



Modelos causais e a noção de causalidade local de Bell

Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas

Ciências Exatas e da Terra/Física Geral

Trabalho de pesquisa

Estudante: Gabriel Rabelo Soares

Orientador: Romeu Rossi Júnior

Contatos: gabriel.r.soares@ufv.br ; romeu.rossi@ufv.br

Introdução

A pesquisa é voltada para o estudo da desigualdade de Bell utilizando modelos causais. Será apresentada a dedução do teorema de Bell, suas hipóteses e uma análise sobre a incompatibilidade entre um modelo causal clássico e os experimentos de Bell.

Objetivos

O objetivo é fazer uma revisão de artigos que mostram a incompatibilidade de modelos clássicos usados para abordar desigualdade de Bell.

Metodologia

Trata-se de um trabalho de física teórica que constitui na revisão de artigos científicos na área de fundamentos de mecânica quântica, a fim de analisar e discutir a abordagem de modelos causais na desigualdade de Bell.

Resultados e Conclusões

Desigualdade de Bell

O cenário do Bell diz respeito a duas partículas P_a e P_b que inicialmente se encontram em contato, interagindo entre si. Após isto, são espaço-temporalmente separadas. Em uma montagem experimental realizadas medidas S (em P_a) e T (em P_b) nas quais são obtidos como resultados A e B . Em um primeiro momento se calculamos a probabilidade dos resultados, intuitivamente teríamos que,

$$P(AB|ST) = P(A|S)P(B|T) \quad (1)$$

Porém essa igualdade não é observada experimentalmente, implicando que existe correlação entre A e B . Supondo que uma variável oculta é a causa comum dos resultados e a probabilidade passa a ser,

$$p(AB|ST) = \int_{\Lambda} d\lambda p(AB|\lambda ST)p(\lambda|ST) \quad (2)$$

Apresentando as hipóteses de localidade e livre arbítrio descritas por Bell, a equação (2) pode ser desenvolvida.

Localidade: testes realizados na parte S não alteram a parte T , da relatividade restrita se trata de uma separação tipo-espaço (fora dos cones de luz) ou seja, não tem relação causal entre as partes. A localidade vai implicar que assumindo λ como a causa comum da relação dos resultados, pode-se fatorar a probabilidade da seguinte forma:

$$p(AB|\lambda ST) = P(A|S\lambda)P(B|T\lambda) \quad (3)$$

Independência de escolha: o experimentador é livre para escolher a medição que será realizada independente de quem seja a variável oculta λ . Pode-se ver isso com o seguinte resultado,

$$P(\lambda|ST) = p(\lambda) \Rightarrow P(ST|\lambda) = p(ST) \quad (4)$$

Dada as duas hipóteses a probabilidade (2) pode ser escrita como,

$$p(AB|ST) = \int_{\Lambda} P(A|S\lambda)P(B|T\lambda)p(\lambda)d\lambda \quad (5)$$

A equação (5) permite o desenvolvimento de uma desigualdade que impõe limite para correlação entre A e B , que permite ser testada experimentalmente, sendo violada para sistemas quânticos emaranhados.

Modelos causais

Modelos causais são representados por DAGs (gráficos acíclicos direcionados), sendo esses compostos por um conjunto de vértices e um conjunto de arestas direcionadas entre os vértices (são acíclicos visto que um vértice não pode conectar consigo mesmo). Inferências feitas sobre esses modelos com base nas correlações observadas, são conhecidas como **algoritmos de descoberta causal** (esses algoritmos tomam como input o conjunto de relações de independência condicional (IC) existentes entre as variáveis observadas.). Estes algoritmos tem como base duas suposições,

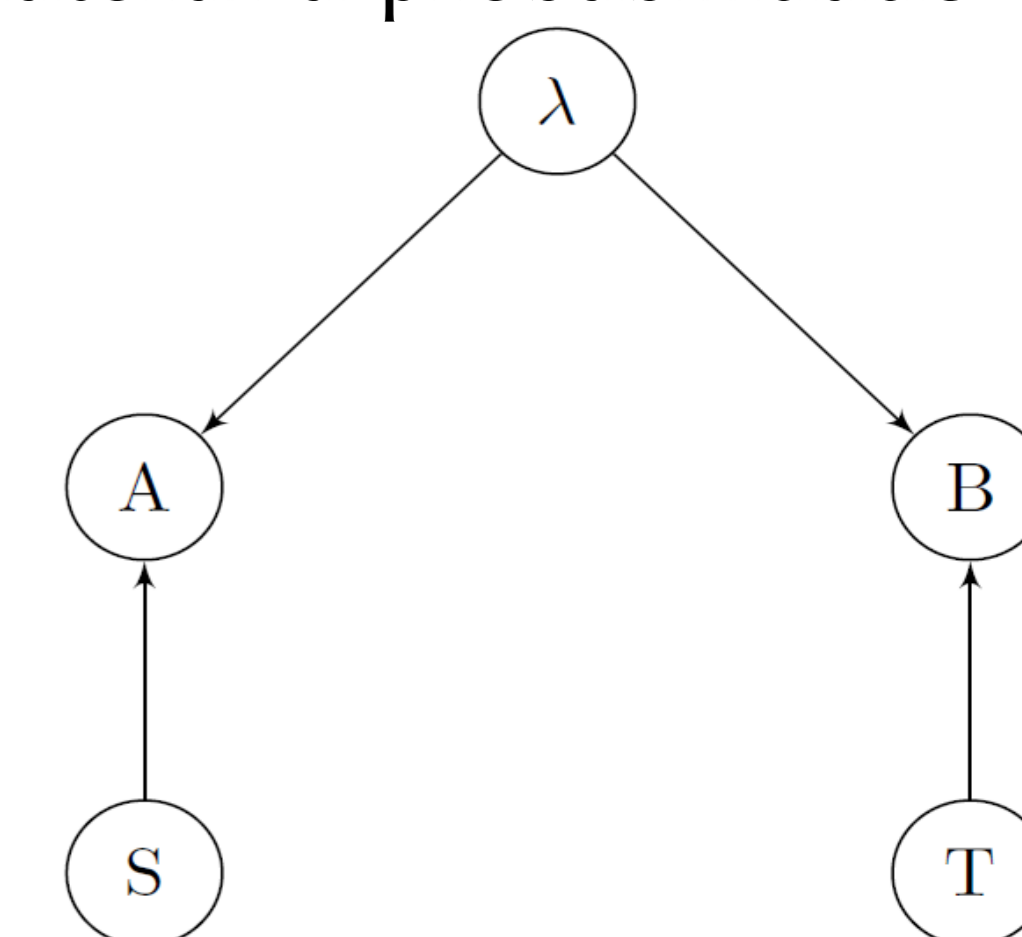
No fine-tuning: a estrutura causal deve ser robusta, ou seja, as IC devem continuar válidas com qualquer variação nos parâmetros.

Minimality: optar pelo modelo mais simples que explica as estatísticas.

Algoritmos de descoberta causal e a desigualdade de Bell

Dado o cenário de Bell descrito anteriormente, sejam S e T escolhas de medidas com respectivos resultados A e B . Um ponto sutil no teorema de Bell está no fato da equação (1) não ser verdadeira, sendo que como abordado, S e T estariam localmente separados logo, uma alternativa seria falar que A é o efeito conjunto da variável S e λ (variável oculta que atua como causa comum de A e B), enquanto B é o efeito conjunto da variável T e λ . Sendo a figura seguinte a estrutura causal.

Esta estrutura retorna as relações de CI, $(A \perp B T | S \lambda)$ e $(B \perp A S | T \lambda)$ que dizem respeito a causalidade local que possibilita fatorar a probabilidade na forma como está em (3). Além disso tem a independência de escolha descrita por $(S \perp T \lambda)$ e $(T \perp S \lambda)$. O fato de certas correlações quânticas violarem a desigualdade de Bell implica que elas não podem ser explicadas utilizando a estrutura causal da figura, ou seja, não é um modelo causal robusto necessitando então de fine-tuning. Concluiu-se que os modelos causais clássicos são inviáveis para explicar a desigualdade de Bell, visto que esses necessitam de fine-tuning. Esse foi o trabalho até o presente momento e o próximo passo é estudar modelos causais alternativos.



Bibliografia

[1] BRUNNER, Nicolas *et al.* Bell nonlocality. *Reviews of Modern Physics*, v. 86, n. 2, p. 419–478, 2014.

[2] WOOD, Christopher J.; SPEKKENS, Robert W. The lesson of causal discovery algorithms for quantum correlations: Causal explanations of Bell-inequality violations require fine-tuning. *New Journal of Physics*, v. 17, n. 3, p. 33002, 2015.

Apoio Financeiro

Pesquisa financiada pelo CNPq.