
KIT QUANTUM (Q)

Entrelaçamento:

Laboratório para Alunos do Ensino Médio

Manual do Professor



WOMEN SUPPORTING
WOMEN IN THE SCIENCES

Declaração de missão

A missão deste laboratório é ensinar alunos do ensino médio (idades entre 12 e 18 anos) sobre entrelaçamento e medição de estados entrelaçados por meio de experimentos e actividades análogas.

Conteúdo

1. Introdução aos kits de laboratório WS2	4
1.1. Informações sobre o WS2	4
1.2. Usando este Guia	4
1.3. Vocabulário-chave.....	5
1.4. Pergunta-chave.....	6
1.5. Objectivo	6
1.6. Conceitos científicos fundamentais abordados	6
1.7. Habilidades práticas	7
2. Contexto dos Tópicos Principais	7
2.1. Entrelaçamento e Correlação.....	7
3. Resumo dos Experimentos.....	9
3.1. Lista de Suprimentos	9
3.2. Informações de segurança	9
3.3. Pré-laboratório do professor.....	10
4. Experimentos.....	14
4.1. Questões pré-laboratoriais	14
4.2. Part I. “Medindo” pelo tacto	14
4.2.2. Materiais.....	15
4.2.4. Resultados	16
4.3. Parte II: Tangled!.....	19
4.3.1. Informações Adicionais.....	19

4.3.2.	Materiais.....	19
4.3.3.	Procedimento (trabalho em grupos de 2 ou 4)	20
4.3.4.	Perguntas pós-actividade.....	21
5.	Desafio de Design.....	22
5.1	Questões de Design	23
5.2	Esboço de Design.....	24
6.	Fontes.....	25

1. Introdução aos kits de laboratório WS2

1.1. Informações sobre o WS2

A Women Supporting Women in the Sciences (WS2), uma organização internacional que une e apoia mulheres de nível de pós-graduação e profissional e aliadas em ciência, tecnologia, engenharia e matemática (STEM), recebeu um Fundo de Inovação da Sociedade Americana de Física (APS) em 2020 para formar equipes internacionais a fim de projectar e distribuir kits de laboratório de física e ciência dos materiais de baixo custo para alunos do ensino fundamental e médio, predominantemente na África Oriental. Os kits de laboratório utilizaram recursos locais e incluíram tópicos especialmente relevantes para meninas, a fim de estimular seu interesse por disciplinas STEM. De 2020 a 2023, mais de 5.100 alunos da África Oriental em mais de 40 escolas se envolveram com nossos kits de laboratório, sendo 62% meninas.

A WS2 recebeu seu segundo Fundo de Inovação da APS em 2025 para apoiar outra Iniciativa de Kits de Laboratório, desta vez com foco em tópicos quânticos. Para mais informações sobre a WS2, visite nosso site em ws2global.org.

O WS2 é patrocinado pelo Fundo de Inovação da APS, pelo Fórum APS sobre Educação, pelo Centro de Pesquisa em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Northwestern e pelo Departamento de Assuntos Estudantis Multiculturais da Universidade Northwestern. O WS2 é extremamente grato aos voluntários responsáveis pelo projecto do kit de laboratório por seu árduo trabalho e aos consultores externos (SciBridge e Projekt Inspire) por sua orientação. O WS2 também agradece e reconhece o PhysicsQuest (<https://www.aps.org/initiatives/physics-education/physicsquest>) e o Quantum Explorations Student Toolbox (QuEST) pelos experimentos que serviram de base para o conteúdo do kit de laboratório.

1.2. Usando este Guia

Este manual deve ser utilizado pelo professor ou facilitador do kit de laboratório e possui conteúdo semelhante ao manual do aluno, mas pode conter material adicional, a saber: Conceitos Fundamentais de Ciências Abordados, Habilidades Práticas, Resumo de Experimentos, Pré-Laboratório do Professor e Solução de Problemas. Essas seções adicionais visam fornecer ao professor o conhecimento e a base essenciais para a implementação bem-sucedida deste kit de laboratório em sala de aula. Recomenda-se que os professores deste kit de laboratório leiam o guia do início ao fim para se familiarizarem com o conteúdo antes de ensiná-lo aos alunos. Dúvidas sobre o conteúdo podem ser direcionadas a qualquer momento para

ws2global.org@gmail.com, usando o assunto "Dúvida sobre o Conteúdo do Kit de Laboratório".

NOTAS IMPORTANTES:

- Este kit de laboratório destina-se ao uso com alunos do ensino médio (idades entre 12 e 18 anos), mas, dependendo da formação educacional específica dos alunos, o conteúdo pode precisar ser modificado pelo professor para torná-lo mais simples ou mais complexo. O professor também é incentivado a abordar o conteúdo no ritmo que for melhor para os alunos; alguns alunos mais jovens podem precisar de mais tempo e atenção do professor e/ou facilitador para analisar as questões e os experimentos, enquanto alunos mais velhos podem ser mais independentes e exigir menos atenção do professor e/ou facilitador. Portanto, o conteúdo abordado, a profundidade da abordagem e o ritmo ficam a critério do professor e/ou facilitador.
- O conteúdo deste manual de kit de laboratório pode não se adequar ao currículo específico da escola em que está sendo ensinado. Fica a critério do(s) facilitador(es) e do(s) professor(es) introduzir novos conteúdos ou pular determinadas seções que não sejam aplicáveis às suas salas de aula.
- Em certas áreas, podem ser necessárias modificações na lista de materiais, dependendo da disponibilidade de materiais na área específica em que o laboratório está sendo ministrado. Tentamos listar algumas alternativas na lista de materiais, mas entendemos que esta lista de alternativas não é exaustiva.
- Nos experimentos, os alunos são divididos em grupos de três a quatro. Se os materiais permitirem, os alunos podem ser divididos em grupos de dois.

1.3. Vocabulário-chave

- Quântico – unidade fundamental envolvida nas interações nas escalas atômica e subatômica (exemplos: quantum de luz é fóton; quantum de electricidade é elétron)
- Entrelaçamento – fenômeno em que duas ou mais partículas quânticas se ligam de modo que a medição do estado de uma determina instantaneamente o estado da outra, independentemente da distância
- Superposição – a ideia de que uma partícula quântica pode existir em vários estados ao mesmo tempo até ser medida ou observada

- Medição – o processo de observação de um sistema quântico que força o sistema a se tornar um estado único e definido

1.4. Pergunta-chave

- Como o entrelaçamento é definido na mecânica quântica?
 - *Resposta: O entrelaçamento é definido como o fenômeno em que duas ou mais partículas quânticas se tornam ligadas ou correlacionadas, de tal forma que a medição de um estado das partículas determina instantaneamente o estado da outra, independentemente de quão distantes elas estejam.*

1.5. Objectivo

O objectivo deste manual de laboratório é introduzir o entrelaçamento quântico por meio de actividades e experimentos. Os alunos refletirão sobre como partículas entrelaçadas em superposição podem ser medidas para compreender informações sobre ambas as partículas instantaneamente, independentemente da distância entre elas. Isso será demonstrado analogamente com bolas, utilizando a "medição" pelo tacto, e com um jogo.

1.6. Conceitos científicos fundamentais abordados

Este kit de laboratório introduz o tópico de entrelaçamento, relevante para diversas áreas, incluindo Física, Química e Computação, para alunos do Ensino Fundamental/Médio e do Ensino Médio. Especificamente, o kit de laboratório incentiva os alunos a refletir sobre como partículas entrelaçadas em estados de superposição podem ser medidas e o que isso significa para as demais partículas entrelaçadas. Os alunos obterão as seguintes conclusões principais: (1) superposição significa que um objecto pode existir em múltiplos estados simultaneamente; (2) objectos entrelaçados estão interligados de tal forma que saber algo sobre um deles fornece informações sobre o outro instantaneamente, mesmo que o objecto esteja do outro lado do mundo; e (3) a medição de um sistema força os objectos a estarem em estados definidos.

1.7. Habilidades práticas

- Os alunos compreenderão entrelaçamento e superposição, relevantes para criptografia quântica e comunicações.
- Os alunos trabalharão juntos em equipes e desempenharão papéis rotineiros nessas equipes.
- Os alunos ganharão experiência pesando objectos e registrando resultados em tabelas.
- Os alunos ganharão experiência aprendendo um jogo e seguindo instruções para jogá-lo.

2. Contexto dos Tópicos Principais

2.1. Entrelaçamento e Correlação

Você já jogou uma moeda para o alto e esperou para ver se daria cara ou coroa? E se a moeda pudesse dar cara e coroa ao mesmo tempo até você olhar para ela? Essa ideia estranha é chamada de superposição e é um conceito-chave na mecânica quântica, que é basicamente o estudo da matéria em escalas muito pequenas. Na verdade, quântico significa a menor unidade de algo. Agora imagine que você tem dois balões de cores diferentes, um azul e um vermelho. Agora você dá um balão para um amigo do outro lado do mundo e fica com o segundo balão, mas ainda não sabe as cores dos balões. Se fossem balões quânticos, diríamos que os balões estão em estados de superposição, o que significa que são vermelhos e azuis. Esses balões quânticos também têm outra propriedade interessante: estão interligados, também conhecida como correlacionados. Assim que você verifica a cor de um balão, instantaneamente sabe a cor do outro, mesmo que eles estejam em lados opostos do mundo. Essa conexão misteriosa é conhecida como entrelaçamento e também ocorre em sistemas quânticos. O entrelaçamento fornece correlações instantâneas entre duas coisas após a medição, que é o processo de observação que força o estado de algo a se tornar definido (e não em um estado de superposição).

Então, como funcionam esses efeitos quânticos? Quando uma partícula quântica, como um fóton, que é a menor unidade de luz, não está sendo observada, ela existe em uma mistura de múltiplas possibilidades. Mas, no momento em que é medida, ela "escolhe" um estado definido. Da mesma forma, partículas entrelaçadas permanecem misteriosamente ligadas, resultando de uma interação em algum momento de sua história. Essa ligação ou correlação significa que a medição de uma determina

instantaneamente o estado da outra (como demonstrado visualmente na Figura 1), independentemente da distância entre elas. Isso desafia nossa compreensão cotidiana de causa e efeito.

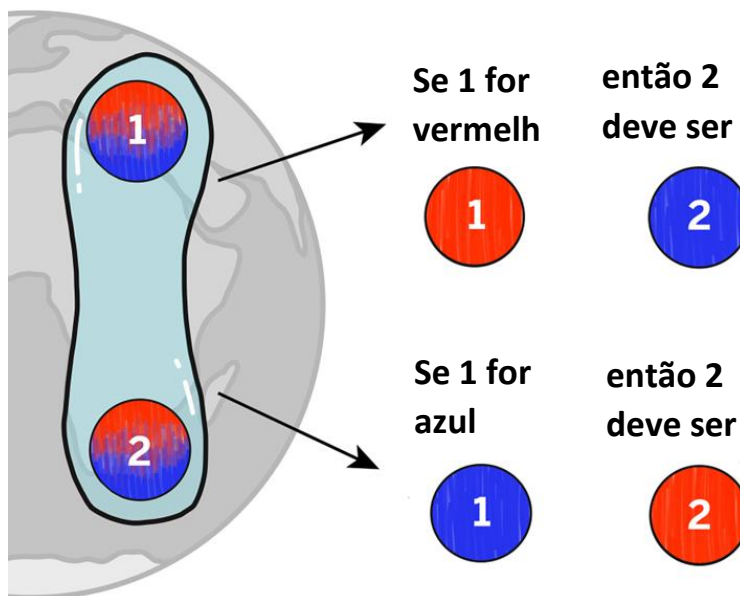


Figura 1. Uma demonstração da regra do entrelaçamento usando partículas entrelaçadas de duas cores, onde se a primeira partícula for vermelha, sabemos imediatamente que a segunda partícula é azul, e vice-versa. Fonte: <https://quantumatlas.umd.edu/entry/entanglement/>.

Os cientistas há muito tempo são fascinados por essas estranhas propriedades quânticas, que são diferentes do que é observado em objectos clássicos. Essas ideias foram exploradas teoricamente pela primeira vez por cientistas famosos como Albert Einstein, Niels Bohr e Erwin Schrödinger. Einstein se referiu ao entrelaçamento como "ação fantasmagórica à distância" porque parecia tão bizarro e contraintuitivo. Evidências experimentais provando que os sistemas quânticos se comportam dessa maneira extraordinária surgiram mais tarde, baseadas no trabalho de John Bell, que formulou a desigualdade de Bell para testar os limites do comportamento clássico versus quântico.

Compreender esses comportamentos quânticos é crucial porque constitui a base de muitas tecnologias modernas, incluindo computação quântica, criptografia espaço-espaço, espaço-Terra e sistemas de comunicação. Por exemplo, os protocolos de comunicação quântica formam a base para o teletransporte quântico e a distribuição quântica de chaves (QKD). No teletransporte quântico, o entrelaçamento é usado para transmitir informações quânticas (estado da partícula) sem transferi-la fisicamente. Na QKD, partículas entrelaçadas são usadas para gerar chaves de criptografia

comprovadamente seguras. Qualquer tentativa de espionagem interrompe o entrelaçamento, alertando imediatamente os usuários sobre uma violação.

3. Resumo dos Experimentos

Este kit de laboratório consiste em um experimento, um jogo e um desafio de design para compreender os conceitos de entrelaçamento. Esta investigação começará fornecendo informações básicas sobre entrelaçamento, correlação e superposição, antes de apresentar esses fenômenos aos alunos por meio de analogias. Os objectivos dos experimentos e do desafio de design são os seguintes:

Parte I: Demonstrar a superposição e o entrelaçamento com bolas e a medição por tacto.

Parte II: Demonstrar a superposição e o entrelaçamento com moedas giratórias e cartas de estado por meio do jogo Enrolados.

Desafio de Design: Projectar um dispositivo que use entrelaçamento e superposição para fazer algo divertido ou útil.

3.1. Lista de Suprimentos

- Copos idênticos
- Dois tipos de bolas com pesos muito diferentes (como metal e plástico)
- Marcador
- Tecido (como uma venda)
- Moedas com dois lados transparentes (identificados como cara e coroa)
- Peças de jogo entrelaçadas (cartas de jogo, tabuleiros de jogo, cartões de pontuação impressos)
- Balança (opcional)

3.2. Informações de segurança

Antes de os alunos iniciarem o laboratório, levem em consideração as seguintes questões de segurança:

- Ao se deslocar para locais diferentes ou para trás de uma divisória, especialmente com os olhos vendados, fique atento aos obstáculos para evitar acidentes.

3.3. Pré-laboratório do professor

Os professores podem organizar os materiais para os experimentos com antecedência. Para cada aluno ou cada grupo de 2 a 4 alunos, os materiais necessários são: 2 copos idênticos, 2 bolas com pesos bem diferentes, tecido para usar como venda, 2 moedas idênticas com cara e coroa, peças do jogo Tangled (um tabuleiro e uma folha de pontuação por aluno ou duplas de alunos e um conjunto de cartas por dupla ou para cada 4 alunos) e uma caneta ou lápis. Deve haver marcadores e uma balança opcional que a turma possa partilhar.


Os professores podem assistir a uma demonstração do jogo Tangled no YouTube antes da Parte II: https://www.youtube.com/watch?v=o_Mhr-0xFOU.

Imprima o tabuleiro do jogo Tangled para cada aluno (se os grupos forem de 2) ou pares de alunos (se os grupos forem de 4):




Imprima a folha de pontuação do Tangled (3) para cada aluno (se os grupos forem de 2) ou pares de alunos (se os grupos forem de 4):


Rodada 1:

Nomes		Estado do jogo									Pontuação em cara ou coroa?	
-	-	Independente Mesmo estado Oposto estado										
Tangle	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Total
Ponto de estado												
Ponto de habilidade												

Rodada 2:

Nomes		Estado do jogo									Pontuação em cara ou coroa?	
-	-	Independente Mesmo estado Oposto estado										
Tangle	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Total
Ponto de estado												
Ponto de habilidade												

Rodada 3:

Nomes		Estado do jogo									Pontuação em cara ou coroa?	
-	-	Independente Mesmo estado Oposto estado										
Tangle	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Total
Ponto de estado												
Ponto de habilidade												

Imprima as cartas do jogo Tangled (3) por par (se os grupos forem de 2) ou por 4 alunos (se os grupos forem de 4):

Não entrelaçado

$$\psi_1 \psi_2$$

medição independente

Estado entrelaçado 1

$$\Phi$$

deve corresponder

Estado entrelaçado 2

$$\Psi$$

deve anti-correspondência

4. Experimentos

Nota para professores:

Incentive a discussão aberta e as perguntas da turma ao apresentar os experimentos.

4.1. Questões pré-laboratoriais

1. O que significa duas coisas estarem entrelaçadas (em um sentido mecânico quântico)?
 - a. Resposta: *O entrelaçamento se refere ao fenômeno em que dois objectos estão ligados de tal forma que partilham o mesmo destino, mesmo quando separados por uma grande distância física.*
2. O que significa algo estar em superposição (no sentido da mecânica quântica)?
 - a. Resposta: *Superposição significa que algo pode existir em vários estados ao mesmo tempo até ser medido ou observado.*
3. O que significa medir algo (no sentido da mecânica quântica)?
 - a. Resposta: *Medir algo é o processo de observar um sistema mecânico quântico que o força a se tornar definido.*
4. Como você pode forçar algo a estar em um estado definido e não em superposição?
 - a. Resposta: *Você deve observá-lo ou medi-lo. Isso "colapsará" o estado de superposição.*

4.2. Part I. “Medindo” pelo tacto

4.2.1. Questões pré-experimentais

1. Se um item, como uma bola (imagine que a bola não é uma bola normal, mas uma bola “quântica”), está em um estado de superposição onde é pesado e leve, como você poderia forçá-lo a ter um dos dois pesos?
 - a. Resposta: *Você pode forçar a bola a ter um de dois pesos medindo-a. Neste caso, medir significa senti-la ou pesá-la.*
2. Se duas bolas “quânticas” são entrelaçadas de tal forma que, se uma for pesada, a outra deve ser leve, e então as duas bolas são colocadas em estados de superposição, o que a medição do peso de uma das bolas lhe diz instantaneamente sobre a outra bola?

- a. *Resposta: Medir o peso de uma bola nos diz instantaneamente que a outra bola é leve (relativamente falando).*

4.2.2. Materiais

- Copos
- Dois tipos de bolas com pesos bem diferentes (como metal e plástico)
- Tecido para venda
- Balança (opcional)

4.2.3. Procedimento (trabalho em grupos de 2 a 4)

1. Se você tiver uma balança, prossiga para a próxima etapa. Se não tiver uma balança, pule para a etapa 5.
2. Permita que todos no grupo adivinhem os pesos das duas bolas diferentes e registem os palpites.
3. Pese as bolas uma de cada vez e registre os pesos.
4. Anuncie o membro do grupo que chegou mais perto dos pesos correctos.
5. Permita que todos no grupo sintam as duas bolas para entender suas diferenças de peso. Você pode numerar as bolas nº 1 e nº 2 ou dar-lhes nomes para facilitar a identificação.
6. Atribua papéis aos membros do grupo:
 - a. Um aluno será o "preparador".
 - b. Um aluno será o "experimentador".
 - c. Um aluno será o "registador".
7. O registador coloca a venda sobre os olhos do experimentador.
8. O preparador coloca uma bola em um copo cada.
9. O preparador entrega um copo ao experimentador com os olhos vendados.
10. O experimentador adivinha qual bola está no copo que está segurando, bem como no outro copo.
11. O registador registra o palpite.
12. Repita os passos 9 a 11 cinco vezes.
13. O experimentador remove a venda e observa os resultados.
14. Repita os passos 6 a 13 com papéis diferentes para os membros do grupo.

4.2.4. Resultados

Use esta tabela para registar os palpites para os pesos das bolas. Os pesos correctos das bolas podem ser listados na primeira linha.

Nome	Bola #1 Palpite	Mais próximo?	Bola #2 Palpite	Mais próximo?
Peso Correcto				

Use estas tabelas para registar os palpites do experimentador sobre qual bola está no copo que ele está segurando e qual bola está no outro copo que ele não está segurando. Há várias tabelas para quando os papéis no grupo são reatribuídos.

Registador:

Experimentador:

Julgamento	Adivinhe qual bola está no copo que o experimentador está segurando	Adivinhe se o experimentador não está segurando a bola no copo	Correcto? (Sim ou Não)
#1			

#2			
#3			
#4			
#5			

Registador:

Experimentador:

Julgamento	Adivinhe qual bola está no copo que o experimentador está segurando	Adivinhe se o experimentador não está segurando a bola no copo	Correcto? (Sim ou Não)
#1			
#2			
#3			
#4			
#5			

Registador:

Experimentador:

Julgamento	Adivinhe qual bola está no copo que o experimentador está segurando	Adivinhe se o experimentador não está segurando a bola no copo	Correcto? (Sim ou Não)
#1			
#2			
#3			

#4			
#5			

4.2.5. Questões pós-experimento

1. Você consegue perceber facilmente a diferença entre os pesos das duas bolas ao segurá-las?
 - a. Resposta: *Isso irá variar dependendo das bolas específicas usadas e dos alunos.*

2. Se descrevermos as bolas nos copos mecanicamente, quais eram seus pesos antes de serem sentidas pelo experimentador?
 - a. Resposta: *As bolas estavam em um estado de superposição e ambos eram pesos ao mesmo tempo.*

3. Como o conhecimento do peso de uma bola impactou o conhecimento sobre a outra bola? A distância entre os dois copos/bolas importou?
 - a. Resposta: *Saber o peso de uma bola (relativamente) significava que sabíamos instantaneamente o peso da outra. A distância entre as duas bolas não importava – elas poderiam estar em lados opostos do mundo.*

4. Se descrevermos as bolas nos copos mecanicamente, diríamos que elas estão entrelaçadas ou não? Explique o porquê.
 - a. Resposta: *Descreveríamos as duas bolas como entrelaçadas. Isso ocorre porque suas propriedades (pesos) estavam interligadas e, assim que soubemos o peso relativo de uma bola, soubemos o da outra.*

5. Com que frequência o experimentador acertou as bolas nos copos? Se ele não acertou todas as vezes, explique por que você acha que isso aconteceu.
 - a. Resposta: *Isso varia de acordo com o aluno. Possíveis razões para o erro podem ser o facto de as bolas terem pesos muito semelhantes ou o aluno ter cometido um erro. Incentive o pensamento criativo.*

6. Qual era o papel do membro do grupo que era o “preparador” no sentido da mecânica quântica?
 - a. Resposta: *O “preparador” foi a pessoa que criou o estado de superposição da bola.*

4.3. Parte II: Tangled!

Esta seção é baseada na actividade Tangled do PhysicsQuest (American Physical Society).

4.3.1. Informações Adicionais

A mecânica quântica pode ter algumas consequências notáveis, e é difícil para nós visualizá-las e relacioná-las, visto que só temos experiência com coisas muito grandes em comparação. Considere computadores quânticos que usam qubits em vez de bits clássicos (1s e 0s). O que é um qubit? Um qubit é um sistema que pode estar em uma superposição matemática de dois estados diferentes ao mesmo tempo. Nesta actividade, usaremos uma moeda girando para transmitir a ideia, então vamos pensar no 1 e no 0 como cara (H) e coroa (T) de uma moeda. Para uma moeda honesta, o estado de superposição é metade H e metade T.

Em um computador quântico real, os qubits são implementados usando muitos sistemas físicos diferentes, como spins de elétrons (para cima versus para baixo), estados de energia de um átomo ou íon, ou a direção em pequenos loops de corrente supercondutora. A medição destrói a superposição e produz um resultado probabilisticamente. Em nosso exemplo particular, ela converte a superposição da moeda girando em cara (H) ou coroa (T) com igual probabilidade.

O entrelaçamento pode ocorrer quando há múltiplos qubits. Classicamente, isso não é possível, e múltiplos lançamentos de moedas reais simultâneos não se impactam, mas são independentes e suas probabilidades são dadas por um produto. Em contraste, em um estado entrelaçado, a medição da primeira moeda "quântica" impacta o que é possível para a segunda. Esse tipo específico de estado entrelaçado é chamado de estado de Bell. Neste jogo, você observará a distinção entre o estado clássico de produto e um estado entrelaçado por meio da medição de moedas (qubits).

4.3.2. Materiais

- Moedas (ou fichas de pôquer) com cara e coroa claras (ou marcadas com H e T)
- Cartas de jogo
- Tabuleiros de jogo
- Cartões de pontuação impressos

4.3.3. Procedimento (trabalho em grupos de 2 ou 4)

1. Pratique girar sua moeda como um pião. Pratique batendo-a para baixo para "medi-la" e batendo-a para pará-la no lugar. Observe a aleatoriedade de suas medições.
2. Familiarize-se com o tabuleiro do jogo e as folhas de pontuação.
3. Se estiverem em grupos de 2, cada pessoa terá uma moeda. Se estiverem em grupos de 4, formem duplas para que duas pessoas joguem contra outras duas pessoas (os membros da equipe podem se alternar girando a moeda).
4. Preencha a parte superior do seu cartão de pontuação e escolha o lado que você está apostando, cara (C) ou coroa (T). Isso determina de qual lado da moeda você marcará pontos.
 - a. Observações: Como os lados são igualmente prováveis, não há vantagem para C ou T. Além disso, um jogador escolher um lado não significa que o outro jogador não possa escolher o mesmo lado. Escolher o mesmo lado não significa que os jogadores obtenham a mesma pontuação.
5. Para cada rodada, escolha um estado de jogo: não entrelaçado, estado entrelaçado 1: deve corresponder (Φ), ou estado entrelaçado 2: deve anti-corresponder (Ψ). Recomenda-se que você faça uma de cada estado de jogo por partida, pelo menos no início. Coloque a carta de estado de jogo à vista dos jogadores durante a rodada.
6. Para cada tentativa (entrelaçado) em uma rodada:
 - a. Dois jogadores giram suas moedas (como piões) em direção ao centro de seu tabuleiro individual, de fora da borda. Se a moeda cair ou sair do tabuleiro, pegue-a imediatamente e continue tentando girá-la para o centro.
 - b. O jogador com a primeira moeda a chegar ao meio do tabuleiro bate sua moeda no chão, "medindo-a".
 - i. Se estiver no estado de jogo produto (não entrelaçado), o segundo jogador imediatamente bate sua moeda no chão, "medindo" a sua também.
 - ii. Se estiver em qualquer um dos estados entrelaçados, o segundo jogador "bate" sua moeda entre as mãos, impedindo-a de girar.
 1. Se estiver no estado entrelaçado 1: Φ , ele joga sua moeda para que ela corresponda à moeda do jogador um.
 2. Se estiver no estado entrelaçado 2: Ψ , ele joga sua moeda para que ela fique oposta à moeda do jogador um.

- c. Pontuação do entrelaçado:
 - i. O jogador que chegar primeiro ao meio ganha um ponto de habilidade. Marque isso no cartão de pontuação.
 - ii. Se a moeda medida desse jogador corresponder ao lado escolhido para a rodada, ele ganha um ponto de estado. Marque isso no cartão de pontuação.
 - iii. O segundo jogador não ganha nenhum ponto de habilidade, mas se a moeda dele corresponder ao lado escolhido para a rodada, ele ganha um ponto de estado. Marque isso no cartão de pontuação.
7. Repita o passo 6 quantas vezes forem necessárias para completar a rodada. Por padrão, há 11 tentativas (entrelaçados) por rodada. Ao final da rodada, os pontos de habilidade e estado são somados, resultando na pontuação da rodada.
8. Repita os passos 5 a 7 para cada rodada. O(s) jogador(es) que vencer(em) mais rodadas vence(m).
 - a. Observações: por padrão, há 3 rodadas por jogo, com o estado do jogo trocado a cada rodada (recomendado) para incentivar os jogadores a tentarem cada estado do jogo.
9. (opcional) Tente jogar uma partida em que suas equipes fiquem progressivamente mais distantes umas das outras.

4.3.4. Perguntas pós-atividade

1. Em um sentido mecânico quântico, o que a moeda girando representava?
 - a. Resposta: *A moeda giratória representava um estado de superposição de cara e coroa.*
2. Observando as linhas de “estado” de todo o jogo, há alguma tendência ou parece aleatório?
 - a. Resposta: *Não parece haver uma tendência. Cara e coroa aparecem aleatoriamente. Isso ocorre porque o aparecimento de cara e coroa em uma moeda honesta é aleatório.*
 - b. Pergunta complementar: Se você jogasse muitas vezes, o que acha que aconteceria com o número de caras e coroas?

- i. Resposta: Se jogássemos muitas vezes, esperaríamos que o número de caras e coroas se aproximasse do mesmo valor, porque a probabilidade de caras versus coroas é de 50/50.
3. O que você observa sobre as linhas de estado para ambos os jogadores na rodada de estado do produto e na rodada de estado entrelaçado?
- a. Resposta: No estado do produto, os valores não são correlacionados, mas nos estados entrelaçados, os valores correspondem ou são anticorrespondentes (portanto, eles são correlacionados).
4. O resultado do jogo dependia da distância entre os jogadores? Em termos de mecânica quântica, a que isso se assemelha?
- a. Resposta: Não, o resultado do jogo e das rodadas não dependia da distância entre os jogadores. Isso é análogo ao entrelaçamento, em que a medição de um estado fornece informações sobre o outro estado, independentemente da distância.
5. O que foi mais divertido neste jogo?
- a. Resposta: Isso varia de aluno para aluno. Incentive o pensamento amplo.
6. O que foi mais desafiador neste jogo?
- a. Resposta: Isso varia de aluno para aluno. Incentive o pensamento amplo.

5. Desafio de Design

O Desafio: Projectar um dispositivo que utilize entrelaçamento e superposição

Você aprendeu que o entrelaçamento cria um estado quântico partilhado entre duas partes ou partículas e que medir uma delas fornece informações sobre a outra (pense nas duas bolas mencionadas anteriormente). Antes da medição, as partículas existiam em superposição, o que significa que existiam simultaneamente em múltiplos estados. Como discutimos anteriormente, existem muitas aplicações intrigantes para entrelaçamento e superposição, incluindo computação quântica, teletransporte quântico e criptografia quântica. Agora, usaremos o que você aprendeu para projectar um dispositivo que possa usar entrelaçamento e/ou superposição para fazer algo útil ou divertido. Para os propósitos deste desafio, você também pode imaginar que o comportamento da mecânica quântica, como entrelaçamento e superposição, se estende a objectos grandes ao seu redor (como balões, copos, bolas, etc.).

5.1 Questões de Design

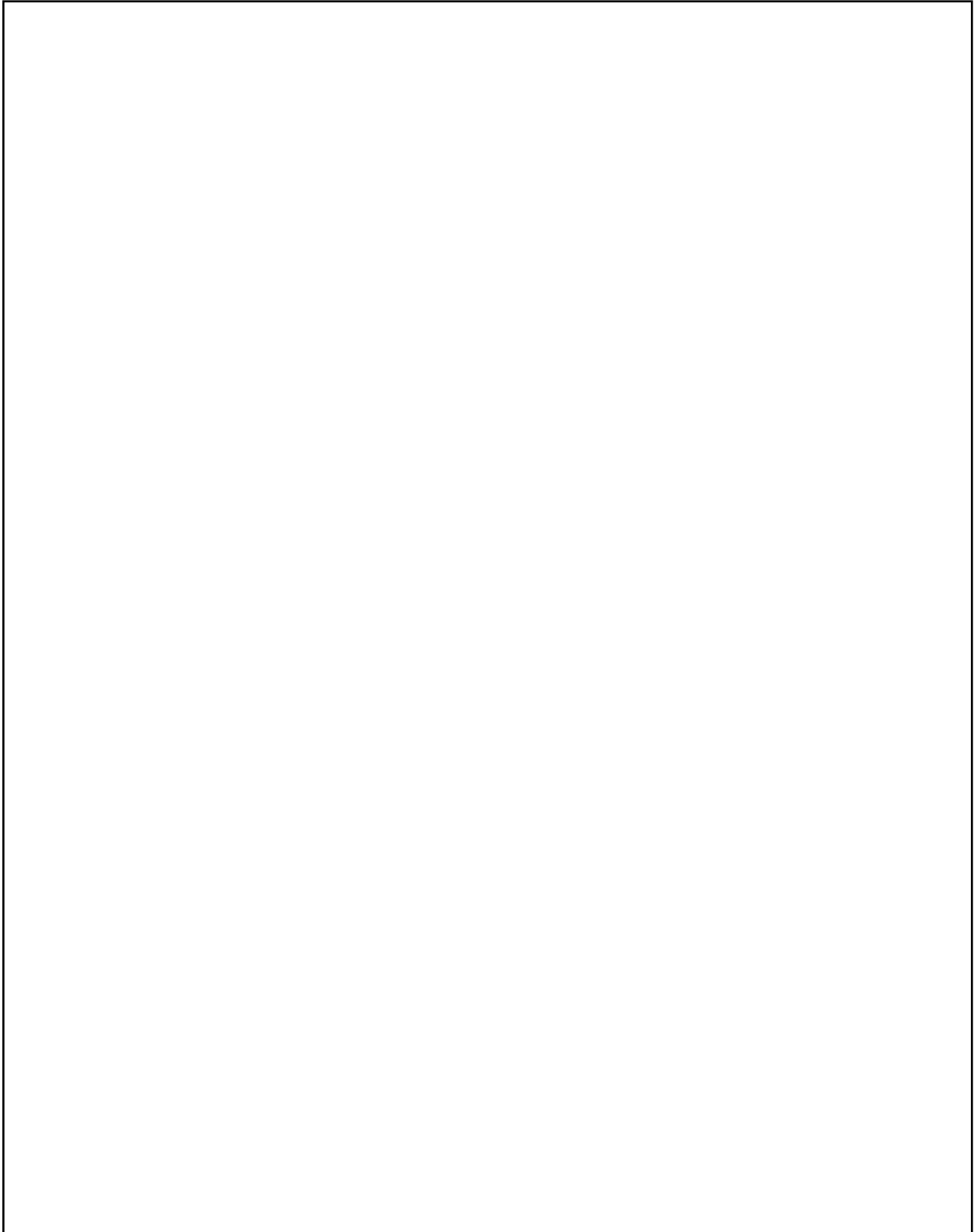
1. Para que o entrelaçamento e a superposição poderiam ser úteis no mundo real? Você pode considerar aplicações no mundo real ou imaginárias, nas quais o entrelaçamento e a superposição se estendem a objectos grandes ao seu redor. Seja criativo e pense de forma ampla.
2. Para que você usará o entrelaçamento e a superposição no seu dispositivo? O seu dispositivo é um dispositivo do mundo real ou imaginário?
3. Como o seu dispositivo atenderá a uma necessidade na sua vida ou na sua comunidade?
4. Que tipos de materiais você precisará para criar o seu dispositivo?

Possíveis respostas às perguntas (incentive a discussão em sala de aula):

Existem muitos usos e aplicações possíveis para entrelaçamento e superposição, incluindo teletransporte, criptografia, sensores e computadores. O objectivo é estimular a criatividade dos alunos e incentivar a partilha de ideias. Por fim, os alunos devem apresentar uma ideia e esboçá-la abaixo.

5.2 Esboço de Design

Esboce o design do seu dispositivo abaixo.



6. Fontes

Entrelaçamento quântico, <https://quantumatlas.umd.edu/entry/entanglement/>.

O que é quântico em física e computação?, por Mary Shacklett e Gavin Wright, <https://www.techtarget.com/whatis/definition/quantum>

PhysicsQuest 2025: Entrelaçado, Sociedade Americana de Física.