controle e funcionalidade.

O intuito era mostrar aos estudantes que o fenômeno do vídeo era o mesmo presente no simulador e também familiarizá-los com o simulador, pois as demais perguntas seriam baseadas nele.

Figura 48 – Pergunta 3 do Questionário 1

Pergunta 3

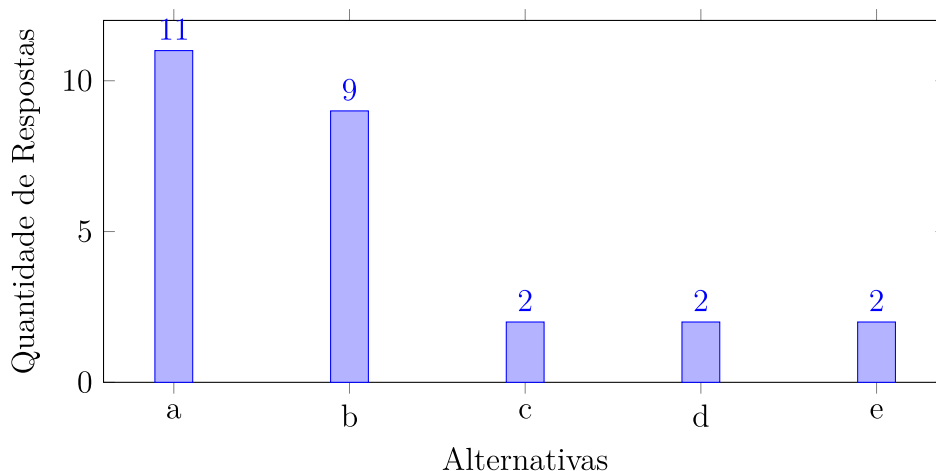
Se colocarmos um “obstáculo” no “baixo/negativo” e mais um campo magnético, o que pode acontecer? Justifique

- a) passará apenas para parte de “cima/positiva”
- b) passará tanto em “cima/positivo” quanto em “baixo/negativo”.
- c) passará apenas na parte de “baixo/negativa”
- d) falta informação para responder
- e) nenhuma das alternativas listadas acima (explicação na justificativa)

Fonte: Elaboração Própria.

A figura 49 apresenta as respostas apresentadas pelos estudantes. As respostas ficaram, em sua maioria, nas alternativas A e B, sendo a alternativa A a que obteve o maior número de escolhas.

Figura 49 – Distribuição das Respostas da Pergunta 3 do Questionário 1



Fonte: Ilustração gerada com auxílio do ChatGPT (OpenAI), a partir de descrição textual fornecida pelo autor. OpenAI (2025).

Os alunos que marcaram a alternativa A sustentaram seu argumento diretamente no obstáculo, considerando-o um elemento que impedia a passagem dos átomos em ambas

as partes, ‘cima’ e ‘baixo’.

- **Aluno 3** - “Os átomos de *spin* negativo serão bloqueados pelo obstáculo”.
- **Aluno 19** - “Por causa da barreira”.
- **Aluno 21** - “Pois a parte de baixo estará bloqueada”.
- **Aluno 22** - “A barreira da parte de baixo impede a passagem”.
- **Aluno 23** - “Porque está impedido”.

É interessante a fala do aluno 16. Ao mencionar aleatoriedade, é possível perceber uma ‘pitada’ (mesmo que com algumas concepções alternativas) da natureza da Mecânica Quântica no discurso deste estudante.

- **Aluno 16** - “Se ele bateu no obstáculo, ele não se mexe e depende da aleatoriedade para passar no positivo duas vezes”.

Em um primeiro momento, a justificativa desses estudantes segue também um padrão clássico, com o obstáculo sendo o ponto central de sustentação. Levando em consideração que se tratava de uma fase de predição, é compreensível a visão clássica dos estudantes, embora o colapso desempenhe um papel crucial no que ocorre.

Pelo que se observa nos estudantes que assinalaram a alternativa B, a natureza do fenômeno seria a mesma, independentemente dos obstáculos. De certo modo, com n lançamentos e sem o obstáculo, cada átomo poderia colapsar tanto em um estado ‘para cima’ quanto em um estado ‘para baixo’.

- **Aluno 1** - “O átomo pode passar tanto no negativo quanto no positivo”.
- **Aluno 7** - “Passa pelos dois (cima e baixo) por conta do *spin*”.
- **Aluno 9** - “Passará tanto em cima quanto embaixo, pois quando entra em cima pode sair embaixo”.
- **Aluno 15** - “Porque quando o átomo passa pelo primeiro, poderá seguir pelas duas direções”.

A fala do aluno 5 é repleta de concepções alternativas. Aqui, reverbera a questão dos polos magnéticos, e o estudante também insere como justificativa a velocidade. Este aluno assinalou a alternativa C.

- **Aluno 5** - “A polaridade que existe entre Norte e Sul. A “bolinha” passa pelo obstáculo e passará na parte de cima devido sua velocidade e não é repelida”.

A quarta pergunta corresponde à etapa de **Explicar**. A etapa de **Observar** foi realizada por meio da observação de n lançamentos no simulador PhET Colorado seguida de uma descrição entre os estudantes do que ocorria. Essa pergunta tinha o objetivo de confrontar as hipóteses levantadas pelos estudantes na pergunta anterior, agora tendo em mãos o que ocorria na montagem do experimento de Stern-Gerlach apresentada anteriormente.

Figura 50 – Pergunta 4 do Questionário 1

Pergunta 4:

O resultado esperado te surpreendeu? O que se pode dizer sobre o comportamento observado e qual sua relação com os valores que são observados abaixo dos aparatos que produzem campo magnético?

Fonte: Elaboração Própria.

Os alunos 4, 5, 6, 7 demonstraram surpresa sobre o comportamento do átomo no experimento de Stern-Gerlach. Alguns acreditavam que ele poderia atravessar barreiras devido à sua velocidade.

- **Aluno 4** - “Sim. Porque eu achei que iria romper a barreira de baixo por conta da velocidade da bolinha, achei que os valores iriam mudar conforme ia passando”.
- **Aluno 5** - “Sim, pois o meu pensamento era de que o resultado era contrário”.
- **Aluno 6** - “Sim, achei que iria romper a barreira por conta da velocidade”.
- **Aluno 7** - “Sim. Se tiver um obstáculo, o átomo não passa. Mesmo sendo estranho para mim, pois pensei que o movimento do *spin* estaria válido. Sobre os valores, 50% no primeiro para cada e no segundo 100%”.

Destaca-se, na fala do aluno 7, o fator probabilístico presente no experimento. Outros alunos também mencionaram esse aspecto em suas falas.

- **Aluno 15** - “O comportamento era esperado, o primeiro ficaria 50% porque eles passaram pelos dois polos, o segundo era 100% positivo porque só passou em cima”.
- **Aluno 16** - “Não, pois era óbvio, se tiver um obstáculo o átomo não pode atravessá-lo. Eles não deixam de ser objetos comuns, por isso passa 100% positivo no segundo”.
- **Aluno 20** - “Não, realmente aconteceu que no 1º campo passou em cima e embaixo, mas por conta do obstáculo no 2º campo passou 100% no positivo”.

Houve uma forte tendência de reconhecimento da previsibilidade do experimento, especialmente em relação ao efeito da barreira. Alguns alunos (como o aluno 16) destacaram que os valores obtidos eram “óbvios” ou “esperados”.

- **Aluno 8** - “Não. Era perceptível que iria passar no positivo e no negativo vai somente no primeiro. É porque tem um obstáculo impedindo”.
- **Aluno 23** - “Não, era óbvio. Comportamento inversamente proporcional aos valores fixos”.

Podemos observar, na fala do aluno 23, uma explicação ou interpretação incorreta ao mencionar um “comportamento inversamente proporcional”.

Assim como na pergunta 3, o fator de sustentação dos estudantes é a barreira, o que reforça a visão clássica deles. Ao final da aula, foi realizada uma breve discussão entre o professor e os estudantes, que resultou no seguinte diálogo.

Uma breve observação: A1, A2, A3 não correspondem aos alunos 1, 2 e 3. A ordenação dos alunos nos questionários é diferente da ordenação dos alunos no diálogo.

- **P** - Por que está indo só para cima?
- **A1** - O obstáculo, independentemente da quantidade de bolinhas, é uma barreira e acaba impedindo.
- **A2** - Professor, quando ele passa pelo positivo ele vai ficar sempre positivo? Ai é por isso que ele passa só no positivo?
- **A2** - Antes de sair no primeiro (ímã), ele não tem um lado (orientação) definido; é aleatório, podendo ir para cima ou para baixo.
- **P** - Isso. Perfeito.
- **A2** - Mas, se ele passa pelo positivo, ele sempre vai ficar positivo.
- **A3** - Então o movimento (orientação) do *spin* vai ser o mesmo após a passagem, né?

O conceito de colapso de função de onda fica muito explícito neste diálogo. Após esse momento, foi apresentado aos alunos que o que eles apresentaram em suas falas chama-se colapso. Esse conceito foi formalizado com os estudantes com o auxílio do simulador, onde exploramos o arranjo do Stern-Gerlach variando a velocidade de lançamento dos *spins*. Nos lançamentos, se o primeiro Stern-Gerlach apresenta *spin up*, ele mantém *spin up*, ou seja, colapsou para *spin up*; se no primeiro Stern-Gerlach apresenta *spin down*, no segundo ele também *spin down*, ou seja, colapsou para *spin down*, porém por conta do obstáculo, essa parte é “interrompida”.

Ao final da formalização, o professor perguntou oralmente aos estudantes o que ocorreria se realizássemos vários lançamentos na mesma configuração, com e sem a barreira. Os estudantes categoricamente afirmaram que seria similar, com 50% de probabilidade de *spin up* e 50% de probabilidade de *spin down*.

A quarta pergunta encerra o primeiro encontro. No segundo encontro, foi realizada uma breve discussão sobre o que foi visto no primeiro encontro, e, em seguida, partiu-se para a quinta pergunta. A quinta pergunta busca explorar o que ocorre no Stern-Gerlach ao alterarmos a orientação do campo (figura 28) e está relacionada à etapa de **Predizer**.

Figura 51 – Pergunta 5 do Questionário 1

Pergunta 5

Se mantermos o “obstáculo” no “baixo/negativo” e alterarmos a direção de um campo magnético, o que pode acontecer? Justifique

Justificativa:

Fonte: Elaboração Própria.

A maior parte dos estudantes acreditou que alterar a direção do campo magnético não resultaria em influências no fenômeno, citando que o comportamento seria similar ao que foi explorado anteriormente (Perguntas 3 e 4)

- **Aluno 4** - “O que eu tenho em mente é que a bolinha continuará, porque não interfere o lado em que está, tem barreira em baixo. Então ele deve continuar”.
- **Aluno 7** - “Ele vai continuar passando apenas no positivo pois uma vez que o ímã passa no positivo, é sempre positivo”.
- **Aluno 13** - “Na minha opinião ele vai passar na parte positiva”.
- **Aluno 22** - “No vermelho (positivo) continuará passando normalmente, no azul (negativo) a barreira irá bloquear”.

Podemos também observar, nas hipóteses de alguns estudantes, respostas que se aproximam do que de fato ocorre no fenômeno. Como tratado anteriormente, as argumentações do aluno 3 nos causam certa inquietude devido à formalidade conceitual e escrita.

- **Aluno 3** - “Influenciam o alinhamento dos *spins* dos átomos, direcionando-os para as novas direções definidas pelo campo”.

- **Aluno 10** - “Acho que não haverá mudanças significativas, apesar que com a mudança de ângulo pode ocorrer de ser mais provável ele seguir os dois valores”.
- **Aluno 21** - “Passará tanto do lado de baixo quanto do lado de cima”.

A sexta pergunta corresponde à etapa de **Explicar**. Neste momento, os alunos já haviam observado o Stern-Gerlach com a mudança de direção por meio do simulador Phet Colorado. Aqui, a natureza da MQ causa uma quebra, ou seja, um conflito cognitivo na maioria dos estudantes, uma vez que o comportamento observado é totalmente diferente do que a maioria havia sinalizado.

Figura 52 – Pergunta 6 do Questionário 1

Pergunta 6

O que se pode dizer sobre o comportamento observado e qual sua relação com os valores que são observados abaixo dos aparatos que produzem campo magnético?

Fonte: Elaboração Própria.

Alguns alunos sinalizaram o que de fato ocorre com a mudança de direção do campo magnético. A resposta do aluno 17 é interessante, pois associa diretamente a mudança do fenômeno com a mudança de direção do campo magnético.

- **Aluno 7** - “O momento do ímã voltou a ser aleatório, ambos ficaram 50%”.
- **Aluno 8** - “Ele conseguiu passar em ambas as direções, tanto no negativo quanto no positivo, porém ele vai por vez, hora passa no positivo, hora no negativo”.
- **Aluno 17** - “A mudança de campo do cima e baixo para esquerda e direita modifica a trajetória”.
- **Aluno 21** - “A variação mudou novamente, agora sendo aleatório”.

Um grupo significativo de estudantes disse não compreender ou não saber explicar o que ocorre.

- **Aluno 3** - “Não entendi”.
- **Aluno 10** - “Não sei”.
- **Aluno 11** - “Não sei”.
- **Aluno 13** - “Não entendi muito bem”.

- **Aluno 14** - “Não entendi, pois não sei explicar”.
- **Aluno 18** - “Não sei explicar”.
- **Aluno 19** - “Não sei explicar, é tipo tropeçar, você não volta no mesmo lugar para cair de novo”.

Chamamos a atenção novamente para o aluno 3. É curioso que ele tenha apontado, após a observação, que não entendeu, sendo que sua resposta pré-observação vai exatamente de encontro com o fenômeno. Neste caso, o que ocorre segundo Ferracioli (1999) é que o aluno atingiu um equilíbrio provisório, ou seja, não é porque em um primeiro momento o aluno 3 tenha sinalizado uma resposta positiva que ele de fato compreendeu na sua totalidade o conceito, e, algum elemento externo também pode contribuir para gerar um novo conflito cognitivo.

A fala do estudante 19 também é bastante curiosa. No que tange aos fenômenos quânticos e à sua anti-intuição, essa frase é uma analogia poderosa para a Mecânica Quântica.

Alguns alunos apresentam concepções alternativas ou conceitos incorretos, como é o caso dos alunos abaixo.

- **Aluno 1** - “Em determinado tempo não se iguala”.
- **Aluno 4** - “Por conta que o campo magnético está de lado, ele pode bater tanto no azul (negativo) quanto no vermelho (positivo), porque os dois estão meio retos e a probabilidade de pegar em um dos dois aumenta”.
- **Aluno 12** - “Depois de um tempo vai igualar pela velocidade”.
- **Aluno 20** - “Que realmente vai ser em maior quantidade na parte positiva no segundo ímã”.

A sétima pergunta (figura 53) busca explorar o que ocorre no experimento de Stern-Gerlach ao acrescentarmos um terceiro campo magnético na direção z e um bloqueio no segundo campo magnético (no arranjo das perguntas 5 e 6) e está relacionada à etapa de **Predizer**.

Diferentemente das questões anteriores, observamos uma maior concentração de respostas em uma alternativa específica, sendo a alternativa B a mais escolhida pelos estudantes. A figura 54 apresenta a distribuição das respostas.

As justificativas dos estudantes que assinalaram A foi a seguinte:

- **Aluno 3** - “O átomo pode se alinhar ao novo campo e ser ‘capturado’ pela segunda região magnética, limitando sua trajetória e restringindo o movimento”.

Figura 53 – Pergunta 7 do Questionário 1

Pergunta 7

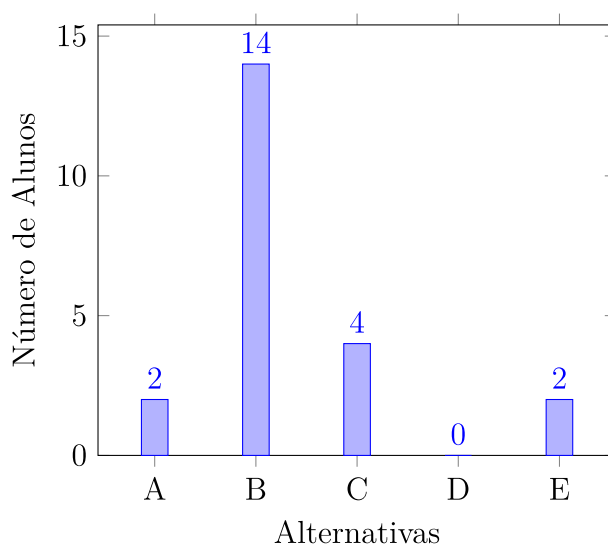
Se mantermos a configuração anterior e acrescentarmos mais um campo magnético, o que pode acontecer? Justifique

- a) o átomo ficará “preso” no segundo campo magnético.
- b) o mesmo que na configuração anterior.
- c) passará apenas na parte de “cima/positiva”
- d) falta informação para responder.
- e) nenhuma das alternativas listadas acima (explicação na justificativa)

Justificativa:

Fonte: Elaboração Própria.

Figura 54 – Distribuição das Respostas da Pergunta 7 do Questionário 1



Fonte: Ilustração gerada com auxílio do ChatGPT (OpenAI), a partir de descrição textual fornecida pelo autor. OpenAI (2025).

- **Aluno 5** - “Não sei”.

Segundo o aluno 3, ao passar pelo segundo campo magnético (que contém um obstáculo), o átomo pode ser capturado e não completar sua trajetória, restringindo-se apenas à passagem pelos dois primeiros campos.

Entre os alunos que escolheram a alternativa B, destacam-se as justificativas abaixo.

- **Aluno 2** - “Acho que não vai mudar nada, pois o primeiro campo já separou os

átomos em duas direções, então esse segundo campo magnético não deve fazer diferença”.

- **Aluno 17** - “Por conta da nova mudança na orientação vai ‘tentar’ passar pelos dois polos”.
- **Aluno 18** - “Pois estão em ângulos diferentes”.

A justificativa do aluno 2 mostra que, segundo a concepção deste estudante, os campos magnéticos adicionados após o primeiro não teriam efeito algum no fenômeno. De certa forma, a leitura feita pelo estudante é a de que não importa quantos campos são inseridos nem suas orientações, pois o fenômeno seria resultado apenas do que acontece no primeiro campo, em uma espécie de colapso. Sabemos que essa visão está em desacordo com o que foi discutido nas últimas duas questões, pois a inserção de um novo campo e, sobretudo, a direção/orientação desse campo influenciam diretamente o fenômeno.

A justificativa dos alunos 17 e 18 está alinhada com o que de fato ocorre na situação, uma vez que a mudança de orientação dos campos magnéticos desempenha um papel crucial no movimento dos átomos no experimento de Stern-Gerlach. Por isso, mesmo com um bloqueio, o átomo tem 50% de probabilidade de *spin up* e 50% de *spin down* ao passar pelo terceiro campo magnético.

Segundo o aluno 20, que assinalou a alternativa C, a barreira nos ímãs anteriores tem um papel direto, influenciando o átomo a seguir apenas uma direção de passagem. No entanto, existem outros elementos, além da barreira, que exercem influência real no fenômeno, como a orientação dos campos magnéticos.

- **Aluno 20** - “Passará apenas por cima no terceiro por conta dos obstáculos no 1º e no 2º íma”.

Alguns alunos indicaram que não compreenderam ou não conseguiram explicar, como pode ser observado nas justificativas a seguir. Entre esses alunos, um marcou a alternativa A, um marcou a alternativa B e dois marcaram a alternativa E.

- **Aluno 5** - “Não sei”.
- **Aluno 9** - “Não sei”.
- **Aluno 10** - “Não sei como descrever meu entendimento”.
- **Aluno 13** - “Não entendi o que aconteceu”.
- **Aluno 19** - “Não sei”.

- **Aluno 21** - “Não sei”.

Cerca de 3 alunos não justificaram suas respostas. Esse foi o caso dos alunos 6 e 14, que marcaram a alternativa B, e do aluno 15, que marcou a alternativa C.

A oitava pergunta (figura 55) corresponde à etapa de **Explicar**. Após a etapa de levantamento de hipóteses, a etapa de **Observar** foi realizada por meio da simulação do experimento de Stern-Gerlach com a montagem referente à pergunta anterior, onde após as observações os estudantes realizaram a descrição do que ocorria na montagem. O objetivo da pergunta 8 é confrontar as hipóteses levantadas anteriormente e formalizar o que ocorre no experimento de Stern-Gerlach na situação em que temos três campos magnéticos com orientações distintas.

Figura 55 – Pergunta 8 do Questionário 1

Pergunta 8

O que se pode dizer sobre o comportamento observado e qual sua relação com os valores que são observados abaixo dos aparatos que produzem campo magnético? Será que há alguma relação com as configurações vistas anteriormente?

Fonte: Elaboração Própria.

Após a observação, alguns estudantes reforçaram seus argumentos na questão da aleatoriedade.

- **Aluno 16** - “Os ímãs sempre serão aleatórios então seus valores sempre irão variar de 50% positivo e 50% negativo”.
- **Aluno 21** - “Sim, os valores continuam aleatórios”.
- **Aluno 22** - “Quando temos apenas 1 e na mesma direção, quando mudamos a direção a ordem fica aleatória”.

Existem algumas inconsistências nessas falas. A aleatoriedade em si não está associada ao ímã ou ao campo magnético, mas sim às duas orientações possíveis que o *spin* pode adotar na passagem do segundo para o terceiro campo magnético. Os valores em si não continuam aleatórios; ao longo de n medidas, as probabilidades tendem a ser iguais, 50 % para cima e 50 % para baixo.

O aluno 17, que havia apresentado uma hipótese consistente na pergunta anterior, agora apresenta uma justificativa um tanto confusa.

- **Aluno 17** - “Percebe-se que se passa aleatoriamente e sempre se igual ao outro. As mudanças de orientação para igualar proporcionam a passagem em um polo e orientações diferentes, vai aleatoriamente de novo”.

Acreditamos que a complexidade de expressar os fenômenos quânticos causou essa confusão na fala do estudante, o que fica evidente quando ele utiliza alguns termos relacionados à área, mas que não fazem sentido no contexto geral de sua justificativa.

Neste caso também retomamos a discussão de Ferracioli (1999). O aluno atingiu um equilíbrio provisório, ou seja, apresenta ainda lacunas no conceito, o que fica explícito na fala do mesmo.

Algumas concepções alternativas foram observadas nas respostas de alguns estudantes.

- **Aluno 7** - “Que o momento continua sendo aleatório e entre os valores vão ficar 50% para cada”.
- **Aluno 8** - “Há alguma relação sim com o anterior, porém se aumentar a velocidade vai passar somente no negativo”.

O aluno 7 menciona “momento”, mas não fica claro que tipo de momento ele está se referindo, se é o momento linear ou o momento magnético. Temos a impressão de que o estudante quis dizer “movimento”, em vez de “momento”. Já o aluno 8 evoca uma concepção que foi discutida nas perguntas anteriores, que é a suposta influência da velocidade de lançamento dos *spins* nos “caminhos” adotados pelos *spins*.

Um grupo significativo de estudantes não soube justificar ou não compreendeu o fenômeno observado.

- **Aluno 6** - “Não entendi”.
- **Aluno 9** - “Não sei”.
- **Aluno 10** - “Não sei”.
- **Aluno 11** - “Não sei”.
- **Aluno 14** - “Não sei”.
- **Aluno 19** - “Há, mas não sei responder”.

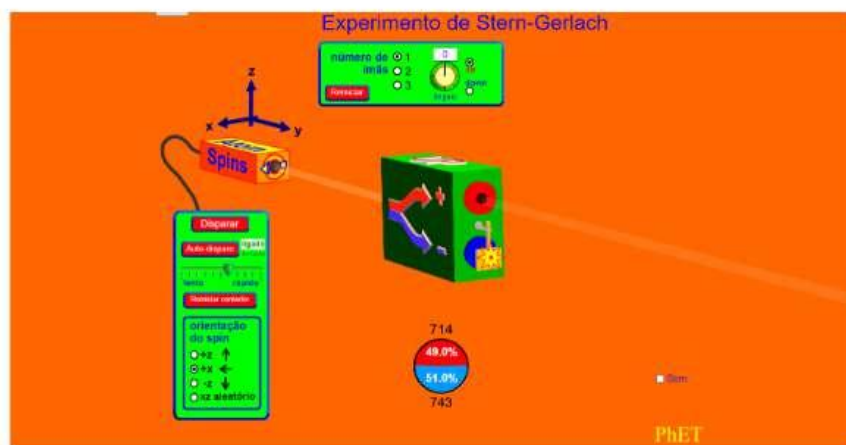
A nona pergunta (figura 56) não segue necessariamente uma das etapas do POE. O objetivo da pergunta é trabalhar com os estudantes a notação de Dirac. Para isso, foi feita

uma breve discussão entre os estudantes, na qual foi estabelecida a seguinte convenção: *spin* para cima será representado por $|0\rangle$ e *spin* para baixo por $|1\rangle$.

Ressaltamos que, para os alunos, não foi explicitamente mencionado que se tratava da notação de Dirac, mas apenas que era uma representação para os *spins*. Também destacamos que não foi informado aos alunos que os símbolos $|0\rangle$ e $|1\rangle$ representavam os *brackets*. O intuito era observar se os estudantes conseguiam escrever o estado presente no experimento de Stern-Gerlach utilizando uma notação moderna, sem que todos os seus formalismos fossem discutidos.

Figura 56 – Pergunta 9 do Questionário 1

O sistema na configuração abaixo (antes e após a passagem dos átomos pelo campo magnético) pode ser representado na nossa notação de que forma?



Fonte: Elaboração Própria.

Alguns alunos não compreenderam que se tratava de uma pergunta com um “antes” e um “depois” e realizaram apenas uma das representações.

- **Aluno 1** - “50% $|1\rangle$, 50% $|0\rangle$ ”.
- **Aluno 4** - “Para cima $|0\rangle$, para baixo $|1\rangle$. São 50%”.
- **Aluno 12** - “ $|1\rangle$ fora”.
- **Aluno 15** - “ $|1\rangle$ para cima”.

Algumas respostas destoam da notação apresentada.

- **Aluno 9** - “Para cima (0), para baixo (1). São 50%”.
- **Aluno 14** - “Para cima $x = \pm 50\%$, para baixo $x = \pm 50\%$ ”.

- **Aluno 20** - “ $|5\rangle$ para cima e $|3\rangle$ para baixo. Passa em maior quantidade na parte de cima”.

Pelo que foi observado, o aluno 9, além de não representar o estado para ambas as situações (antes e depois), também não utilizou a simbologia que foi apresentada, optando por usar parênteses. Os demais alunos também não representaram o estado para ambas as situações e apresentaram respostas que fogem do que foi proposto.

No caso do aluno 14, ele utilizou um $\pm$, o que pode ter sido confundido com os sinais dos ímãs. Não conseguimos entender o que o aluno 20 quis representar, uma vez que a notação adotada em momento algum incluiu $|5\rangle$ e $|3\rangle$.

Uma parcela significativa de alunos não soube ou não conseguiu representar o estado utilizando a notação apresentada.

- **Aluno 2** - “Não entendi”.
- **Aluno 3** - “Não sei”.
- **Aluno 7** - “Não sei dizer”.
- **Aluno 8** - “Não sei”.
- **Aluno 10** - “Não sei explicar pois não entendi”.
- **Aluno 13** - “Não sei”.
- **Aluno 19** - “Não sei”.
- **Aluno 21** - “Não sei”.

Destacamos as respostas que mais se aproximam da representação correta dos estados.

- **Aluno 16** - “ $|x\rangle$ antes de passar. Para cima $|0\rangle$ e para baixo $|1\rangle$ ”.
- **Aluno 17** - “Antes de passar tanto 0 quanto 1 pois tem 50% de probabilidade e depois de passar “se converte” para colapsar”.
- **Aluno 18** - “ Antes $|0, 1\rangle$ e depois para cima $|0\rangle$ e para baixo $|1\rangle$ ”.
- **Aluno 22** - “Antes de passar: 50% $|0\rangle$ e 50% $|1\rangle$, depois de passar para cima $|0\rangle$ e para baixo $|1\rangle$ ”.

Entendemos que, ao representar $|x\rangle$, o aluno 16 quis abordar a ideia de superposição do estado antes de passar por uma medição. Na fala do aluno 17, o termo “colapso” é mencionado, assim como a ideia de superposição ao afirmar: “Antes de passar, tanto 0 quanto 1, pois tem 50% de probabilidade.” O aluno 18 também chega a uma resposta próxima do que, de fato, é correto.

O aluno 22 é o que apresenta a resposta mais coesa, representando o que, de fato, ocorre com o estado antes e depois da passagem dos *spins*. Ele demonstra cuidado ao explicitar que, após passar pelo ímã, o estado assume uma certa representação, diferente da sua antes da passagem e que esta representação está atrelada ao local, ou seja, se passou por cima, a representação é $|0\rangle$ e por baixo $|1\rangle$, o que sugere que a ideia de colapso pode ter sido compreendida por este estudante.

Em algumas respostas dos alunos presentes nos dois primeiros encontros, foi possível observar que alguns afirmaram não saber responder às questões propostas. Essa possibilidade foi prevista desde o início da aplicação do produto: caso o estudante realmente não soubesse, poderia sinalizar essa condição, pois o objetivo não era obter respostas corretas, mas investigar as potencialidades da sequência didática.

Sobre o “não saber”, Mortimer (1996) discute a importância das lacunas no processo de aprendizagem. Segundo o autor, uma das etapas fundamentais do desenvolvimento cognitivo envolve justamente a identificação e exploração dessas lacunas — aspecto (segundo o autor) frequentemente negligenciado em abordagens fortemente influenciadas pela perspectiva piagetiana.

A etapa das lacunas permite ao professor reconhecer que, de fato, há incompreensões por parte do estudante e que, talvez, o conflito cognitivo ainda nem tenha sido instaurado, uma vez que o aluno sequer compreendeu os conceitos básicos envolvidos.

5.2 ENCONTRO 3

Inicialmente, a sequência didática foi planejada para conter cerca de cinco encontros, cada um correspondendo a uma aula de 50 minutos. No entanto, o quinto encontro não ocorreu, pois os encontros 3 e 4, previstos inicialmente, foram unificados em um único encontro, denominado encontro 3. Esses dois encontros estavam destinados à discussão de tópicos relacionados à área da relatividade, com ênfase em conceitos fundamentais do espaço-tempo, entre os quais destacamos: eventos, causalidade e quebra de causalidade. Devido a alguns detalhes na aplicação, esses encontros, que utilizavam a metodologia de Instrução entre Pares, foram realizados em uma única aula.

No início do terceiro encontro, foi explicada aos estudantes a estrutura da metodologia de Instrução entre Pares. O objetivo era descrever todo o preceito metodológico, especialmente em relação às etapas e às porcentagens de acerto da turma. Além disso,

foi solicitado aos estudantes que não compartilhassem os resultados entre si, especialmente em voz alta, mas que se limitassem a discutir as hipóteses, para evitar qualquer comprometimento da metodologia.

Após essas orientações, os alunos foram introduzidos a uma breve discussão, com o auxílio do quadro, guiada sobre alguns dos tópicos mencionados anteriormente. O objetivo era apresentar esses conceitos antes de iniciarmos as perguntas.

Foi apresentado aos alunos o conceito de evento, utilizando estalos como exemplo. Os estalos representavam um evento que evoluía ao longo do espaço-tempo. Discutimos como esse estalo poderia ser representado graficamente, utilizando coordenadas espaciais e temporais para introduzir o eixo espaço-tempo.

A partir disso, exploramos a ideia de referenciais e de linhas de universo em diferentes situações, como, por exemplo, uma partícula em repouso, uma partícula com velocidade constante de $0,2c$ e, por fim, um raio de luz.

Durante essa construção, foi apresentado aos estudantes que a velocidade da luz é a mesma em todos os referenciais. Em seguida, discutimos a inclinação dos eixos espaço-tempo por meio do conceito de Simultaneidade de Einstein e utilizando como exemplo uma partícula que se move com velocidade constante de $0,2c$ sendo observada de outro referencial.

Essa discussão foi fundamental para a introdução do simulador de diagramas espaço-tempo utilizado nas aulas (figura 57). Além disso, também foram abordados brevemente os controles do simulador.

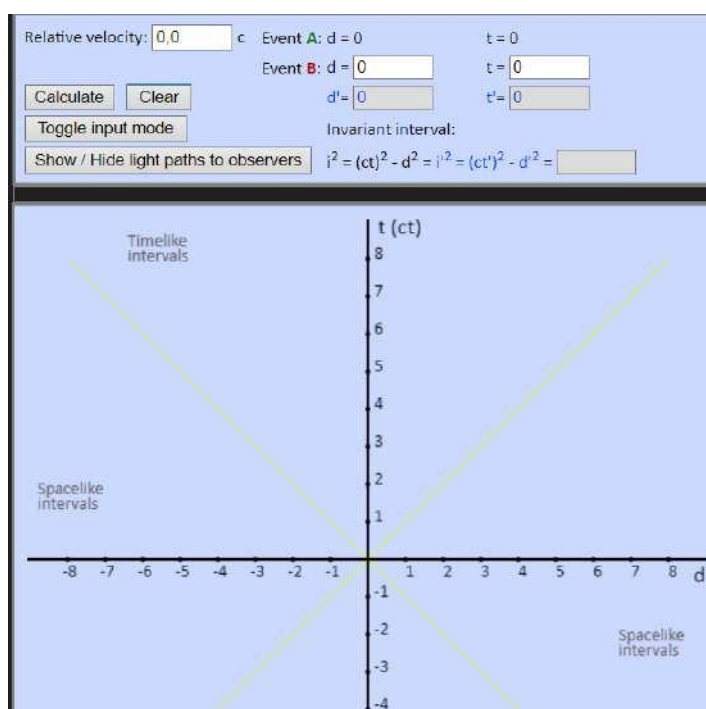
As perguntas foram estruturadas com base na metodologia de Instrução entre Pares. Para a coleta de respostas, utilizamos o aplicativo Plickers. Cada aluno possuía um *QR code* vinculado, por meio do qual marcava suas alternativas ao longo das perguntas. Esse método facilitava a obtenção das estatísticas de porcentagem de acertos, um aspecto fundamental para a metodologia empregada. Foram realizadas aproximadamente cinco perguntas. Inicialmente, o plano era dividir as três primeiras perguntas no encontro 3 e as duas restantes no encontro 4.

A primeira pergunta (figura 58) não precisou ser repetida, pois obteve aproximadamente 93% de acertos logo na primeira tentativa. A segunda pergunta (figura 59) teve cerca de 75% de acertos e também não precisou ser repetida. A repetição só se tornou necessária a partir da terceira pergunta.

Na terceira pergunta (figura 60), os alunos inicialmente obtiveram uma taxa de acerto inferior a 70%, o que levou à solicitação de uma breve discussão entre as equipes sobre as hipóteses, para que fosse realizada uma nova leitura.

Chicon, Quaresma e Garcês (2018) apontam também dificuldades na aplicação da metodologia, sobretudo no que diz respeito à conversas paralelas, fato que também se fez

Figura 57 – Simulador de diagramas espaço-tempo



Fonte: Captura de tela do simulador de diagramas espaço-tempo de Minkowski. Disponível em: <http://www.trell.org/div/minkowski.html>. Evensen (2002).

presente em nosso trabalho.

Nesta nova leitura, a taxa de acerto também permaneceu abaixo de 70%, o que resultou em mais uma rodada de discussão e uma nova leitura das respostas. Nesse momento, os estudantes demonstraram certa ansiedade para avançar e, em vez de realizar as discussões, começaram a simplesmente compartilhar as respostas entre si, com o objetivo de prosseguir para a próxima questão.

Como essa atitude prejudicaria a metodologia, os alunos foram orientados a não repetir esse comportamento e a focar na discussão conceitual. Essa foi a pergunta em que os alunos tiveram maior dificuldade, sendo necessárias três leituras ao todo.

Antes da quarta pergunta (figura 61), foi realizada uma breve formalização. Foi apresentado aos estudantes que, até aquele momento, os eventos que haviam observado tinham uma natureza causal, a qual foi ilustrada por meio dos diagramas presentes nas perguntas. Após essa breve discussão, seguimos para a quarta pergunta, que precisou ser realizada em duas leituras. Na segunda leitura, os alunos alcançaram 86% de acerto.

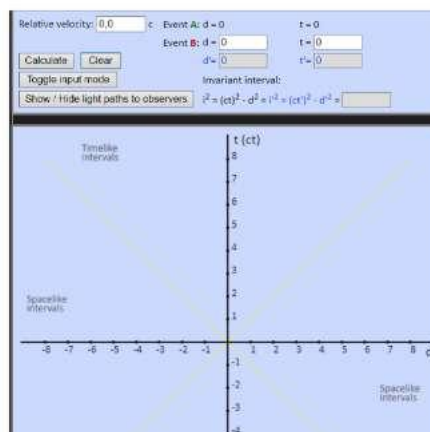
Ao final da quarta pergunta, discutimos que os eventos presentes nela, ao contrário dos anteriores, eram eventos em que ocorria a quebra de causalidade. Assim, apresentamos a ideia de quebra de causalidade, ilustrando com alguns exemplos.

Os alunos já estavam ansiosos na terceira pergunta, e a cada repetição, essa

Figura 58 – Pergunta 1 - Instrução entre Pares

O que vai acontecer no referencial linha se colocarmos um evento B com $d = 2$, $t = 4$ e velocidade relativa igual à zero?

- ☐ A O evento B ocorre depois de A e tem coordenadas diferentes do referencial d, ct.
- ☐ B O evento B ocorre antes de A e tem coordenadas diferentes do referencial d, ct.
- ☒ C O evento B ocorre depois de A e tem as mesmas coordenadas do referencial d, ct.
- ☐ D O evento B ocorre antes de A e tem as mesmas coordenadas do referencial d, ct.

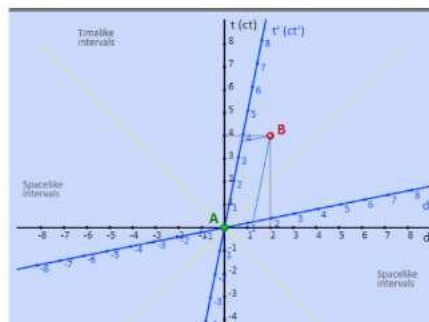


Fonte: Elaboração Própria.

Figura 59 – Pergunta 2 - Instrução entre Pares

Com base no exemplo anterior (evento A com $d = 2$, $t = 4$) e considerando agora uma velocidade relativa de $0,2c$, o que vai acontecer que vai acontecer no referencial linha?

- ☒ A O evento B ocorre depois de A e tem coordenadas diferentes do referencial d, ct.
- ☐ B O evento B ocorre antes de A e tem coordenadas diferentes do referencial d, ct.
- ☐ C O evento B ocorre depois de A e tem as mesmas coordenadas do referencial d, ct.
- ☐ D O evento B ocorre antes de A e tem as mesmas coordenadas do referencial d, ct.



Fonte: Elaboração Própria.

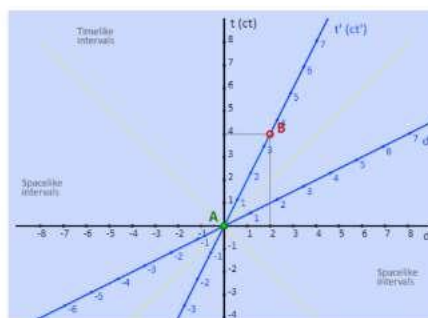
ansiedade aumentava. Essa expectativa teve um impacto direto na quinta pergunta (figura 62). Muitos, devido ao desejo de terminar mais cedo, responderam à pergunta de qualquer maneira. Foi a pergunta que, na primeira leitura, gerou o menor número de acertos, totalizando 46%.

Devido à ansiedade dos alunos, na parte do levantamento de hipóteses, muitos buscaram apenas acelerar o processo para obter o resultado, sem realizar adequadamente a discussão conceitual. Esse comportamento foi um dos fatores que contribuiu para que o que estava planejado para cinco encontros fosse realizado em apenas quatro, com os encontros 3 e 4 sendo combinados em um único encontro (encontro 3).

Figura 60 – Pergunta 3 - Instrução entre Pares

Seguindo o exemplo anterior (**evento A com $d = 2$, $t = 4$**), substituindo a velocidade relativa de $0,2c$ para $0,5c$ é correto afirmar que:

- A** No ref. linha o "sinal" está se movendo com $0,5c$.
- B** No ref. linha "sinal" está em repouso.
- C** No ref. linha os eventos são simultâneos porque estão sob o eixo temporal.
- D** Os eventos são simultâneos em ambos os referenciais.

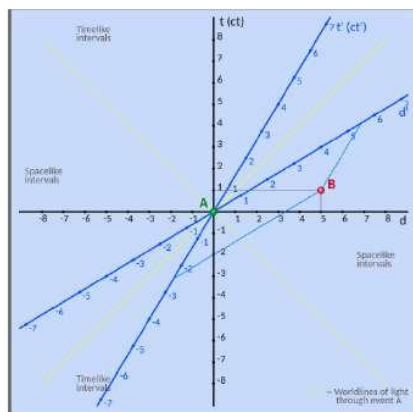


Fonte: Elaboração Própria.

Figura 61 – Pergunta 4 - Instrução entre Pares

No caso ao lado (**evento B com $d = 5$, $t = 1$ e velocidade relativa de $0,6c$**), o que pode-se dizer sobre os eventos A e B?

- A** O evento B ocorre após o A em ambos os referenciais.
- B** Não sei.
- C** Os eventos são simultâneos no ref. linha.
- D** O evento B ocorre antes do evento A no ref. linha.



Fonte: Elaboração Própria.

A ansiedade na quinta pergunta foi tão evidente que, mesmo alguns alunos tendo respondido corretamente, demonstraram insatisfação. Algumas falas expressaram esse desconforto, como:

- “Não é possível que o número de acertos foi tão baixo, como o pessoal marcou isso?”
- “É sério isso? Depois de tudo isso?”

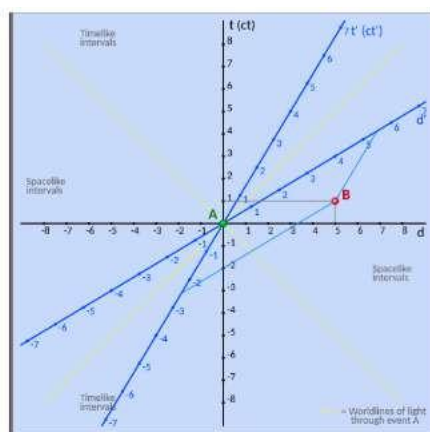
Os alunos, então, devido ao horário, foram liberados, e a quinta pergunta foi refeita no início do encontro 4, alcançando cerca de 83% de acertos.

Figura 62 – Pergunta 5 - Instrução por Pares

Suponha que A é a emissão de um sinal com velocidade maior do que a luz, causando o evento B. (Uma situação análoga seria A como um raio infravermelho emitido para ligar uma televisão por controle remoto. A TV liga quando o recebe o sinal no evento B).

Voltando para a nossa situação hipotética, o que podemos dizer?

- ☒ **A** A TV ligaria antes do controle ser acionado.
- ☐ **B** A TV ligaria após o controle ser acionado.
- ☐ **C** A TV não liga por conta do tipo de raio emitido.
- ☐ **D** A TV liga instantaneamente ao acionar o controle.



Fonte: Elaboração Própria.

Ao longo dessa etapa, os alunos apresentaram muitas dificuldades, tanto em relação à aplicação metodológica quanto às dificuldades conceituais. Acreditamos que parte dessas dificuldades esteja diretamente ligada ao nível de abstração exigido para a área de relatividade. Apesar do uso do simulador para os diagramas, ele não possui o mesmo apelo do simulador do Phet Colorado. Infelizmente, devido ao tempo limitado para a aplicação e à dificuldade de aplicar o produto em outro local, não foi possível realizar mudanças nesta parte da sequência didática, nem uma reaplicação.

Com relação às dificuldades conceituais, De Carvalho (1983) destaca a importância de se compreender as limitações dos estudantes. No entanto, ressalta-se que o professor também não deve se restringir a ensinar apenas dentro de um determinado nível de conhecimento. Assim, mesmo diante das dificuldades identificadas, a apresentação desses conteúdos aos estudantes configurou-se como uma oportunidade de desenvolvimento conceitual em uma área pouco abordada da física no ensino médio e que merece atenção.

Apesar das dificuldades encontradas, observamos nos depoimentos dos estudantes argumentos promissores, como no registro abaixo.

- **A3** - Nesta questão (questão 5), a quebra de causalidade será aplicada.
- **P** - Beleza, continue seu raciocínio.
- **A3** - A única alternativa que apresenta quebra de causalidade é a A. Assim, nessa situação (sinal emitido com velocidade superior à da luz), a TV ligaria antes de apertarmos o controle.
- **A4** - Essa é meio óbvia, é como se eu nascesse antes da minha mãe.

5.3 ENCONTRO 4

O quarto encontro finalizou a sequência didática. Os momentos iniciais foram usados para uma breve recapitulação do que foi discutido anteriormente e para a retomada da última pergunta do encontro anterior. Após a verificação das respostas, foi realizada uma breve discussão sobre a possibilidade de existirem situações com velocidades superiores à da luz, utilizando os exemplos de quebra de causalidade como base.

Em seguida, foi entregue o Questionário 2, que contém duas perguntas: uma mista e outra aberta. Para este encontro, nos apoiamos na metodologia POE, e o intuito era discutir o fenômeno do emaranhamento quântico.

Foi apresentado o arranjo da figura 63 aos estudantes e realizada a primeira pergunta (figura 64), que corresponde à etapa de **Predizer**. Neste arranjo, **B representa as iniciais do laboratório de Bruno e P as iniciais para o laboratório de Patrick**.

Figura 63 – Arranjo do par emaranhado



Fonte: Ilustração gerada com auxílio do ChatGPT (OpenAI), a partir de descrição textual fornecida pelo autor. OpenAI (2025).

A figura 65 apresenta a distribuição das respostas dos estudantes. Percebe-se que a turma convergiu para a alternativa C, que é a opção que está alinhada com o que realmente ocorre no fenômeno. Acreditamos que as configurações anteriores estudadas do Stern-Gerlach e a notação que adotamos para representar os estados (Notação de Dirac) facilitaram o alto número de respostas corretas assinaladas.

Quanto às justificativas dessa alternativa, alguns alunos não justificaram ou não souberam justificar, como é o caso dos alunos 2, 9 e 11.

Alguns alunos ainda consideram o resultado ‘*spin up*’ e ‘*spin down*’ como absolutos.

- **Aluno 3** - “Sempre um átomo estará para cima e outro para baixo”.

Figura 64 – Pergunta 1 do Questionário 2

Pergunta 1

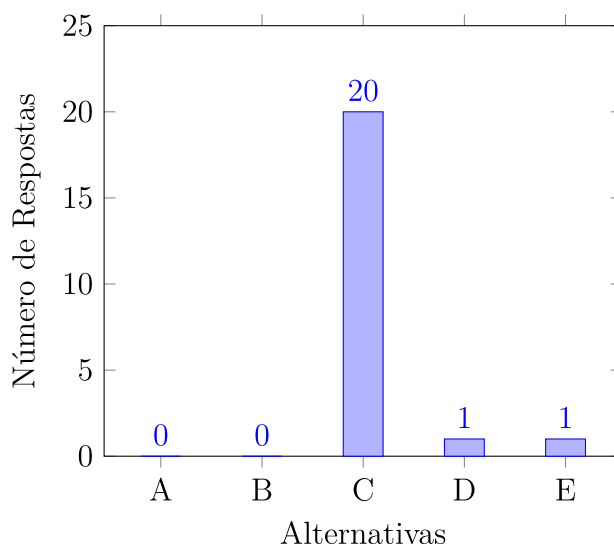
Suponha o arranjo do Stern-Gerlach acima, com duas pessoas localizadas numa distância elevadíssima (uma no Japão e a outra no Brasil, por exemplo). O que pode ocorrer?

- a) Ambos receberão o átomo apontando “para cima”
- b) Ambos receberão o átomo apontando “para baixo”
- c) Um receberá o átomo apontando “para cima” e o outro “para baixo”
- d) O átomo ficará perdido por conta da distância, não sendo possível medir em um dos casos
- e) nenhuma das alternativas listadas acima (explicação na justificativa)

Justificativa:

Fonte: Elaboração Própria.

Figura 65 – Distribuição das Respostas da Pergunta 1 do Questionário 2



Fonte: Ilustração gerada com auxílio do ChatGPT (OpenAI), a partir de descrição textual fornecida pelo autor. OpenAI (2025).

- **Aluno 17** - “Porque ele sempre será para baixo e para cima, porque B está para cima e P está para baixo, a distância não importa”.
- **Aluno 22** - “Eles sempre serão opostos”.
- **Aluno 25** - “Sempre serão opostos”.

O colapso também foi utilizado como argumento de justificativa.

- **Aluno 12** - “Pois uma vez que uma partícula é medida em um estado específico, a outra medida é colapsada instantaneamente no estado oposto”.

- **Aluno 26** - “Um receberá o átomo apontando para cima e o outro para baixo, pois uma vez que uma partícula é medida em um estado específico, a outra é colapsada instantaneamente no estado oposto”.

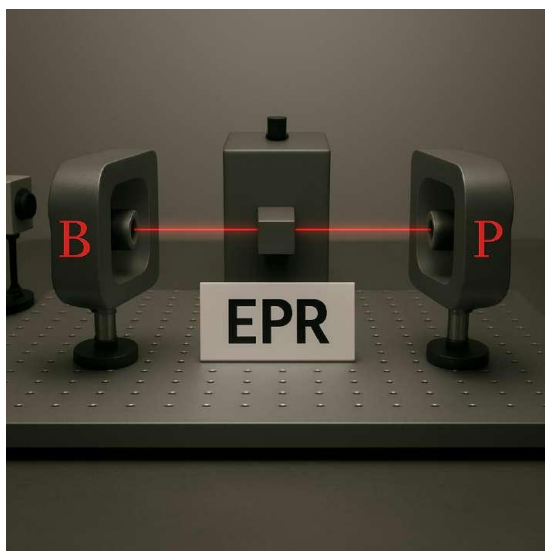
Gostaríamos de destacar os argumentos dos alunos 13 e 23.

- **Aluno 13** - “Uma vai medir ‘para cima’ e a outra ‘para baixo’, isso acontece porque as partículas estão emaranhadas, então, quando uma delas é medida de um jeito, a outra automaticamente fica no sentido oposto”.
- **Aluno 23** - “Porque o arranjo acima diz que se um passar em cima o outro passará embaixo”.

O aluno 13 traz um elemento novo, que sequer havia sido mencionado, que é o emaranhamento, apresentando uma resposta bem coesa e completa em relação ao emaranhamento quântico. Já o aluno 23 reforça o argumento anterior, de que a notação também facilitou a compreensão.

A etapa de **Observar** foi realizada com a revelação de parte do arranjo inicial do Stern-Gerlach (figura 66). etapa de **Explicar** foi realizada por meio da segunda pergunta do questionário. O intuito era discutir os princípios do emaranhamento quântico.

Figura 66 – Compartilhamento de um par emaranhado entre dois laboratórios



Fonte: Ilustração gerada com auxílio do ChatGPT (OpenAI), a partir de descrição textual fornecida pelo autor. OpenAI (2025).

Figura 67 – Pergunta 2 do Questionário 2

Pergunta 2

Se o medido no laboratório do Bruno foi “cima”, qual seria a medida no laboratório de Patrick?

Uma medida pode influenciar instantaneamente no que ocorre no outro laboratório?

Fonte: Elaboração Própria.

Todos os alunos responderam corretamente que a medição no laboratório de Patrick seria “baixo”. De modo geral, os alunos também assinalaram que uma medição pode influenciar instantaneamente a outra. Após essa etapa, realizamos a formalização, discutindo nos momentos iniciais da aula a ideia central do emaranhamento, bem como a influência da velocidade da luz na questão da influência instantânea.

Percebemos que este encontro, assim como os primeiros, foi mais fluido, com os alunos apresentando menos dificuldades, observações e argumentos mais consistentes do que no terceiro encontro. Mesmo sem simuladores, acreditamos que o apelo visual do aparato do Stern-Gerlach, juntamente com a inserção prévia desses tópicos, contribuiu para um número menor de dificuldades por parte dos estudantes.

Acredita-se que uma reestruturação da sequência, em uma futura reaplicação, poderá gerar resultados mais consistentes. Limitações relacionadas ao tempo disponibilizado pela instituição anfitriã impossibilitaram o retorno em determinadas etapas, o que restringiu algumas possibilidades de intervenção e análise. Ainda assim, considera-se que algumas medidas possam contribuir significativamente para o aprimoramento da proposta.

A primeira delas diz respeito à utilização de analogias-ponte (Sasaki; Jesus, 2017). Uma das principais dificuldades observadas no início da sequência foi a compreensão dos fenômenos envolvidos no experimento de Stern–Gerlach. Assim, a introdução de uma analogia-ponte — por exemplo, entre a emissão de espectros contínuos e discretos — antes da etapa de explicação poderia favorecer a construção de significados pelos estudantes.

Outra possibilidade seria a adoção da metodologia de Ensino sob Medida (Araujo; Mazur, 2013), em conjunto com a Instrução entre Pares, nos conteúdos relativos à relatividade. Nessa abordagem, os estudantes receberiam previamente um material de apoio para estudo em casa, acompanhado de questões com o intuito de acessar seus conhecimentos prévios e, de certo modo, tornar o conteúdo menos denso durante os encontros presenciais.

A tabela 2 apresenta uma possível adaptação na estrutura da sequência didática de acordo com o proposto anteriormente.

Tabela 2 – Sugestão de adaptação na sequência didática para reaplicações

Encontro	Atividades	Metodologia	Duração
1	Apresentação do produto educacional, introdução ao experimento de Stern-Gerlach, discussão dos conceitos de superposição.	POE	50 minutos
2	Discussão dos conceitos de superposição e colapso da função de onda (via Stern-Gerlach).	POE	50 minutos
3	Apresentação de diferentes arranjos do Stern-Gerlach.	POE	50 minutos
4	Apresentação de diferentes arranjos do Stern-Gerlach, inserção da notação de Dirac.	POE	50 minutos
5	Discussão sobre referenciais, eventos, linhas de universo (assíncrono).	Ensino sob Medida	Online
6	Discussão sobre referenciais, eventos, linhas de universo	Instrução entre Pares	50 minutos
7	Discussão sobre causalidade e quebra de causalidade (assíncrono).	Ensino sob Medida	Online
8	Discussão sobre causalidade e quebra de causalidade.	Instrução entre Pares	50 minutos
9	Retomada dos conceitos anteriores, discussão acerca do fenômeno de emaranhamento quântico (via Stern-Gerlach) e encerramento da sequência didática.	POE	50 minutos

Fonte: Elaboração Própria.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, tivemos como objetivo investigar possibilidades para o ensino de conceitos da mecânica quântica associados aos fenômenos de emaranhamento e indícios de não-localidade, além de tópicos como superposição, notação de Dirac, colapso da função de onda e quebra de causalidade. A proposta foi construída com base nas metodologias POE (Predizer, Observar, Explicar) e Instrução entre Pares, fundamentadas na perspectiva construtivista de Piaget, em especial em suas ideias sobre o conflito cognitivo.

As respostas obtidas apontam para a potencialidade da sequência didática na abordagem de tópicos como superposição, colapso da função de onda, notação de Dirac e emaranhamento quântico. O caráter ilustrativo e interativo do simulador utilizado no experimento de Stern–Gerlach, aliado à estrutura da metodologia POE e aos conflitos cognitivos gerados em cada etapa, mostrou-se eficaz na mediação da compreensão de conceitos altamente abstratos, geralmente associados a formalismos matemáticos e notações complexas para estudantes do ensino médio. A partir das explanações escritas e orais, foi possível observar um alinhamento crescente entre os estudantes e os conceitos abordados.

Apesar dos resultados promissores, constatou-se uma dificuldade significativa por parte dos estudantes na compreensão dos conceitos relacionados à linha de universo, especialmente quando se tratava de eventos em referenciais distintos. Mesmo com o uso de simuladores de diagramas de Minkowski, inferimos que o elevado grau de abstração envolvido nesse conteúdo influenciou diretamente na dificuldade de assimilação por parte dos alunos.

Ainda nessa etapa da proposta, identificamos uma limitação na aplicação da Instrução entre Pares: a ocorrência de conversas paralelas comprometeu a dinâmica proposta, possivelmente gerando resultados enviesados e enfraquecendo o principal objetivo do método, que é a construção colaborativa do conhecimento por meio da discussão e do levantamento de hipóteses em grupo. Infelizmente, o tempo reduzido disponível para a sequência — em decorrência de limitações da instituição anfitriã — impossibilitou um retorno mais cuidadoso a essa etapa, o que poderia ter contribuído para um aprofundamento mais efetivo das discussões e da aplicação metodológica.

Mesmo diante da complexidade e da abstração dos temas, ao longo da sequência didática a maioria dos estudantes demonstrou interesse e curiosidade, o que reforça o potencial de abordagens didáticas baseadas em metodologias ativas. Além disso, os resultados evidenciam a necessidade de inserção de tópicos de física moderna e contemporânea no contexto escolar, especialmente considerando que muitos dos avanços tecnológicos atuais — e certamente futuros — estão fundamentados nos conceitos da teoria quântica. Tal abordagem aproxima o conteúdo escolar do universo dos discentes, conferindo maior relevância ao aprendizado da física.

Este estudo contribui ao sugerir uma abordagem mais acessível à mecânica quântica, especialmente no que se refere à complexidade matemática, às notações formais e ao elevado grau de abstração característico da teoria, articulando a inserção desses temas por meio de simuladores e metodologias que colocam o estudante em posição ativa na construção do conhecimento.

Recomenda-se a replicação desta proposta em outras séries ou instituições, com possíveis adaptações na estrutura da sequência didática, como a ampliação do tempo dedicado aos encontros, inserção de novos métodos (como proposto na seção anterior) e o reforço de estratégias para a abordagem de conteúdos mais abstratos, especialmente em contextos com recursos limitados. Sugere-se ainda a aplicação da proposta junto a estudantes de cursos de graduação nas áreas de Ciências Exatas que têm contato com a mecânica quântica, particularmente licenciandos em física, considerando as recorrentes dificuldades conceituais enfrentadas por esses estudantes (Greca; Moreira, 2001) e em consequência, possíveis lacunas na formação deste licenciando (Siqueira, 2012).

REFERÊNCIAS

- AMARAL, B.; BARAVIERA, A. T.; CUNHA, M. O. T. **Mecânica quântica para matemáticos em formação**. Rio de Janeiro: IMPA, 2011. Disponível em: https://impa.br/wp-content/uploads/2017/04/28CBM_12.pdf. Acesso em: 30 jul. 2024.
- ARAUJO, I. S.; MAZUR, E. Instrução pelos colegas e ensino sob medida: uma proposta para o engajamento dos alunos no processo de ensino-aprendizagem de Física. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 30, n. 2, p. 362-384, ago. 2013. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/85464>. Acesso em: 2 fev. 2025.
- ASPECT, A.; CLAUSER, J. F.; ZEILINGER, A. The Nobel Prize in Physics 2022. **Nobel Prize Official Website**, 2022. Disponível em: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2022/summary/>. Acesso em: 5 mar. 2025.
- BARDIN, L. **Análise de conteúdo**. São Paulo: Edições 70, 2011.
- BRASIL. Ministério da Educação. Secretaria da Educação Básica. **Base nacional comum curricular**. Brasília, DF, 2016. Disponível em: <https://basenacionalcomum.mec.gov.br/>. Acesso em: 28 jan. 2025.
- CASTAÑON, G. O que é construtivismo? **Cadernos de História e Filosofia da Ciência**, v. 1, n. 2, p. 209-242, 2015. Disponível em: <https://www.cle.unicamp.br/eprints/index.php/cadernos/article/view/744/627>. Acesso em: 10 jan. 2025.
- CHICON, P. M.; QUARESMA, C. R.; GARCÊS, S. B. Aplicação do método de ensino peer instruction para o ensino de lógica de programação com acadêmicos do curso de ciência da computação. *In: Anais do 5º SENID*. Cruz Alta: UNICRUZ, 2018. Disponível em: https://www.upf.br/_uploads/Conteudo/senid/2018-artigos-completos/179081.pdf. Acesso em: 2 fev. 2025.
- CROUCH, C. H.; MAZUR, E. Peer Instruction: Ten years of experience and results. **American Journal of Physics**, v. 69, n. 9, p. 970-977, 2001. Disponível em: <https://sites.stat.columbia.edu/gelman/communication/CrouchMazur2001.pdf>. Acesso em: 3 fev. 2025.
- CUNHA, M. O. T. **Noções de Informação Quântica**. Rio de Janeiro: IMPA, 2007. Disponível em: https://library.impa.br/cbm/26CBM/26CBM_11.pdf. Acesso em: 30 jul. 2024.
- DA ROSA, C. T. W.; DE PINHO ALVES FILHO, J. Ferramentas didáticas metacognitivas: Alternativas para o ensino de física didatic tools metacognitions: Alternatives for the education of physics. *In: Anais do XI Encontro de Pesquisa em Ensino de Física*. Curitiba, 2008. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Cleci-Rosa/publication/272678779_XI_Encontro_de_Pesquisa_em_Ensino_de_Fisica_-_Curitiba_-_2008_FERRAMENTAS_DIDATICAS_METACOGNITIVAS_ALTERNATIVAS_PARA_O_ENSINO_DE_FISICA_DIDATIC_TOOLS

LS_METACOGNITIONS_ALTERNATIVES_FOR_THE_EDUCATION_OF_P/links/54eb4bb10cf2082851bd7fec/XI-Encontro-de-Pesquisa-em-Ensino-de-Fisica-Curitiba-2008-FERRAMENTAS-DIDATICAS-METACOGNITIVAS-ALTERNATIVAS-PARA-O-ENSINO-DE-FISICA-DIDATIC-TOOLS-METACOGNITIONS-ALTERNATIVES-FOR-THE-EDUCATION-OF-P.pdf.

Acesso em: 4 fev. 2025.

DA SILVA, S. A. Conflito cognitivo: Herói ou vilão? **Schème: Revista Eletrônica de Psicologia e Epistemologia Genéticas**, v. 4, n. 1, p. 209-238, 2012. Disponível em: <https://revistas.marilia.unesp.br/index.php/scheme/article/view/2403/1956>. Acesso em: 12 jan. 2025.

DE CARVALHO, A. M. P. Piaget e o Ensino de Ciências. **Revista da Faculdade de Educação**, v. 9, n. 1-2, p. 55-77, 1983. Disponível em: <http://educa.fcc.org.br/pdf/rfe/v9n1-2/v9n1-2a06.pdf>. Acesso em: 18 jan. 2025.

DE OLIVEIRA, P. R. S. A construção social do conhecimento no ensino-aprendizagem de química. *In: Anais do IV Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências*. 2003. Disponível em: https://fep.if.usp.br/~profis/arquivo/encontro_s/enpec/ivenpec/Arquivos/Painel/PNL007.pdf. Acesso em: 6 fev. 2025.

DE OLIVEIRA LIMA, L. **Por que Piaget?: A educação pela inteligência**. Petrópolis: Vozes, 1999.

DE OLIVEIRA SILVA; D., SALES, G. L.; DE CASTRO, J. B. A utilização do aplicativo plickers como ferramenta na implementação da metodologia Peer Instruction. **Revista Eletrônica Científica Ensino Interdisciplinar**, Mossoró, v. 4, n. 12, nov. 2018. Disponível em: <https://periodicos.apps.uern.br/index.php/RECEI/article/view/1708/1667>. Acesso em: 5 fev. 2025.

DIESEL, A.; BALDEZ, A. L. S.; MARTINS, S. N. Os princípios das metodologias ativas de ensino: uma abordagem teórica. **Revista Thema**, v. 14, n. 1, p. 268-288, 2017. Disponível em: <http://penta3.ufrgs.br/Flipped/oficina/0s%20principios%20da%20metodologias%20ativas%20-%202017.pdf>. Acesso em: 25 jan. 2025.

EINSTEIN, A.; PODOLSKY, B.; ROSEN, N. Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? **Physical Review**, v. 47, n. 10, p. 777-780, 1935.

EL-HANI, C. N.; BIZZO, N. M. V. Formas de construtivismo: mudança conceitual e construtivismo contextual. **Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências**, Belo Horizonte, v. 4, n. 12, 2002. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/epec/a/cPwqgZsJLJsg9qZLYzYJDQb/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 12 jan. 2025.

EVENSEN, K. An interactive Minkowski diagram/spacetime diagram. Disponível em: <http://www.trell.org/div/minkowski.html>. Acesso em: 7 set. 2024.

FERRACIOLI, L. Aprendizagem, desenvolvimento e conhecimento na obra de Jean Piaget: uma análise do processo de ensino-aprendizagem em Ciências. **Revista Brasileira de Estudos Pedagógicos**, v. 80, n. 194, p. 5-18, 1999.

GOMES, G. G.; PIETROCOLA, M. O experimento de Stern-Gerlach e o spin do elétron: um exemplo de quasi-história. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 33, p. 2604, 2011.

GRECA, I. M.; MOREIRA, M. A. Uma revisão da literatura sobre estudos relativos ao ensino da mecânica quântica introdutória. **Investigações em Ensino de Ciências**, Porto Alegre, v. 6, n. 1, p. 29-56, 2001.

GROSSI, R. *et al.* One Hundred Years Later: Stern-Gerlach Experiment and Dimension Witnesses. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 45, p. e20220227, 2023.

Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/rbef/a/c853qYKN8NCsMXjvw7Pqdns/?lang=en>. Acesso em: 1 ago. 2024.

GUANDALIN, C. M. **Introdução à cosmologia física**. Notas de aula. USP: São Paulo, 2018. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4397821/mod_resource/content/1/MC1.pdf#:~:text=temos%20um%20intervalo%20do%20tipo,ti po%20espaço%20estático%20causalmente%20desconectados. Acesso em: 3 set. 2024.

KOEHLER, S. M. F. Inovação didática-projeto de reflexão e aplicação de metodologias ativas de aprendizagem no ensino superior: uma experiência com “peer instruction”.

Janus, v. 9, n. 15, 2012. Disponível em:

https://www.fatecead.com.br/ativas/parte09/texto09_01.pdf. Acesso em: 4 fev. 2025.

LA PHYSIQUE AUTREMENT. Spin : Stern and Gerlach experiment. 2012. Disponível em: <https://youtu.be/rg4Fnag4V-E?si=GB6s9EGZezKGBkaS> Acesso em: 10 set. 2024.

LAVILLE, C.; DIONE, J. **A construção do saber**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 1999.

LESCHE, B. **Teoria da relatividade**. Editora Livraria da Física, 2005.

LI, Y. (2020). Methods of Generating Entangled Photon Pairs. *In Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, p. 012172, 2020. Disponível em:

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1634/1/012172/pdf>. Acesso em: 18 set. 2024.

LÔBO, I. M. *et al.* Utilização da instrução por pares (peer instruction) na prática do ensino. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, v. 10, n. 5, p. 435-442, 2024. Disponível em:

<https://periodicorease.pro.br/rease/article/view/13824/6808>. Acesso em: 27 jan. 2025.

LOVATO, F. L.; MICHELOTTI, A.; DA SILVA LORETO, E. L. Metodologias ativas de aprendizagem: uma breve revisão. **Acta Scientiae**, v. 20, n. 2, 2018.

MAZUR, E.; SOMERS, M. D. **Peer instruction: A user's manual**. 1999.

MORÁN, J. Mudando a educação com metodologias ativas. **Coleção mídias contemporâneas. Convergências midiáticas, educação e cidadania: aproximações jovens**, v. 2, n. 1, p. 15-33, 2015.

- MOREIRA, M. A. **Teorias de aprendizagem**. São Paulo: Editora pedagógica e universitária, 1999.
- MOREIRA, M. A. Grandes desafios para o ensino da física na educação contemporânea. **Revista do professor de física**, v. 1, n. 1, p. 1-13, 2017.
- MORTIMER, E. F. Construtivismo, mudança conceitual e ensino de ciências: para onde vamos? **Investigações em ensino de ciências**, v. 1, n. 1, p. 20-39, 1996.
- NOVAES, M.; STUDART, N. **Mecânica quântica básica**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2016
- OLIMPIO, E. W. D.; DE MEDEIROS, M. H. T. Método predizer-observar-explicar como metodologia facilitadora no ensino de botânica para os alunos do ensino fundamental II. **Kiri-Kerê-Pesquisa em Ensino**, Universidade Federal do Espírito Santo, v. 1, n. 22, 2024. Disponível em: <https://periodicos.ufes.br/kirikere/article/view/45284>. Acesso em: 11 fev. 2025.
- OLIVEIRA, F. F. D.; VIANNA, D. M.; GERBASSI, R. S. Física moderna no ensino médio: o que dizem os professores. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 29, p. 447-454, 2007.
- OLIVEIRA *et al.*. Aplicação do método peer instruction no ensino de algoritmos e programação de computadores. **RENOTE: revista novas tecnologias na educação**, Porto Alegre, RS. v. 15, n. 1, p. 1-11, 2017. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/223908/001078725.pdf?sequence=1>. Acesso em: 14 fev. 2025.
- OPENAI. Chatgpt. Disponível em: <https://chat.openai.com>. Acesso em: 3 mar. 2025.
- OSTERMANN, F.; CAVALCANTI, C. J. D. H. Um pôster para ensinar física de partículas na escola. **Física na escola**, São Paul, v. 2, p. 13-18, 2001.
- OSTERMANN, F.; MOREIRA, M. A. Uma revisão bibliográfica sobre a área de pesquisa “física moderna e contemporânea no ensino médio”. **Investigações em ensino de ciências**, Porto Alegre, v. 5, n. 1, p. 23-48, 2000.
- OSTERMANN, F.; MOREIRA, M. A. Atualização do currículo de física na escola de nível médio: um estudo dessa problemática na perspectiva de uma experiência em sala de aula e da formação inicial de professores. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 18, n. 2, p. 135-151, 2001.
- PANSERA, S. M. *et al.* Motivação intrínseca e extrínseca: diferenças no sexo e na idade. **Psicologia escolar e educacional**, v. 20, n. 2, p. 313-320, 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pee/a/DMWDz7fw58xr38DVKSv4bsp/?lang=pt>. Acesso em: 20 fev. 2025.
- PEREZ, S. **Mecânica Quântica: um curso para professores da Educação Básica**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2016.
- PhET INTERACTIVE SIMULATIONS. Stern-Gerlach. Disponível em: https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulations/stern-gerlach. Acesso em: 5 set. 2024.

PIAGET, J. (1978). **Equilibración de las estructuras cognitivas: problema central del desarrollo**. Siglo XXI de España Editores, 1978.

PIAGET, J. **A psicologia da inteligência**. Editora Vozes Limitada, 2013.

PIETROCOLA, M.; BROCKINGTON, G. Recursos computacionais disponíveis na internet para o ensino de física moderna e contemporânea. *In: Atas do IV ENPEC*. Bauru, São Paulo, 2003. Disponível em: https://www.hu.usp.br/wp-content/uploads/sites/293/2016/05/Pietrocola_RECURSOS_COMPUTACIONAIS_DISPONIVEIS_NA_INTERNET_PARA_O_ENSINO_DE_FISICA_MODERNA_E_CONTEMPORANEA.pdf. Acesso em: 9 jan. 2025.

SACCOL, A. Z. Um retorno ao básico: compreendendo os paradigmas de pesquisa e sua aplicação na pesquisa em administração. **Revista de Administração da UFSM**, v. 2, n. 2, p. 250-269, 2009.

SANTOS, R. J.D.; SASAKI, D. G. G. Uma metodologia de aprendizagem ativa para o ensino de mecânica em educação de jovens e adultos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 37, p. 3506-1-3506-9, 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/ytLL4Fc3Z8SZJNwr39rZdwh/?lang=pt&format=html>. Acesso em: 8 set. 2024.

SASAKI, D. G. G.; JESUS, V.D. Avaliação de uma metodologia de aprendizagem ativa em óptica geométrica através da investigação das reações dos alunos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 39, n. 2, p. e2403, 2017. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/Z8md8N8dyrgyPXxHKJY7GRK/?format=html&lang=pt>. Acesso em: 8 set. 2024.

SCHWAHN, M. C. A.; OIAGEN, E. R. O uso do laboratório de ensino de química como ferramenta: investigando as concepções de licenciandos em química sobre o predizer, observar, explicar (poe). **Acta Scientiae**, v. 10, n. 2, p. 151-169, 2008. <http://www.periodicos.ulbra.br/index.php/acta/article/view/73>. Acesso em: 13 set. 2024.

SILVA, A. G.; CARVALHO, H. A. P.; , PHILIPPSEN, G.S. Ensino de física moderna no ensino médio: uma proposta didática para o estudo da evolução do modelo atômico. **Revista Insignare Scientia-RIS**, 2022. Disponível em: <https://periodicos.ufff.edu.br/index.php/RIS/article/view/12823>. Acesso em: 8 dez. 2024.

SIQUEIRA, M. R. D. P. **Professores de física em contexto de inovação curricular: saberes docentes e superação de obstáculos didáticos no ensino de física moderna e contemporânea**. Tese (Doutorado em Educação) - Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012. doi:10.11606/T.48.2012.tde-04102012-133540. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/48/48134/tde-04102012-133540/pt-br.php>. Acesso em: 11 jan. 2025.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA. Cientistas da unicamp propõem novo fundamento físico para explicar os limites da teoria quântica. Disponível em: <https://www.sbfisica.org.br/v1/sbf/cientistas-da-unicamp-propoem-novo-fundamento-fisico-para-explicar-os-limites-da-teoria-quantica/>. Acesso em: 12 jul. 2025.

STADERMANN, H. K. E.; VAN DEN BERG, E.; GOEDHART, M. J. Analysis of secondary school quantum physics curricula of 15 different countries: Different perspectives on a challenging topic. **Physical Review Physics Education Research**, v. 15, n. 1, p. 010130, 2019. Disponível em:

<https://journals.aps.org/prper/pdf/10.1103/PhysRevPhysEducRes.15.010130>.

Acesso em: 2 jun. 2025.

STARIOLO, M. Unesco celebra 2025 como o ano internacional da ciência e tecnologia quânticas. 2025. Disponível em: <https://jornal.unesp.br/2025/02/04/unesco-celebra-2025-como-o-ano-internacional-da-ciencia-e-tecnologia-quanticas/>.

Acesso em: 26 jun. 2025.

TASSINARI, R. P. Como é possível a filosofia? uma análise a partir do modelo do sistema de esquemas de ações e operações sobre símbolos e signos. **Schème: Revista Eletrônica de Psicologia e Epistemologia Genéticas**, v. 12, n. 2, p. 6-40, 2016.

Disponível em: <https://revistas.marilia.unesp.br/index.php/scheme/article/view/11375/6947>.

Acesso em: 9 fev. 2025.

TERINI, R. A. **Relatividade i**. Notas de aula. USP: São Paulo, 2022. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7406467/mod_resource/content/1/Aula%2024_Relatividade%201.pdf. Acesso em: 6 jan. 2025.

TERINI, R. A. **Relatividade ii**. Notas de aula. USP: São Paulo, 2022. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7410238/mod_resource/content/1/Aula%2025_Relatividade%202.pdf. Acesso em: 7 jan. 2025.

VALLE, V. G. **Sobre sistemas de 2 níveis em mecânica quântica e suas conexões com o espaço físico**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Juiz de Fora, Brasil, 2023. Disponível em:

<https://repositorio.ufjf.br/jspui/handle/ufjf/16260>. Acesso em: 1 dez. 2024.

VANZELLA, D. A. T. **Relatividade restrita**. Notas de aula. USP: São Paulo, 2022. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/6844899/mod_resource/content/1/NotasAulaRR_Parcial.pdf. Acesso em: 6 jan. 2025.

VENANCIO, B. F. **A experiência de stern-gerlach e o spin do elétron**. Notas de aula. UFPR: Paraná, 2014. Disponível em:

https://fisica.ufpr.br/bettega/Apresentacao_Bruno.pdf. Acesso em 3 jan. 2025.

VIEIRA, C.; RAMANATHAN, R.; CABELLO, A. Test of the physical significance of bell non-locality. **Nature Communications**, v. 16, n. 1, p. 4390, 2025. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41467-025-59247-7>. Acesso em 9 jul. 2025.

WHITE, R.; GUNSTONE, R. **Probing understanding**. Routledge, 2014.

WIKIMEDIA COMMONS. Imagem de um diagrama de Minkowski. Disponível em:

<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/55/Cone-de-luz.png>.

Acesso em: 7 jul. 2025.

APÊNDICE A – Produto Educacional

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS
MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA

Patrick Ribeiro Rodrigues

Produto Educacional: roteiro para aplicação de uma sequência didática sobre emaranhamento quântico e não localidade via metodologia POE e Instrução entre Pares

Juiz de Fora

2025

Patrick Ribeiro Rodrigues

Produto Educacional: roteiro para aplicação de uma sequência didática sobre emaranhamento quântico e não localidade via metodologia POE e Instrução entre Pares

Este produto educacional é parte integrante da dissertação intitulada: Emaranhamento e não localidade em mecânica quântica: uma abordagem via metodologia POE e Instrução entre Pares, apresentada ao Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física da Universidade Federal de Juiz de Fora/Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física. Área de concentração: Física na Escola Básica.

Orientador: Prof. Dr. Thales Costa Soares

Coorientador: Prof. Dr. Bruno Ferreira Rizzuti

Juiz de Fora

2025

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	3
2	PRIMEIRO ENCONTRO	5
3	SEGUNDO ENCONTRO	9
4	TERCEIRO ENCONTRO	13
5	QUARTO ENCONTRO	18
6	QUINTO ENCONTRO	21

1 INTRODUÇÃO

Este produto educacional consiste em uma sequência didática elaborada com o objetivo de abordar os conceitos de não localidade e emaranhamento quântico (ou pelo menos alguns de seus indícios). Embora a mecânica quântica trate predominantemente de fenômenos em escalas atômicas e subatômicas, as suas implicações geram impacto significativo no mundo macroscópico, com perspectivas transformadoras para o futuro. Um exemplo notável são os computadores quânticos, que apresentam potencial para revolucionar a estrutura tecnológica vigente e influenciar de forma profunda diferentes setores em escala global.

Apesar de sua relevância, a mecânica quântica ainda é pouco explorada no ensino médio. Entre os principais fatores que contribuem para essa lacuna, destacam-se: a carência de recursos didáticos referentes à área, o baixo número de professores licenciados em física, deficiências na formação inicial dos docentes (tanto licenciados em física quanto de áreas afins que lecionam a disciplina) e o grau de abstração dos conteúdos.

Nesse contexto, o presente produto busca oferecer uma alternativa viável — ou, ao menos, um ponto de partida — para professores que desejam introduzir conteúdos de mecânica quântica em suas aulas, mas que enfrentam algumas das limitações mencionadas.

A proposta está organizada em cinco encontros de 50 minutos e fundamenta-se em duas metodologias: a Instrução entre Pares e a metodologia POE (Predizer, Observar, Explicar). Tais metodologias foram aplicadas em momentos distintos da sequência didática.

A sequência didática é composta por cinco encontros, organizados em três partes. A primeira parte (encontros 1 e 2) tem como objeto de estudo o experimento de Stern-Gerlach. A segunda parte (encontros 3 e 4) aborda conceitos de causalidade e simultaneidade no espaço-tempo. Já a terceira parte trata do conceito de emaranhamento, a partir de um exemplo simples envolvendo um sistema bipartido formado por dois *spins* viajando em direções opostas.

A tabela 1 organiza, de forma resumida, os encontros, as atividades realizadas, as metodologias utilizadas e a duração correspondente. A descrição detalhada de cada encontro é apresentada a seguir.

O Questionário 1, utilizado na atividade sobre o experimento de Stern-Gerlach, encontra-se no Apêndice B; as perguntas utilizadas na etapa sobre não localidade (Instrução entre Pares) estão no Apêndice C; e o Questionário 2, referente ao emaranhamento quântico, está no Apêndice D.

Sugerimos a aplicação deste produto educacional com turmas do 3º ano do Ensino Médio em escolas de regime regular e com turmas do 2º ano do Ensino Médio em instituições cujo currículo possua caráter revisional no 3º ano médio.

Tabela 1 – Descrição da sequência didática

Encontro	Atividades	Metodologia	Duração
1	Apresentação do produto educacional, introdução ao experimento de Stern-Gerlach, discussão dos conceitos de superposição e colapso da função de onda (via Stern-Gerlach).	POE	50 minutos
2	Apresentação de diferentes arranjos do Stern-Gerlach, inserção da notação de Dirac.	POE	50 minutos
3	Discussão sobre referenciais, eventos, linhas de universo	Instrução entre Pares	50 minutos
4	Discussão sobre causalidade e quebra de causalidade.	Instrução entre Pares	50 minutos
5	Retomada dos conceitos anteriores, discussão acerca do fenômeno de emaranhamento quântico (via Stern-Gerlach) e encerramento da sequência didática.	POE	50 minutos

Fonte: Elaboração Própria.

2 PRIMEIRO ENCONTRO

Orientações iniciais para o primeiro encontro: recomenda-se reservar de 3 a 5 minutos para:

- Organizar a turma em duplas ou trios, conforme a disposição e o número de alunos. Por exemplo, com 30 alunos, 10 trios.
- Apresentar brevemente a proposta da sequência didática, destacando os principais tópicos que serão abordados: não causalidade e emaranhamento quântico.
- Ressaltar a importância de seguir corretamente cada metodologia, com especial atenção às etapas e à ordem em que devem ser realizadas.
- Entregar o Questionário 1 (presente no Apêndice B) e orientar os estudantes à responder conforme for solicitado.

O primeiro encontro utiliza a metodologia POE. Por isso, é importante destacar que a etapa de predição deve ser realizada individualmente, a fim de evitar que as respostas sejam influenciadas por colegas. Já a etapa de explicação pode ser conduzida de forma coletiva, promovendo o debate e a construção conjunta do conhecimento.

Oriente os alunos a não alterarem suas respostas após a conclusão de cada etapa, respeitando o processo investigativo proposto. Ressalte a importância de registrar observações e reflexões, uma vez que essas anotações são fundamentais para a sistematização e a organização do novo conhecimento adquirido ao longo da sequência.

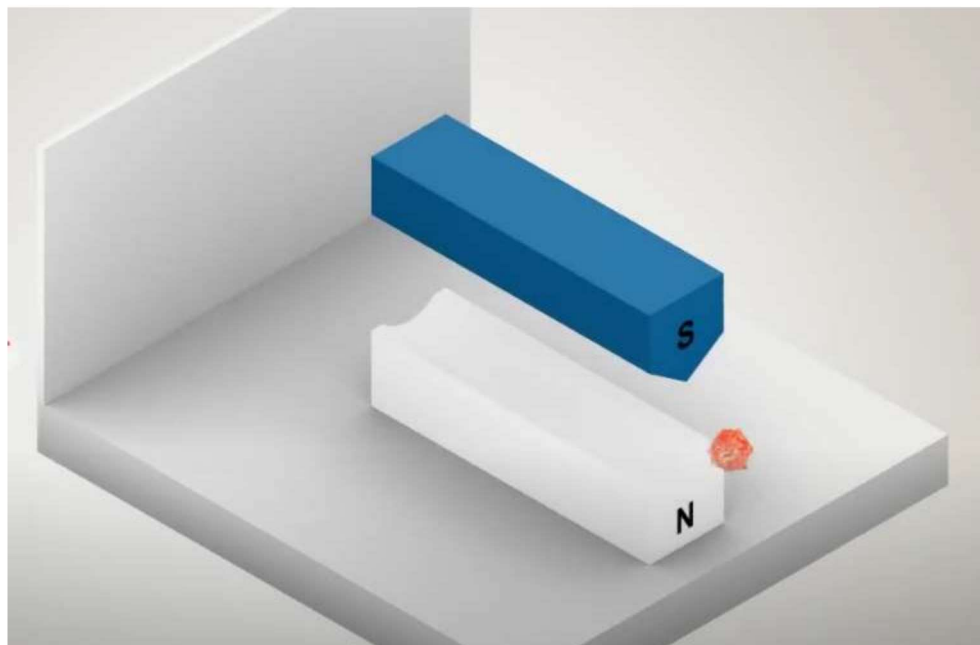
Procure enfatizar que o objetivo da atividade não é identificar respostas certas ou erradas. Acreditamos que essa abordagem contribui para evitar respostas engessadas e estimula a livre expressão do pensamento dos alunos.

Apresente o vídeo *Spin: Stern and Gerlach Experiment* (disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=rg4Fnag4V-E>), que aborda o experimento de Stern-Gerlach, até o tempo 0:40. Em seguida, pause o vídeo e explique brevemente o que está acontecendo.

Em seguida, reproduza o vídeo até o tempo 0:44 (figura 1) e solicite que os estudantes respondam à primeira pergunta do Questionário 1 (figura 2), relacionada à etapa de Predizer.

Dê de 5 a 10 minutos para que os alunos registrem suas respostas e, em seguida, avance para a etapa de Observar. A etapa de Observar consiste em verificar o que acontece no experimento e realizar a descrição entre os colegas de grupo, portanto reproduza o vídeo do tempo 0:44 até o final.

Figura 1 – Captura de tela do vídeo *Spin: Stern and Gerlach Experiment*



Fonte: Captura de tela retirada do vídeo *Spin: Stern and Gerlach experiment*. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=rg4Fnag4V-E>

Figura 2 – Pergunta 1 do Questionário 1

Pergunta 1

O que vai acontecer com o átomo (lembrando que ele se comporta como um ímã que foi reduzido em escala) ao passar pelo campo magnético? Marque a opção e justifique sua resposta

- a) irá parar em todas as direções da parede, como os ímãs no início do vídeo.
- b) irá parar nas direções em cima e embaixo da parede.
- c) irá parar no centro da parede.
- d) irá parar apenas na direção de baixo da parede.
- e) nenhuma das alternativas listadas acima (explicação na justificativa)

Justificativa:

Fonte: Elaboração Própria.

Após a observação, solicite que os alunos respondam à pergunta 2 (figura 3) do Questionário 1. Eles terão entre 3 e 5 minutos para responder, primeiro registrando em papel e depois realizando breves explanações. A pergunta está associada à etapa de Explicar.

Em seguida, reserve de 5 a 10 minutos para formalizar os conceitos. Como ferramenta para a formalização e para inserir os conceitos nas demais perguntas, utilize o

Figura 3 – Pergunta 2 do Questionário 1

Pergunta 2

O que você pode dizer sobre o fenômeno observado? A sua resposta anterior vai de encontro com o apresentado no vídeo? Justifique.

Fonte: Elaboração Própria.

simulador Stern-Gerlach do PhET Colorado (disponível em: <https://phet.colorado.edu/pt/simulations/stern-gerlach>).

Caso haja algum problema com o Flash Player, sugerimos o uso de um navegador compatível com Flash. No nosso caso, utilizamos o FlashBrowser, que pode ser encontrado no GitHub (disponível em: <https://github.com/radubirsan/FlashBrowser>).

Algumas orientações:

- Solicitar aos alunos curtas explicações orais sobre o ocorrido
- Apresentar o simulador Stern-Gerlach do Phet Colorado e realizando as devidas conexões com o vídeo
- Utilizar o quadro para anotações, de preferência em tópicos, com poucos textos.
- Buscar na fala dos estudantes palavras-chave.

Realize a montagem no simulador conforme mostrado na figura 4. Explique brevemente aos estudantes o arranjo e peça para que respondam à pergunta 3 (figura 5) do Questionário 1. Esta pergunta corresponde à etapa de Predição, e os alunos terão entre 5 e 10 minutos para responder.

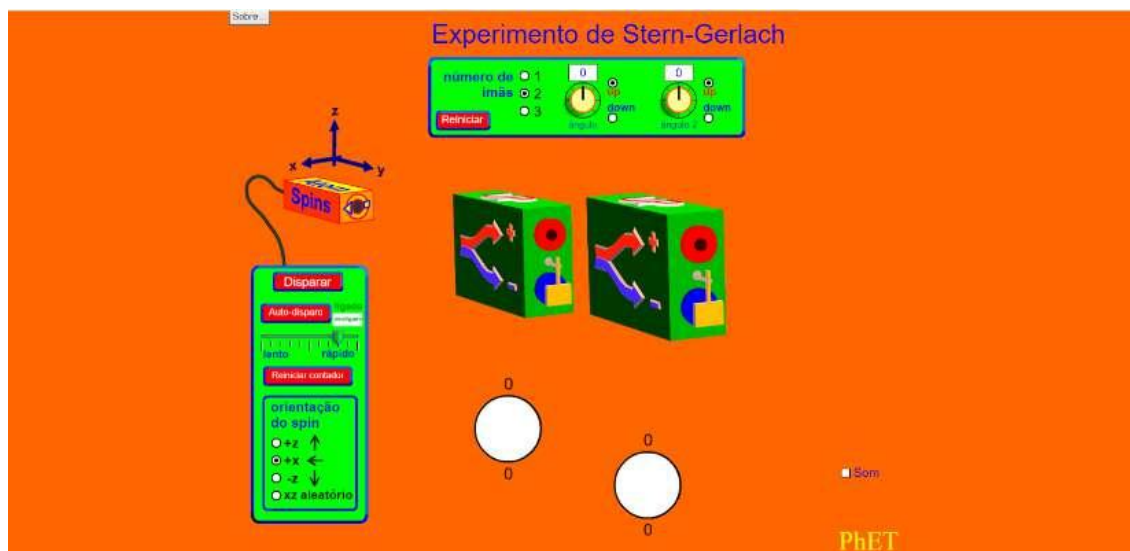
Após os alunos responderem, libere o simulador para que os alunos realizem em grupos a descrição do fenômeno. Nesta etapa, é possível ajustar os controles de velocidade e disparo (automático ou manual). Este momento corresponde à etapa de Observar.

Em seguida, solicite que os estudantes respondam à pergunta 4 (figura 6) do Questionário 1, relacionada à etapa de Explicar. Dê de 3 a 5 minutos para que possam responder e realizar explicações.

Realize a formalização, utilizando as instruções anteriores como base. Lembre-se de que o objetivo aqui é discutir a ideia de colapso da função de onda. Procure usar uma linguagem acessível, evitando termos excessivamente técnicos.

Finalizado o primeiro encontro, recolha os questionários dos estudantes e encerre esta etapa. Avise aos estudantes que este questionário será reentregue na próxima aula.

Figura 4 – Arranjo Stern-Gerlach da Pergunta 3



Fonte: Captura de tela retirada do simulador PhET Colorado do experimento de Stern-Gerlach.

Figura 5 – Pergunta 3 do Questionário 1

Pergunta 3

Se colocarmos um “obstáculo” no “baixo/negativo” e mais um campo magnético, o que pode acontecer? Justifique

- a) passará apenas para parte de “cima/positiva”
- b) passará tanto em “cima/positivo” quanto em “baixo/negativo”.
- c) passará apenas na parte de “baixo/negativa”
- d) falta informação para responder
- e) nenhuma das alternativas listadas acima (explicação na justificativa)

Fonte: Elaboração Própria.

Figura 6 – Pergunta 4 do Questionário 1

Pergunta 4:

O resultado esperado te surpreendeu? O que se pode dizer sobre o comportamento observado e qual sua relação com os valores que são observados abaixo dos aparatos que produzem campo magnético?

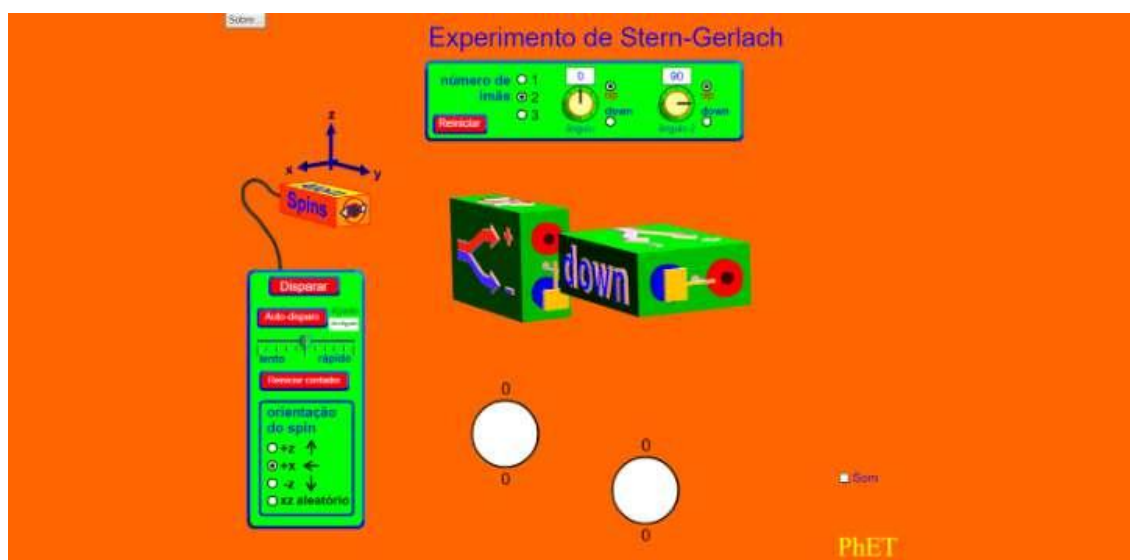
Fonte: Elaboração Própria.

3 SEGUNDO ENCONTRO

O segundo encontro também segue a metodologia POE, sendo uma continuação das atividades iniciadas no primeiro encontro, por meio do experimento Stern-Gerlach. Dê início às atividades entregando os questionários da aula anterior aos estudantes e faça uma breve recordação do que foi realizado até aquele momento, destacando os temas abordados.

Em seguida, realize a montagem no simulador conforme a figura 7. Explique brevemente o arranjo aos estudantes e peça para que respondam à pergunta 5 (figura 8) do Questionário 1. Esta pergunta corresponde à etapa de Predição, e os alunos terão entre 5 e 10 minutos para responder.

Figura 7 – Arranjo Stern-Gerlach da Pergunta 5



Fonte: Captura de tela retirada do simulador PhET Colorado do experimento de Stern-Gerlach.

Figura 8 – Pergunta 5 do Questionário 1

Pergunta 5

Se mantermos o “obstáculo” no “baixo/negativo” e alterarmos a direção de um campo magnético, o que pode acontecer? Justifique

Justificativa:

Fonte: Elaboração Própria.

Após os alunos responderem, libere o simulador e solicite aos estudantes que realizem a descrição do fenômeno entre seus pares. Este momento corresponde à etapa de Observar. Caso desejem, os estudantes podem ajustar os controles de velocidade de lançamento e de autolancamento.

Em seguida, solicite que os estudantes respondam à pergunta 6 (figura 9) do Questionário 1. Esta pergunta está relacionada à etapa de Explicar, e eles terão entre 3 e 5 minutos para responder e em seguida realizar suas explicações.

Figura 9 – Pergunta 6 do Questionário 1

Pergunta 6

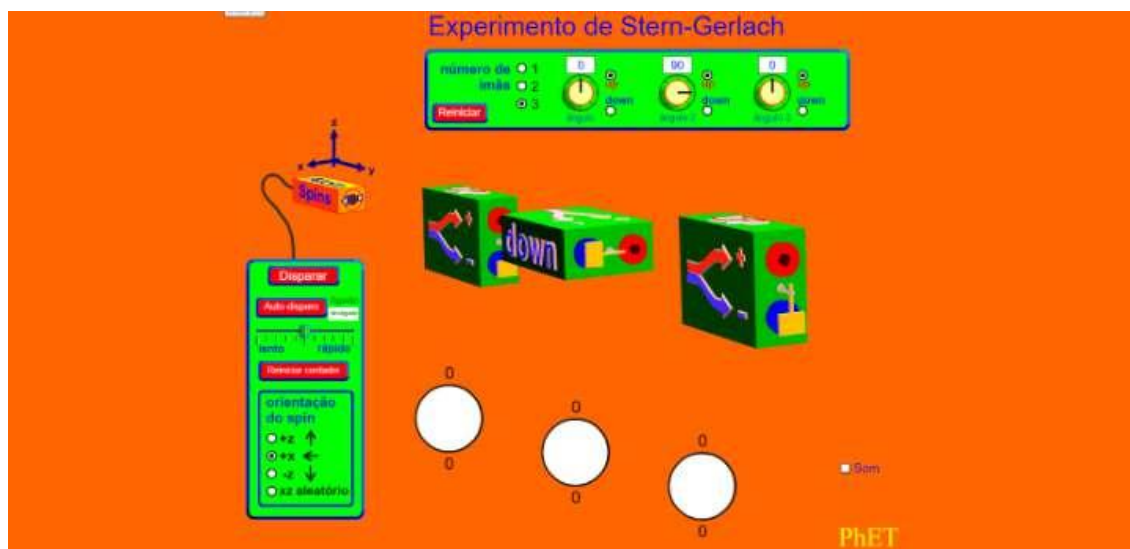
O que se pode dizer sobre o comportamento observado e qual sua relação com os valores que são observados abaixo dos aparatos que produzem campo magnético?

Fonte: Elaboração Própria.

Após a etapa de Explicar, avance para um novo arranjo do experimento Stern-Gerlach (figura 10).

Apresente a nova montagem e peça para que os estudantes respondam à pergunta 7 (figura 11) do mesmo questionário. Esta pergunta corresponde à etapa de Predição, e os alunos terão entre 5 e 10 minutos para responder.

Figura 10 – Arranjo Stern-Gerlach da Pergunta 7



Fonte: Captura de tela retirada do simulador PhET Colorado do experimento de Stern-Gerlach.

Após os alunos responderem, permita que observem a simulação. Este momento corresponde à etapa de Observar. Feita a observação e descrição, solicite que os estudantes respondam à pergunta 8 (figura 12), que corresponde à etapa de Explicar. Eles terão entre 3 e 5 minutos para responder a pergunta e em seguida realizar as explanações.

Após esse momento, realize a formalização. Procure discutir com os estudantes a ideia da orientação dos campos magnéticos. Pergunte-lhes se este seria um fator influente nos resultados encontrados e, em caso afirmativo, qual seria a relação entre a orientação e os valores dos *spins*. Separe de 5 a 10 minutos para essa formalização.

Figura 11 – Pergunta 7 do Questionário 1

Pergunta 7

Se mantermos a configuração anterior e acrescentarmos mais um campo magnético, o que pode acontecer? Justifique

- a) o átomo ficará “preso” no segundo campo magnético.
- b) o mesmo que na configuração anterior.
- c) passará apenas na parte de “cima/positiva”
- d) falta informação para responder.
- e) nenhuma das alternativas listadas acima (explicação na justificativa)

Justificativa:

Fonte: Elaboração Própria.

Figura 12 – Pergunta 8 do Questionário 1

Pergunta 8

O que se pode dizer sobre o comportamento observado e qual sua relação com os valores que são observados abaixo dos aparatos que produzem campo magnético? Será que há alguma relação com as configurações vistas anteriormente?

Fonte: Elaboração Própria.

Para encerrar o segundo encontro, apresente aos estudantes a seguinte notação:

$$\uparrow = |0\rangle, \downarrow = |1\rangle \quad (3.1)$$

A notação representa o estado em que o sistema se encontra, ou seja, *spin* para cima no primeiro caso e para baixo no segundo. Cada um deles representam estados que respondem afirmativamente à “pergunta” feita pelo campo magnético. A interpretação é como se o campo magnético fosse uma espécie de tomógrafo sobre o sistema que nos informa ou acaba preparando o feixe em determinado estado após a passagem pela região com o campo magnético.

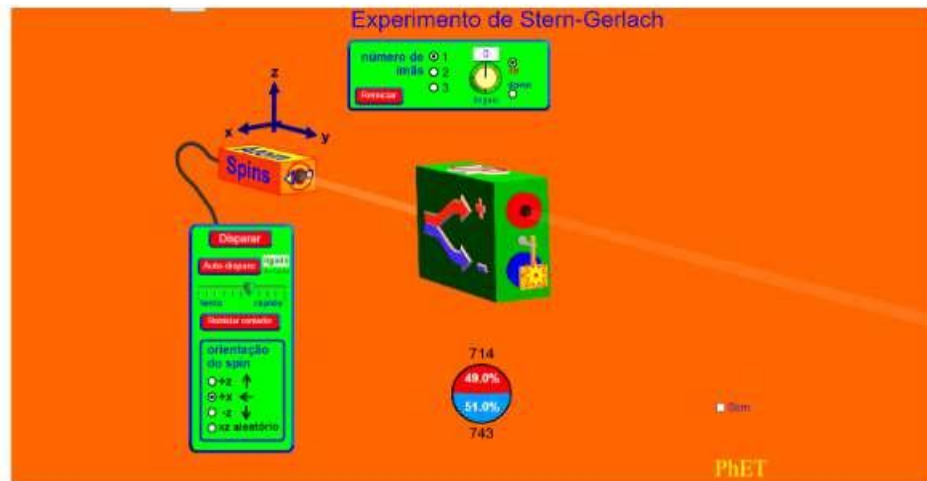
A equação (3.1) apresenta uma forma menos “técnica” da Notação de Dirac. O objetivo é introduzir a notação aos estudantes (sem que eles saibam explicitamente que se trata da notação de Dirac) de maneira a evitar os grandes formalismos matemáticos.

Após a introdução da notação, solicite que os alunos respondam à última pergunta (figura 13) do Questionário 1. Nessa questão, eles devem representar, utilizando a notação apresentada, o que ocorre no experimento Stern-Gerlach no arranjo inicial (figura 1), antes

e após a passagem dos *spins*. Ou seja, como é possível representar o sistema antes e depois da passagem dos *spins* usando a “nossa” notação.

Figura 13 – Pergunta 9 do Questionário 1

O sistema na configuração abaixo (antes e após a passagem dos átomos pelo campo magnético) pode ser representado na nossa notação de que forma?



Fonte: Captura de tela retirada do simulador PhET Colorado do experimento de Stern-Gerlach.

Ao final do encontro, recolha os questionários dos estudantes e, caso haja dúvidas, reserve um espaço para atendê-las, além de abrir espaço para outras discussões.

4 TERCEIRO ENCONTRO

O terceiro encontro tem como objetivo discutir conceitos relacionados à parte de relatividade, em particular linhas de universo, referenciais, eventos, causalidade e quebra de causalidade. Este encontro está pautado na metodologia de Instrução entre Pares.

Nos cinco minutos iniciais, separe a turma nas duplas e/ou trios dos encontros anteriores. Explique para os estudantes como funciona a metodologia de Instrução entre Pares, leve-os a entender a necessidade de seguir a metodologia como indicado, para que haja melhores resultados.

Como forma de coleta das respostas dos estudantes, utilizamos o aplicativo Plickers (<https://www.plickers.com>) que permite que as perguntas sejam realizadas e as respostas sejam analisadas em tempo real, com porcentagens de erros e acertos. O que facilita bastante como ferramenta de coleta para a metodologia.

Caso seja o seu primeiro contato com o aplicativo Plickers, sugerimos que assista a este tutorial: <https://www.youtube.com/watch?v=3Got8PtLXuc>.

Entregue os cartões do Plickers para os estudantes e também explique-lhes como poderão registrar, através do cartão, a alternativa que julgam correta. Mencione também, nesses minutos iniciais, a importância de registrar as informações para a sistematização e organização do novo conhecimento.

Realize uma breve discussão (entre 15 a 20 minutos) com os estudantes acerca do que são eventos, linhas de universo e como estes são representados graficamente.

Em nossa aplicação, utilizamos estalos de dedos para explicar o conceito de eventos. Para discutir a ideia de linhas de universo, nos apoiamos em três casos:

- Partícula em repouso no seu referencial;
- Partícula com velocidade constante $0,2c$ em seu referencial;
- Cone de luz.

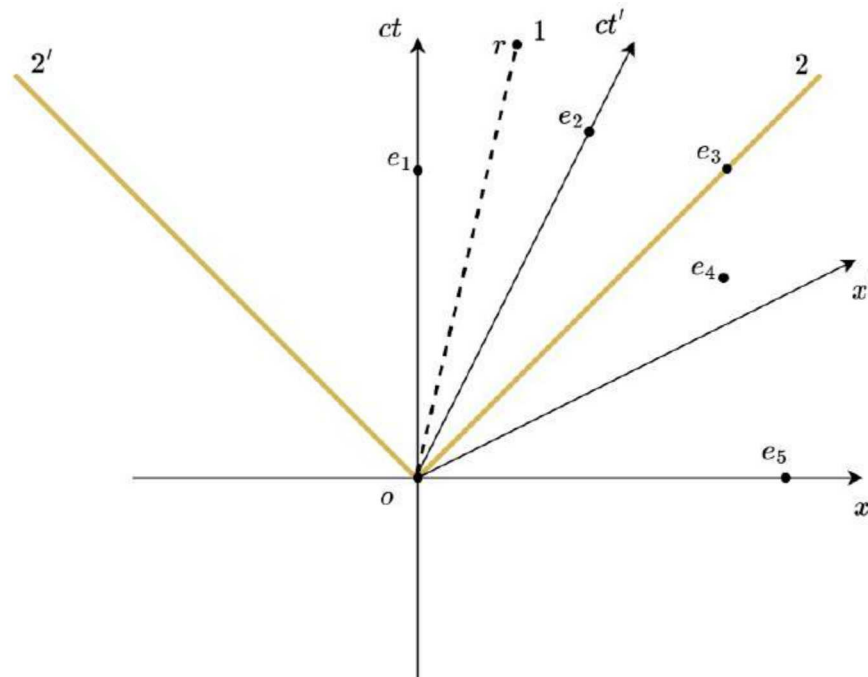
A figura 14 apresenta a representação do cone de luz do evento o , eixos de coordenadas espaciais e temporais de dois referenciais (com e sem linha), diversos eventos e uma linha de universo tracejada de uma partícula deslocando-se em relação aos referenciais com e sem linha.

Utilizamos a lousa para realizar os tracejados das linhas de universo. Em seguida, foram tratados dois exemplos para discutir a inclinação dos eixos espaço-tempo:

- Partícula que se move com velocidade constante de $0,2c$ com relação a outro referencial;

- Simultaneidade de Einstein.

Figura 14 – Representação de eventos, linhas de universo, cone de luz, eixos de coordenadas temporais-espaciais no espaço tempo de Minkowski



Fonte: Elaboração Própria.

Para a discussão sobre a simultaneidade em Einstein, utiliza-se o experimento mental conhecido como “trem de Einstein”. Nessa situação, considera-se um trem em movimento a alta velocidade em relação a uma plataforma de estação. Dois raios atingem simultaneamente a frente e a traseira do trem, segundo um observador que está na plataforma. No entanto, para um observador dentro do trem, os raios não atingem as extremidades ao mesmo tempo. Como a luz se propaga à mesma velocidade em ambos os referenciais, a diferença nos instantes em que os raios atingem as extremidades, do ponto de vista do observador no trem, deve-se à sua posição relativa.

Para ilustrar essa diferença de percepção temporal, utilizam-se os diagramas de linhas de universo para cada referencial (observador no trem e observador na plataforma), nos quais se apresenta a inclinação dos eixos espaço-tempo.

A nossa abordagem desses temas seguiu os preceitos geométricos, por isso, o uso da lousa foi importantíssimo na construção dos gráficos.

Feito isso, apresente o simulador de diagramas espaço-tempo de Minkowski (disponível em: <http://www.trell.org/div/minkowski.html>). Comente também sobre as funcionalidades do simulador e inicie a primeira pergunta.

No simulador, insira velocidade relativa igual a zero, $d = 2$ e $t = 4$ (para um evento B), e pergunte como será descrito esse mesmo evento no referencial linha. A figura 15 ilustra a forma como organizamos a pergunta (esta e as demais perguntas desta etapa estão no Apêndice C).

Figura 15 – Pergunta 1 - Instrução entre Pares

O que vai acontecer no referencial linha se colocarmos um evento B com $d = 2$, $t = 4$ e velocidade relativa igual a zero?

A O evento B ocorre depois de A e tem coordenadas diferentes do referencial d, ct.

B Não sei.

C O evento B ocorre depois de A e tem as mesmas coordenadas do referencial d, ct.

D O evento B ocorre antes de A e tem as mesmas coordenadas do referencial d, ct.

Fonte: Elaboração Própria.

Dê entre 3 a 5 minutos para que os estudantes levanten os cartões com as alternativas que julgam corretas, e não se esqueça de, em cada pergunta deste encontro, seguir os preceitos da Instrução entre Pares:

- Acima de 70% de acertos introduz-se uma nova questão
- Entre 30-70% de acertos é realizada uma discussão entre grupos e refeita a pergunta
- Abaixo de 30% de acertos é necessária a revisão dos conceitos por parte do professor e refeita a pergunta

Assim que alcançados os 70% de acertos, altere no simulador a velocidade relativa para $0,2c$ e realize a segunda pergunta (figura 16). Dê cerca de 3 a 5 minutos para que os alunos a respondam.

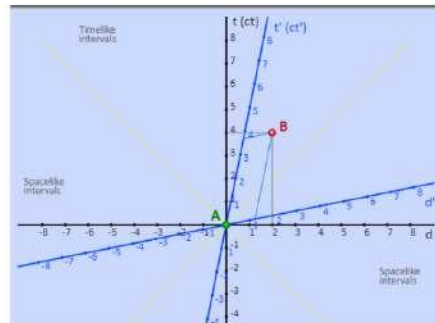
Assim que alcançados os 70% de acertos, altere no simulador a velocidade relativa para $0,5c$ e realize a terceira pergunta (figura 17). Dê cerca de 3 a 5 minutos para que os alunos a respondam.

Alcançados os 70% de acertos, discuta a relação de causalidade presente nos eventos das perguntas 1, 2 e 3. Mostre aos estudantes, através de diagramas e com exemplos do

Figura 16 – Pergunta 2 - Instrução entre Pares

Com base no exemplo anterior (evento B com $d = 2$, $t = 4$) e considerando agora uma velocidade relativa de $0,2c$, o que vai acontecer que vai acontecer no referencial linha?

- ☐ A O evento B ocorre depois de A e tem coordenadas diferentes do referencial d, ct.
- ☐ B O evento B ocorre antes de A e tem coordenadas diferentes do referencial d, ct.
- ☐ C O evento B ocorre depois de A e tem as mesmas coordenadas do referencial d, ct.
- ☐ D Não sei.

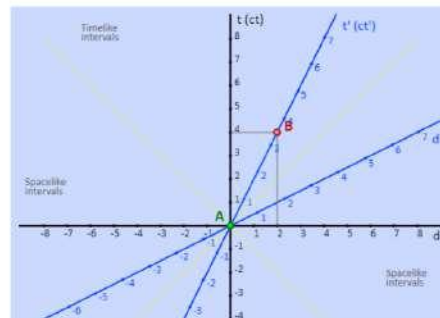


Fonte: Elaboração Própria.

Figura 17 – Pergunta 3 - Instrução entre Pares

Seguindo o exemplo anterior (evento B com $d = 2$, $t = 4$), substituindo a velocidade relativa de $0,2c$ para $0,5c$ é correto afirmar que:

- ☐ A Não sei.
- ☐ B No ref. linha "sinal" está em repouso.
- ☐ C No ref. linha os eventos são simultâneos porque estão sob o eixo temporal.
- ☐ D Os eventos são simultâneos em ambos os referenciais.



Fonte: Elaboração Própria.

cotidiano, o que seriam exemplos causais. Pode-se utilizar exemplos simples, como “chutar a geladeira e sentir dor”, “plantar e colher”. Gaste cerca de 10 minutos nessa discussão.

Sobre a causalidade, no caso dos eventos A e B apresentados anteriormente, A ocorre antes de B e, como tal, A pode ser considerado a causa de B. Observando as coordenadas temporais dos eventos nos dois referenciais, é possível constatar a preservação da ordem causal. Na figura 17, em ambos os referenciais o evento A possui as mesmas coordenadas temporais, $t = t' = 0$, enquanto o evento B apresenta coordenadas distintas,

$t = 4$ e $t' = 3,5$. Ainda assim, em ambos os referenciais o evento A ocorre antes do evento B, o que permite traçar entre eles uma conexão causal.

Finalizada a discussão sobre causalidade, encerre este encontro mencionando aos discentes a importância do conceito de causalidade para o que será discutido no encontro posterior.

5 QUARTO ENCONTRO

O quarto encontro tem como objetivo dar continuidade na discussão de conceitos relacionados à parte de relatividade, em particular causalidade e quebra de causalidade. Este encontro também está pautado na metodologia de Instrução entre pares.

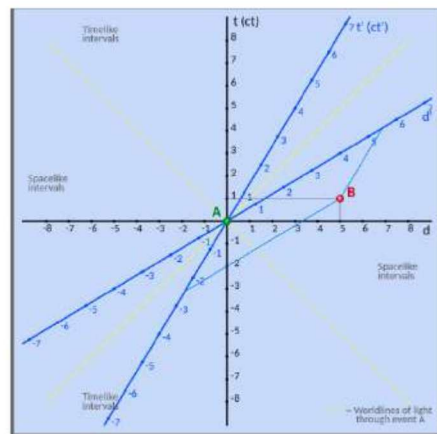
Reserve cerca de 5 a 10 minutos para uma breve revisão dos assuntos que foram discutidos anteriormente, sobretudo relembando a última atividade, que discutia o conceito de causalidade.

No simulador utilizado na aula passada, insira velocidade relativa igual a $0,6c$, $d = 5$ e $t = 1$ (para um evento B) e pergunte como será descrito este mesmo evento no referencial linha. A figura 18 ilustra a forma como organizamos a pergunta.

Figura 18 – Pergunta 4 - Instrução entre Pares

No caso ao lado (evento B com $d = 5$, $t = 1$ e velocidade relativa de $0,6c$), o que pode-se dizer sobre os eventos A e B?

- ☐ A O evento B ocorre após o A em ambos os referenciais.
- ☐ B Não sei.
- ☐ C Os eventos são simultâneos no ref. linha.
- ☒ D O evento B ocorre antes do evento A no ref. linha.



Fonte: Elaboração Própria.

Os alunos terão cerca de 5 a 10 minutos para responder à pergunta. Alcançados os 70% de acertos, realize uma breve discussão com os estudantes, comparando a pergunta 3 com a pergunta 4.

Apresente a última pergunta (figura 19). Assim como a pergunta anterior, o objetivo é discutir os conceitos de quebra de causalidade. Dê cerca de 5 a 10 minutos para que os discentes respondam.

Alcançados os 70% de acertos, realize uma discussão acerca dos conceitos de quebra de causalidade. Como sugestão, dê alguns exemplos hipotéticos, como:

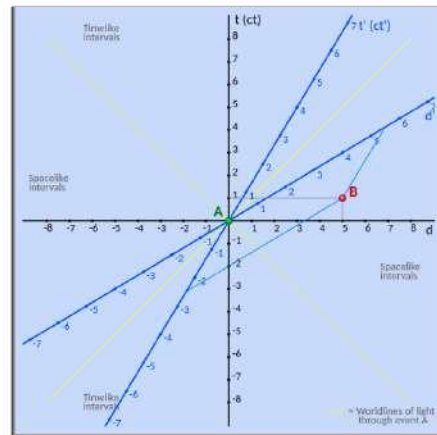
- Comer antes de cozinhar.
- Nascer antes do nascimento da sua mãe.

Figura 19 – Pergunta 5 - Instrução por Pares

Suponha que A é a emissão de um sinal com velocidade maior do que a luz, causando o evento B. (Uma situação análoga seria A como um raio infravermelho emitido para ligar uma televisão por controle remoto. A TV liga quando o recebe o sinal no evento B).

Voltando para a nossa situação hipotética, o que podemos dizer?

- ☐ A A TV ligaria antes do controle ser acionado.
- ☐ B A TV ligaria após o controle ser acionado.
- ☐ C Não sei.
- ☐ D A TV liga instantaneamente ao acionar o controle.



Fonte: Elaboração Própria.

Por fim, finalize através da discussão com uma pergunta: **Podemos ter velocidade maior que a velocidade da luz?**

Com os exemplos acima, fica claro que fixado um evento, digamos A, teremos 3 possibilidades para um outro evento, digamos, B:

1. Ele fica dentro do cone de luz de A. Neste caso, existe um referencial em que A e B são espaçados temporalmente. A pode ser visto como causa de B.
2. B fica sobre o cone de luz. Neste caso, A e B são conectados por um sinal luminoso e também é possível estabelecer uma relação de causalidade entre os dois.
3. B agora está fora do cone de luz. Neste caso não é possível estabelecer relação de causalidade entre o par. Contudo, existe um referencial em que A e B são simultâneos.

Graficamente, tem-se uma consequência das transformações de Lorentz, que conecta coordenadas de referenciais que se deslocam um relação ao outro. Quando um referencial, digamos, S' , se afasta de outro referencial S , os eixos ct' e x' ficam inclinados, como bem representado nas figuras acima.

Suponhamos que mesmo assim (com A e B na situação 3), seja possível enviar um sinal de A para B com velocidade acima da velocidade da luz. Neste caso, conforme indica a figura 19, concluiríamos que B ocorre antes do que A, ou seja a causa ocorre depois da consequência, quebrando causalidade. Este fato estranho aconteceria se admitíssemos velocidades acima de c . Conduza a discussão levando estas considerações.

Como sugestão, diga aos alunos que eles retomem os exemplos anteriores e prestem atenção nas falas dos mesmos, encaminhando-os para uma discussão conceitual adequada. Feita a pergunta, encerre o quarto encontro.

6 QUINTO ENCONTRO

O quinto e último encontro tem como objetivo discutir conceitos relacionados ao emaranhamento quântico e à não localidade. Este encontro está pautado na metodologia POE.

Separe cerca de 10 a 15 minutos para realizar uma breve revisão do que foi apresentado até o momento. Caso surjam dúvidas, não deixe de saná-las.

Organize a turma nas mesmas duplas ou trios formados anteriormente e entregue a cada estudante o Questionário 2 (Apêndice D).

Orienta novamente os alunos sobre a metodologia que será utilizada e solicite que não alterem suas respostas após a conclusão de cada etapa, respeitando o processo investigativo proposto. Ressalte a importância de registrar observações e reflexões, uma vez que essas anotações são fundamentais para a sistematização e organização do novo conhecimento adquirido ao longo da sequência.

Apresente a figura 20 aos estudantes. Explique que a figura é uma representação da emissão de um par de partículas liberadas para um lado e outro e que ambas estão correlacionadas com *spin up* e *down*.

Figura 20 – Emissão de um par emaranhado



Fonte: Ilustração gerada com auxílio do ChatGPT (OpenAI), a partir de descrição textual fornecida pelo autor.

Após a apresentação, dê cerca de 5 a 10 minutos para que os estudantes respondam à pergunta 1 do Questionário 2. Esta pergunta (figura 21) corresponde à etapa Predizer. Mencione aos estudantes a situação representada é de duas pessoas (Bruno e Patrick), cada uma em um laboratório separado, com uma distância considerável entre eles.

Figura 21 – Pergunta 1 - Questionário 2

Pergunta 1

Suponha o arranjo do Stern-Gerlach acima, com duas pessoas localizadas numa distância elevadíssima (uma no Japão e a outra no Brasil, por exemplo). O que pode ocorrer?

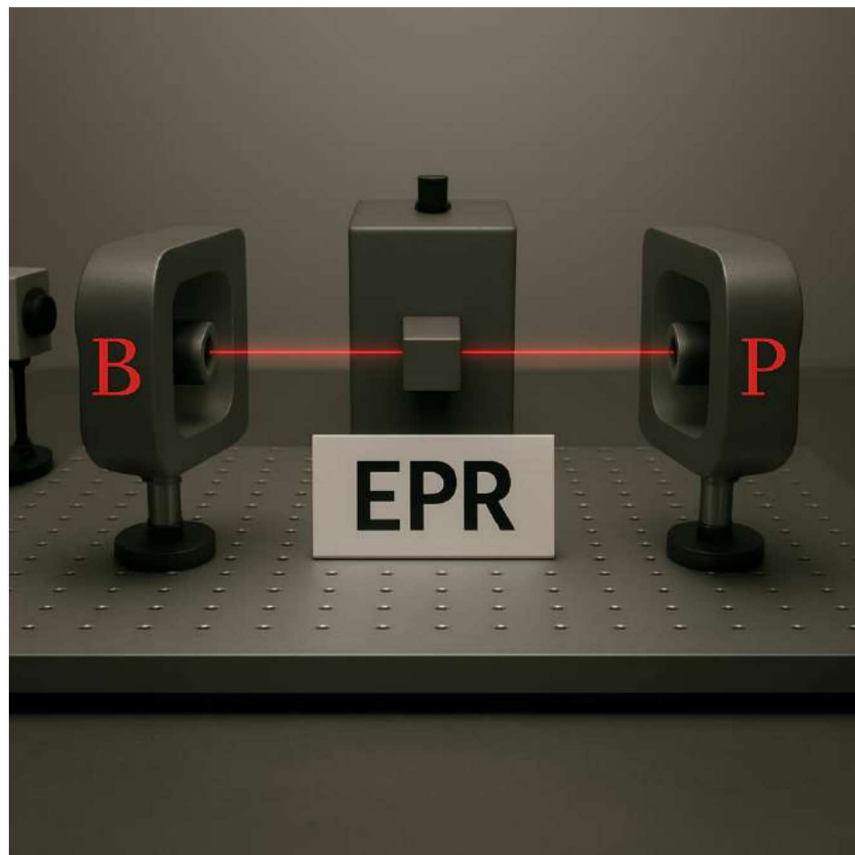
- a) Ambos receberão o átomo apontando “para cima”
- b) Ambos receberão o átomo apontando “para baixo”
- c) Um receberá o átomo apontando “para cima” e o outro “para baixo”
- d) O átomo ficará perdido por conta da distância, não sendo possível medir em um dos casos
- e) nenhuma das alternativas listadas acima (explicação na justificativa)

Justificativa:

Fonte: Elaboração Própria.

Para a etapa Observar, apresente a figura 22.

Figura 22 – Parte do arranjo utilizado no Questionário 2



Fonte: Ilustração gerada com auxílio do ChatGPT (OpenAI), a partir de descrição textual fornecida pelo autor.

Explique que você liberou um par de partículas para um lado e outro e que ambos estão correlacionadas com *spin up* e *down*, cujo estado é representado por:

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle_B |1\rangle_P + |1\rangle_B |0\rangle_P). \quad (6.1)$$

Explique também aos estudantes que as informações apresentadas correspondem à medida realizada no laboratório de Bruno.

Reserve cerca de 3 a 5 minutos para esta etapa, para que os alunos consigam realizar a descrição entre equipes acerca do que foi observado.

Peça que os estudantes respondam à pergunta 2 (figura 23) e dê cerca de 5 a 10 minutos para que a realizem. Ao final da pergunta, e das explicações dos alunos, formalize com os mesmos alguns dos conceitos.

Figura 23 – Pergunta 2 do Questionário 2

Pergunta 2

Se o medido no laboratório do Bruno foi “cima”, qual seria a medida no laboratório de Patrick?

Uma medida pode influenciar instantaneamente no que ocorre no outro laboratório?

Fonte: Elaboração Própria.

Um possível conflito aqui ocorre quando um dos laboratórios, por exemplo, laboratório B do Bruno, afastado do laboratório P do Patrick faz uma medição sobre o sistema e descobre o *spin*, digamos, *up*. Neste caso, pelo colapso já discutido anteriormente, o estado após a medição é:

$$|\Psi'\rangle = |0\rangle_B |1\rangle_P \quad (6.2)$$

A medição de Bruno poderia então influenciar o estado do sistema que está no laboratório do Patrick instantaneamente? Mas nossa discussão anterior mostrou que propagação de sinais com velocidade maior que c poderia gerar quebra de causalidade, certo?

Este simples exemplo retrata este caráter estranho da mecânica quântica - o emaranhamento, explícito no estado $|\Psi\rangle$, sugere que partículas possam afetar uma à outra instantaneamente, mesmo que afastadas.

Mesmo que a medição em uma partícula instantaneamente afete o estado da outra, para verificar a correlação, os dois experimentadores precisam comparar os resultados — e isso requer comunicação clássica, que obedece à limitação da velocidade da luz.

Aborde estas questões com os estudantes, retomando sempre que possível e necessário aos conceitos abordados previamente. Assim, concluimos a sequência chegando à não-localidade.

APÊNDICE B – Questionário 1

Pergunta 1

O que vai acontecer com o átomo (lembrando que ele se comporta como um ímã que foi reduzido em escala) ao passar pelo campo magnético? Marque a opção e justifique sua resposta

- a) irá parar em todas as direções da parede, como os ímãs no início do vídeo.
- b) irá parar nas direções em cima e embaixo da parede.
- c) irá parar no centro da parede.
- d) irá parar apenas na direção de baixo da parede.
- e) nenhuma das alternativas listadas acima (explicação na justificativa)

Justificativa:

Pergunta 2

O que você pode dizer sobre o fenômeno observado? A sua resposta anterior vai de encontro com o apresentado no vídeo? Justifique.

Pergunta 3

Se colocarmos um “obstáculo” no “baixo/negativo” e mais um campo magnético, o que pode acontecer? Justifique

- a) passará apenas para parte de “cima/positiva”
- b) passará tanto em “cima/positivo” quanto em “baixo/negativo”.
- c) passará apenas na parte de “baixo/negativa”
- d) falta informação para responder
- e) nenhuma das alternativas listadas acima (explicação na justificativa)

Pergunta 4:

O resultado esperado te surpreendeu? O que se pode dizer sobre o comportamento observado e qual sua relação com os valores que são observados abaixo dos aparatos que produzem campo magnético?

Pergunta 5

Se mantermos o “obstáculo” no “baixo/negativo” e alterarmos a direção de um campo magnético, o que pode acontecer? Justifique

Justificativa:

Pergunta 6

O que se pode dizer sobre o comportamento observado e qual sua relação com os valores que são observados abaixo dos aparatos que produzem campo magnético?

Pergunta 7

Se mantermos a configuração anterior e acrescentarmos mais um campo magnético, o que pode acontecer? Justifique

- a) o átomo ficará “preso” no segundo campo magnético.
- b) o mesmo que na configuração anterior.
- c) passará apenas na parte de “cima/positiva”
- d) falta informação para responder.
- e) nenhuma das alternativas listadas acima (explicação na justificativa)

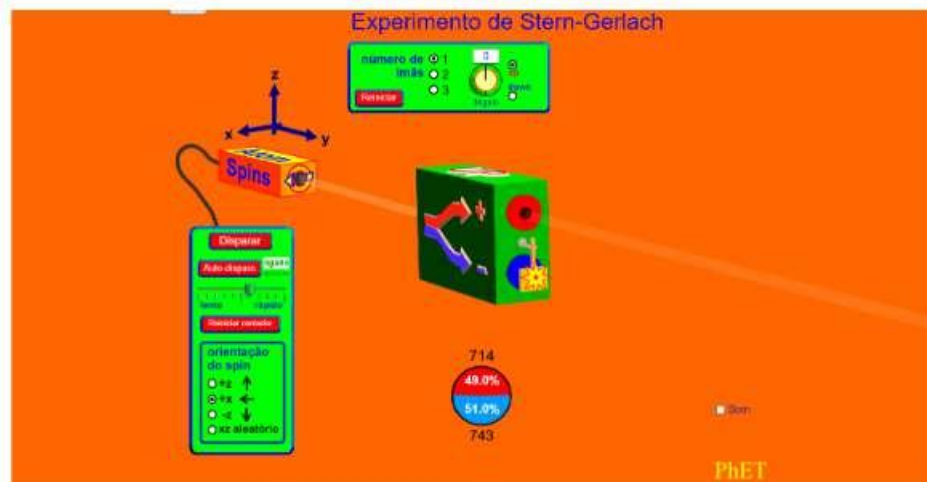
Justificativa:

Pergunta 8

O que se pode dizer sobre o comportamento observado e qual sua relação com os valores que são observados abaixo dos aparatos que produzem campo magnético? Será que há alguma relação com as configurações vistas anteriormente?

Pergunta 9

O sistema na configuração abaixo (antes e após a passagem dos átomos pelo campo magnético) pode ser representado na nossa notação de que forma?



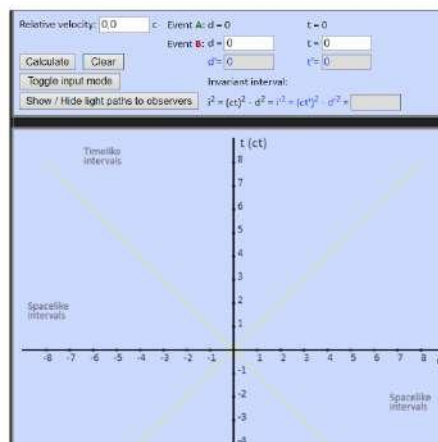
Resposta:

APÊNDICE C – Perguntas não localidade (Instrução entre Pares)

Pergunta 1 - Encontro 3

O que vai acontecer no referencial linha se colocarmos um evento B com $d = 2$, $t = 4$ e velocidade relativa igual à zero?

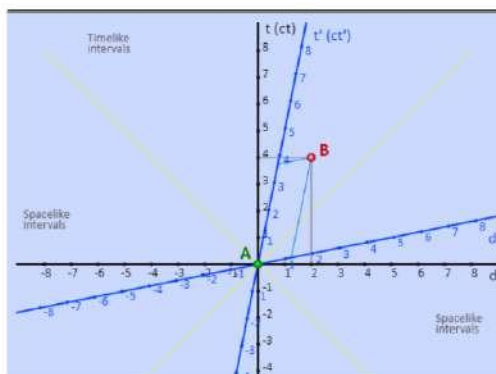
- ☐ A O evento B ocorre depois de A e tem coordenadas diferentes do referencial d, ct.
- ☐ B Não sei.
- ☐ C O evento B ocorre depois de A e tem as mesmas coordenadas do referencial d, ct.
- ☐ D O evento B ocorre antes de A e tem as mesmas coordenadas do referencial d, ct.



Pergunta 2 - Encontro 3

Com base no exemplo anterior (evento B com $d = 2$, $t = 4$) e considerando agora uma velocidade relativa de $0,2c$, o que vai acontecer que vai acontecer no referencial linha?

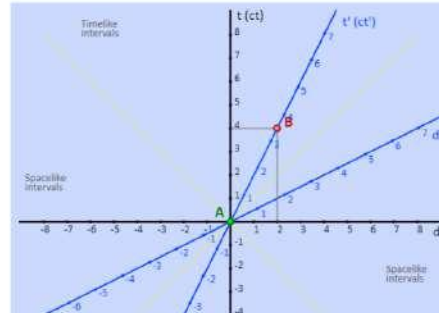
- ☐ A O evento B ocorre depois de A e tem coordenadas diferentes do referencial d, ct.
- ☐ B O evento B ocorre antes de A e tem coordenadas diferentes do referencial d, ct.
- ☐ C O evento B ocorre depois de A e tem as mesmas coordenadas do referencial d, ct.
- ☐ D Não sei.



Pergunta 3 - Encontro 3

Seguindo o exemplo anterior (evento B com $d = 2$, $t = 4$), substituindo a velocidade relativa de $0,2c$ para $0,5c$ é correto afirmar que:

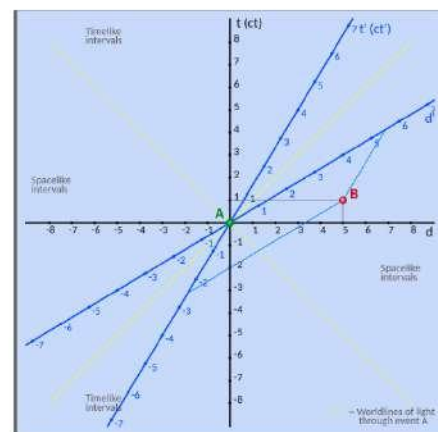
- ☐ A Não sei.
- ☐ B No ref. linha "sinal" está em repouso.
- ☐ C No ref. linha os eventos são simultâneos porque estão sob o eixo temporal.
- ☐ D Os eventos são simultâneos em ambos os referenciais.



Pergunta 4 - Encontro 4

No caso ao lado (evento B com $d = 5$, $t = 1$ e velocidade relativa de $0,6c$), o que pode-se dizer sobre os eventos A e B?

- ☐ A O evento B ocorre após o A em ambos os referenciais.
- ☐ B Não sei.
- ☐ C Os eventos são simultâneos no ref. linha.
- ☒ D O evento B ocorre antes do evento A no ref. linha.

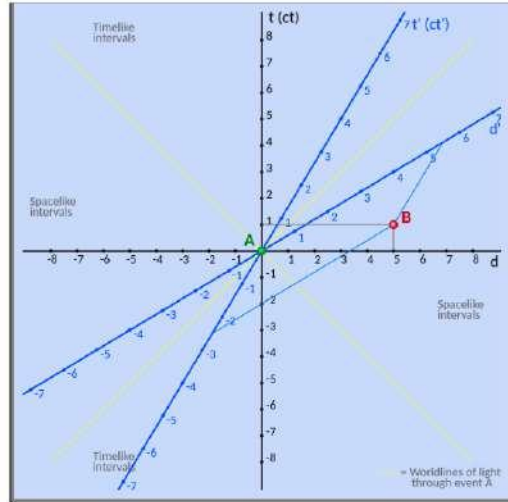


Pergunta 5 - Encontro 4

Suponha que A é a emissão de um sinal com velocidade maior do que a luz, causando o evento B. (Uma situação análoga seria A como um raio infravermelho emitido para ligar uma televisão por controle remoto. A TV liga quando o recebe o sinal no evento B).

Voltando para a nossa situação hipotética, o que podemos dizer?

- ☐ A A TV ligaria antes do controle ser acionado.
- ☐ B A TV ligaria após o controle ser acionado.
- ☐ C Não sei.
- ☐ D A TV liga instantaneamente ao acionar o controle.



APÊNDICE D – Questionário 2

Pergunta 1

Suponha o arranjo do Stern-Gerlach acima, com duas pessoas localizadas numa distância elevadíssima (uma no Japão e a outra no Brasil, por exemplo). O que pode ocorrer?

- a) Ambos receberão o átomo apontando “para cima”
- b) Ambos receberão o átomo apontando “para baixo”
- c) Um receberá o átomo apontando “para cima” e o outro “para baixo”
- d) O átomo ficará perdido por conta da distância, não sendo possível medir em um dos casos
- e) nenhuma das alternativas listadas acima (explicação na justificativa)

Justificativa:

Pergunta 2

Se o medido no laboratório do Bruno foi “cima”, qual seria a medida no laboratório de Patrick?

Uma medida pode influenciar instantaneamente no que ocorre no outro laboratório?