

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.

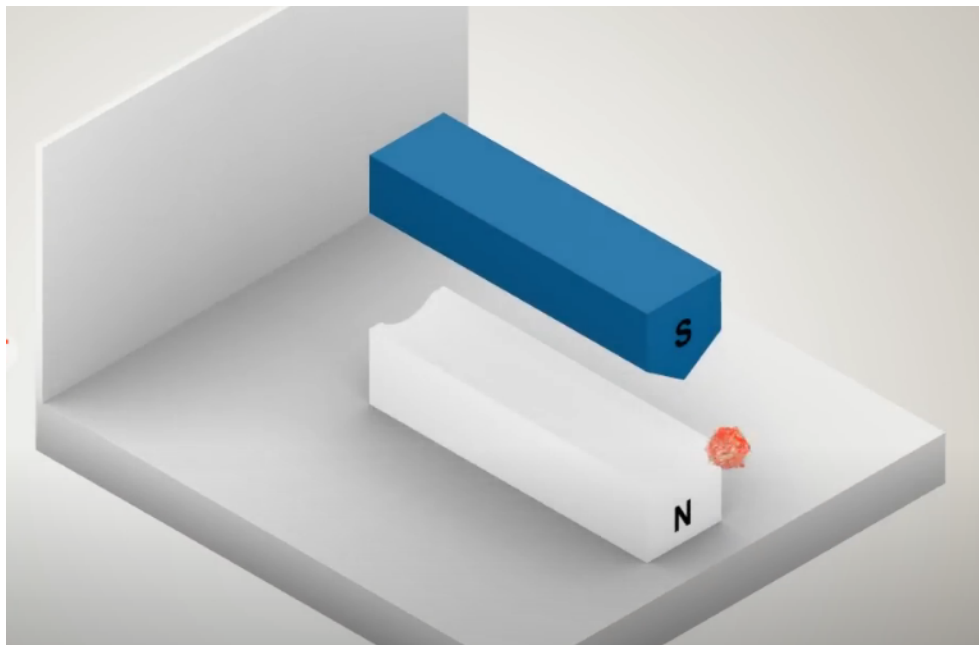
Procure enfatizar que o objetivo da atividade não é identificar respostas certas ou erradas. Acreditamos que essa abordagem contribui para evitar respostas engessadas e estimula a livre expressão do pensamento dos alunos.

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.

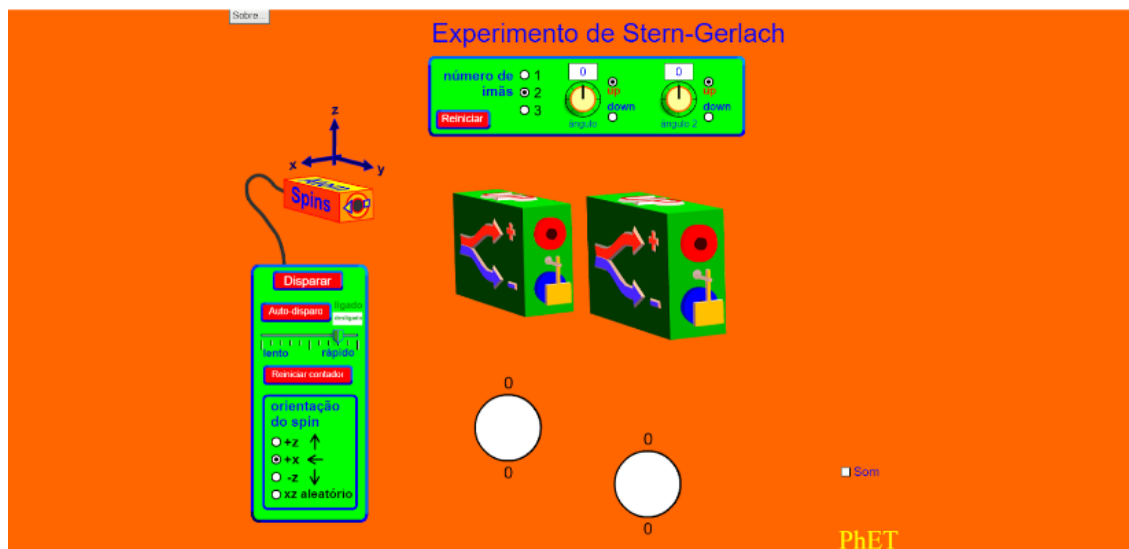
Após os alunos responderem, libere o simulador para que os alunos realizem em grupos a descrição do fenômeno. Nesta etapa, é possível ajustar os controles de velocidade e disparo (automático ou manual). Este momento corresponde à etapa de Observar.

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?

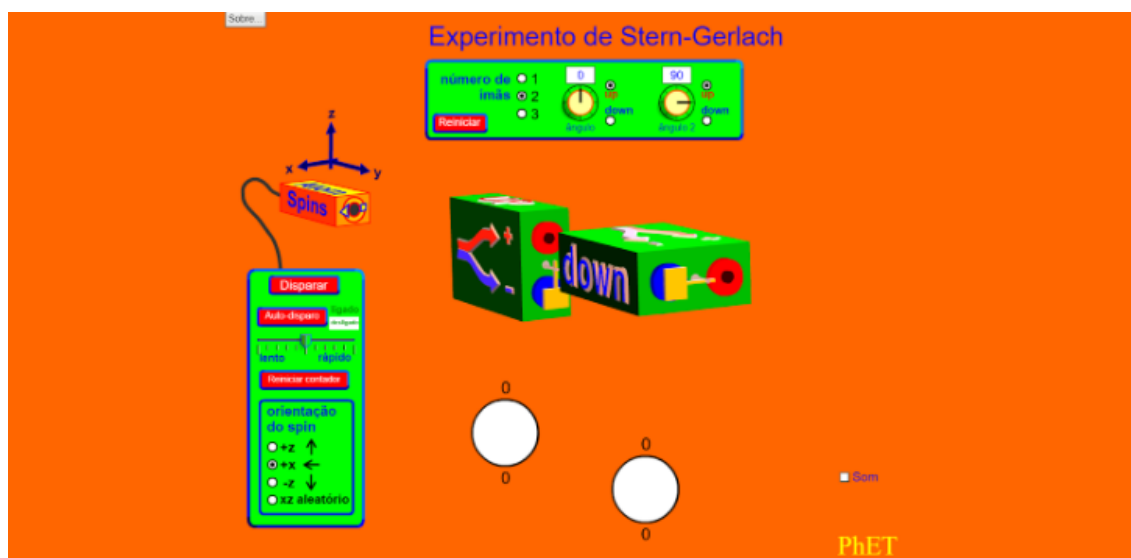
Fonte: Elaboração Própria.

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

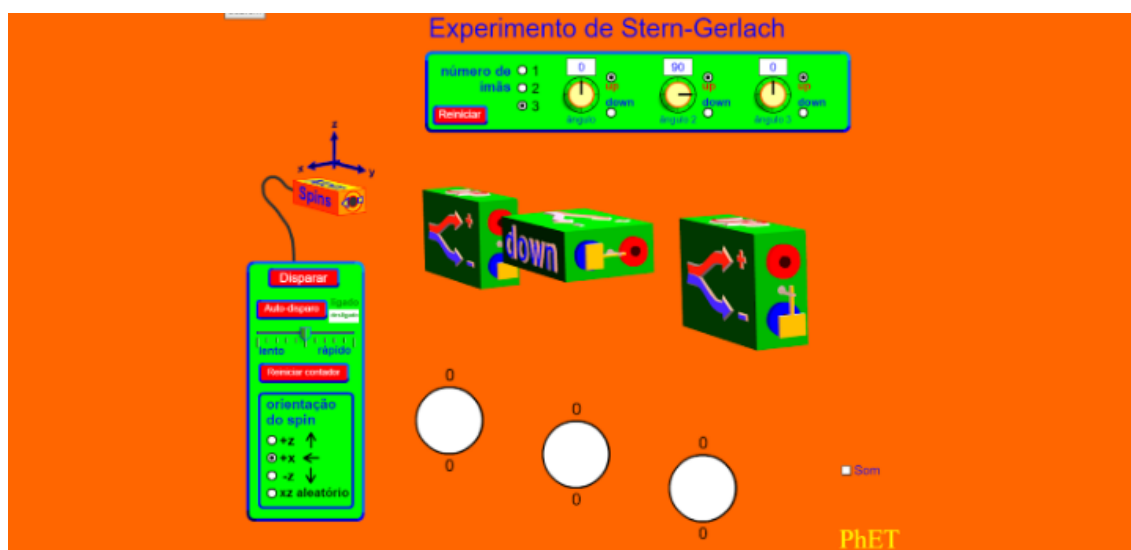
O que se pode dizer sobre o comportamento observado e qual sua relação com os valores que são observados abaixo dos aparatos que produzem campo magnético?

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.

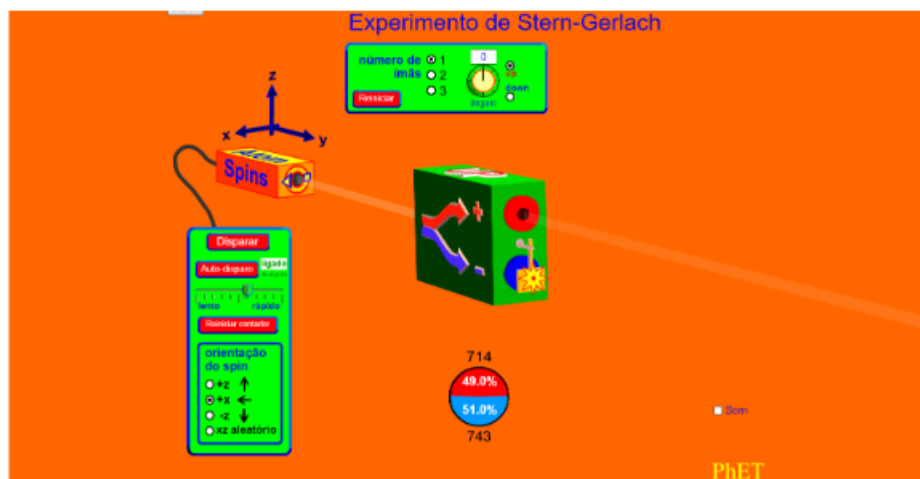
A equação (3.1) apresenta uma forma menos “técnica” da Notação de Dirac. O objetivo é introduzir a notação aos estudantes (sem que eles saibam explicitamente que se trata da notação de Dirac) de maneira a evitar os grandes formalismos matemáticos.

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.

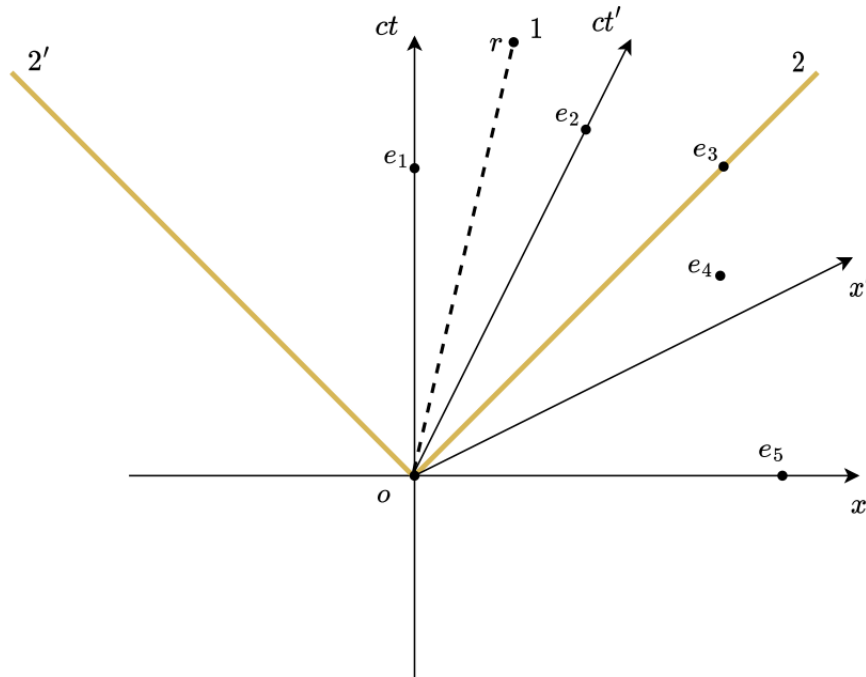
A figura 14 apresenta a representação do cone de luz do evento o , eixos de coordenadas espaciais e temporais de dois referenciais (com e sem linha), diversos eventos e uma linha de universo tracejada de uma partícula deslocando-se em relação aos referenciais com e sem linha.

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.

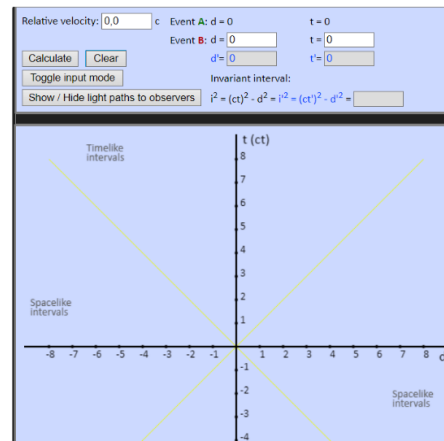
Feito isso, apresente o simulador de diagramas espaço-tempo de Minkowski (disponível em: <http://www.trell.org/div/minkowski.html>). Comente também sobre as funcionalidades do simulador e inicie a primeira pergunta.

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.

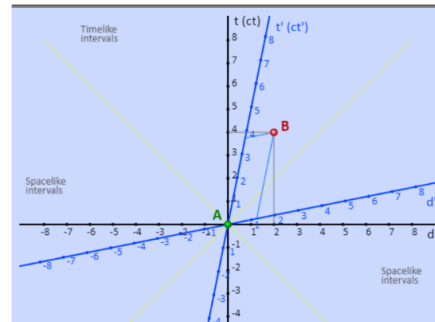
Assim que alcançados os 70% de acertos, altere no simulador a velocidade relativa para $0,5c$ e realize a terceira pergunta (figura 17). Dê cerca de 3 a 5 minutos para que os alunos a respondam.

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.

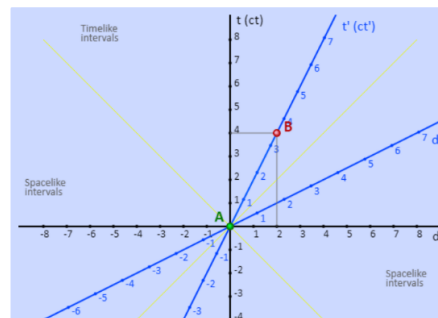


Fonte: Elaboração Própria.

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.

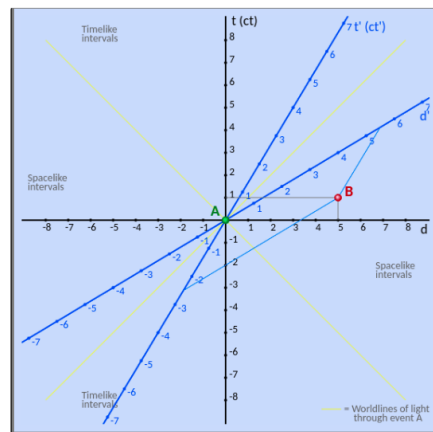
Reserve cerca de 5 a 10 minutos para uma breve revisão dos assuntos que foram discutidos anteriormente, sobretudo relembrando a última atividade, que discutia o conceito de causalidade.

No simulador utilizado na aula passada, insira velocidade relativa igual a $0,6c$, $d = 2$ e $t = 4$ (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 $d = 2$, $t = 4$ 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:

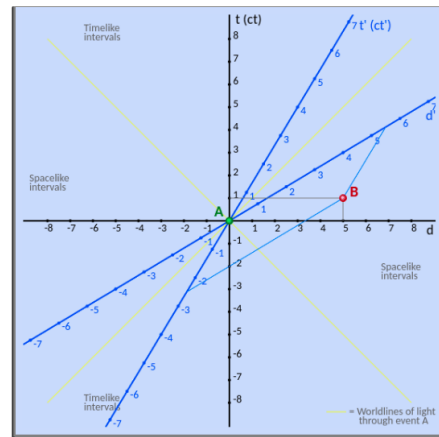
- Comer antes de cozinhar.
- Nascer antes do nascimento da sua mãe.

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).

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 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?

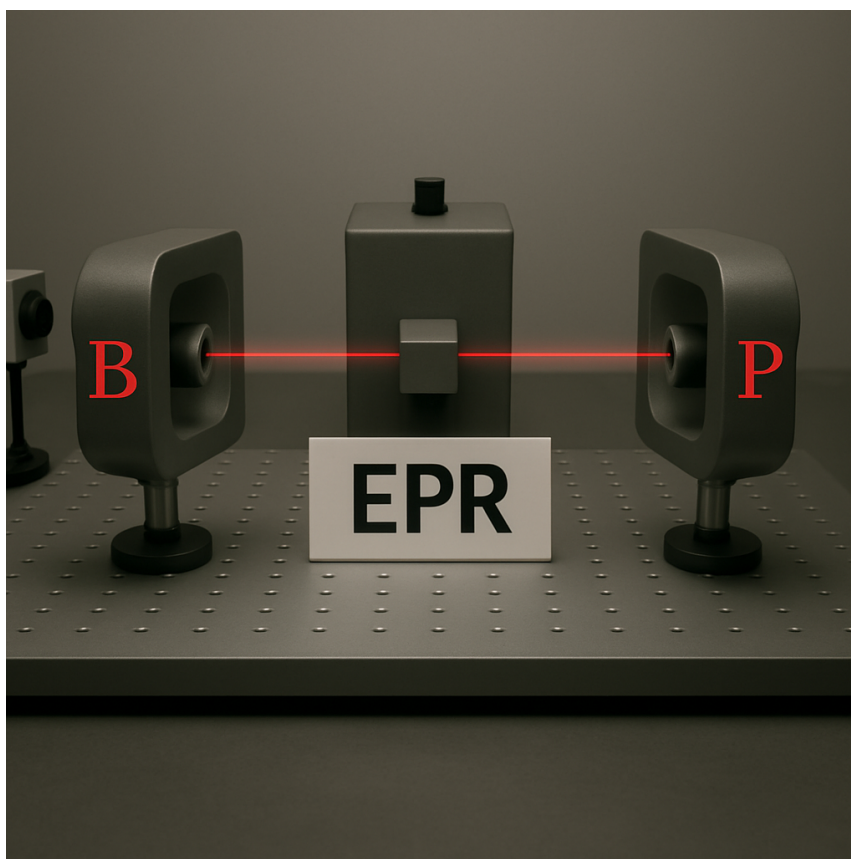
- a) Ambos receberão o átomo apontando “para cima”
- b) Ambos receberão o átomo apontando “para baixo”
- c) Um receberá o átomo apontando “para cima” e o outro “para baixo”
- d) O átomo ficará perdido por conta da distância, não sendo possível medir em um dos casos
- e) nenhuma das alternativas listadas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