

# Visões alternativas do método científico

Fernando de Pol Mayer (LEG/DEST/UFPR)

2021-02-01

Última atualização 2021-04-15

# Visões alternativas do método científico

Material baseado em:

- Hilborn, R; Mangel, M. *The ecological detective: confronting models with data*. Princeton University Press, 1997.

## Objetivos

- Entender as lógicas básicas do pensamento humano e científico
- Entender o procedimento padrão do método científico dominante na estatística (e na ciência em geral)
- Conhecer visões alternativas do método científico e estatístico

# Método científico

# Método dedutivo

- **René Descartes** (1596-1650) apresenta o método dedutivo a partir da **matemática** e de suas regras de evidência, análise, síntese e enumeração
- Esse método parte **do geral** e, a seguir, desce **para o particular**
- O protótipo do raciocínio dedutivo é o **silogismo**
  - A partir de duas proposições chamadas **premissas**, retira uma terceira chamada conclusão
- As duas premissas são verdadeiras, portanto a conclusão é verdadeira.
- Parte-se de princípios reconhecidos como **verdadeiros e indiscutíveis**, possibilitando chegar a conclusões de maneira puramente formal, em virtude de sua **lógica**.
- Este método tem larga aplicação na Matemática e na Física, cujos princípios podem ser enunciados por leis.

Exemplo:

Todo mamífero tem um coração.

Ora, todos os cães são mamíferos.

Logo, todos os cães têm um coração.

# Método indutivo

- Para **Francis Bacon** (1561-1626), o conhecimento científico é o único caminho seguro para a verdade dos fatos
- Como Galileu, critica Aristóteles por considerar que **o silogismo e o processo de abstração não propiciam um conhecimento completo do universo**
- O conhecimento científico, para Bacon, tem por finalidade servir o homem e dar-lhe poder sobre a natureza.
- Bacon, um dos fundadores do Método Indutivo, considera:
  - as circunstâncias e a **frequência** com que ocorre determinado fenômeno
  - os casos em que o fenômeno não se **verifica**
  - os casos em que o fenômeno apresenta **intensidade diferente**

- Exemplo:

Antônio é mortal.

Benedito é mortal.

Carlos é mortal.

Zózimo é mortal.

Ora, Antônio, Benedito, Carlos, ... e Zózimo são homens.

Logo, (todos) os homens são mortais.

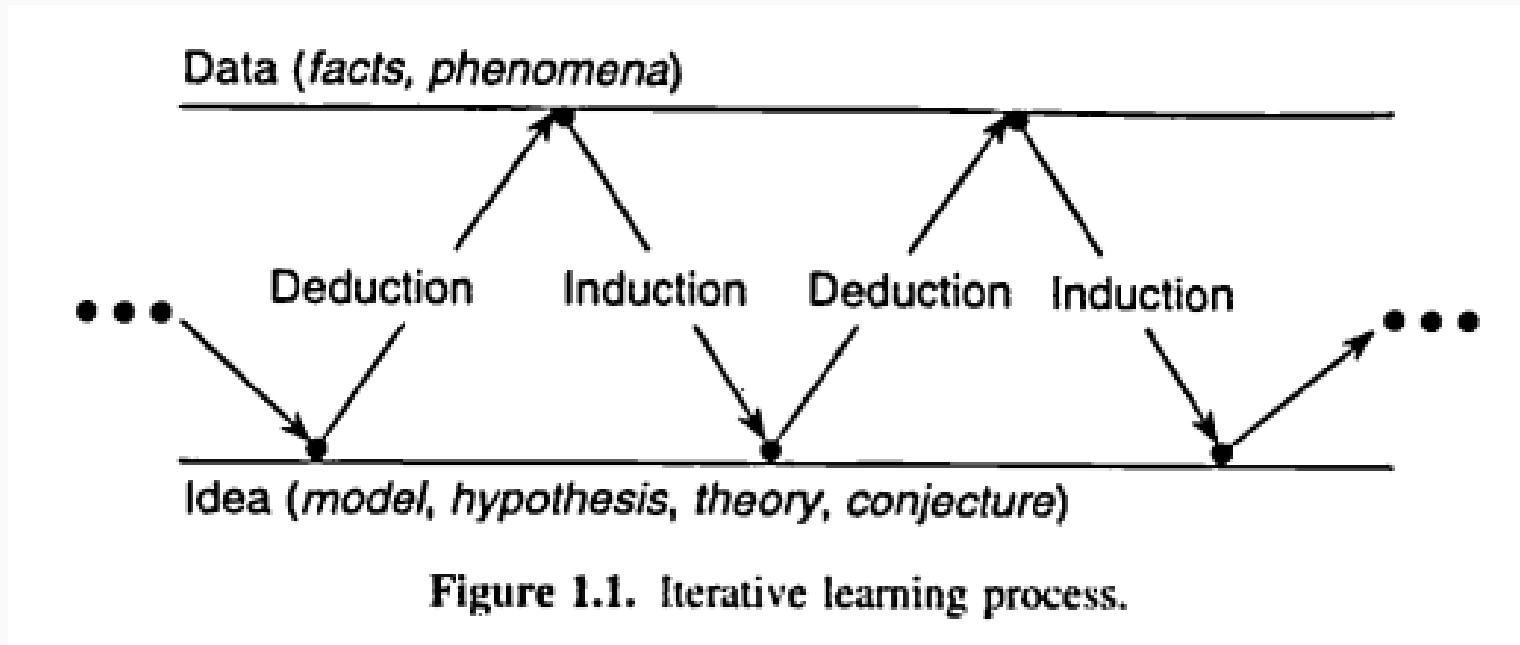
- A partir da observação, é possível formular uma **hipótese explicativa** da causa do fenômeno.
- Portanto, por meio da indução chega-se a **conclusões que são apenas prováveis**.

# Método científico

## Aprendizado dedutivo-indutivo

- O processo **dedutivo-indutivo** de aprendizado é orientado pelo cérebro humano
- É conhecido desde o tempo de Aristóteles e faz parte de nossa **experiência cotidiana**

O aprendizado avança conforme ilustrado na figura abaixo (extraída de Box, Hunter, and Hunter, 2005):

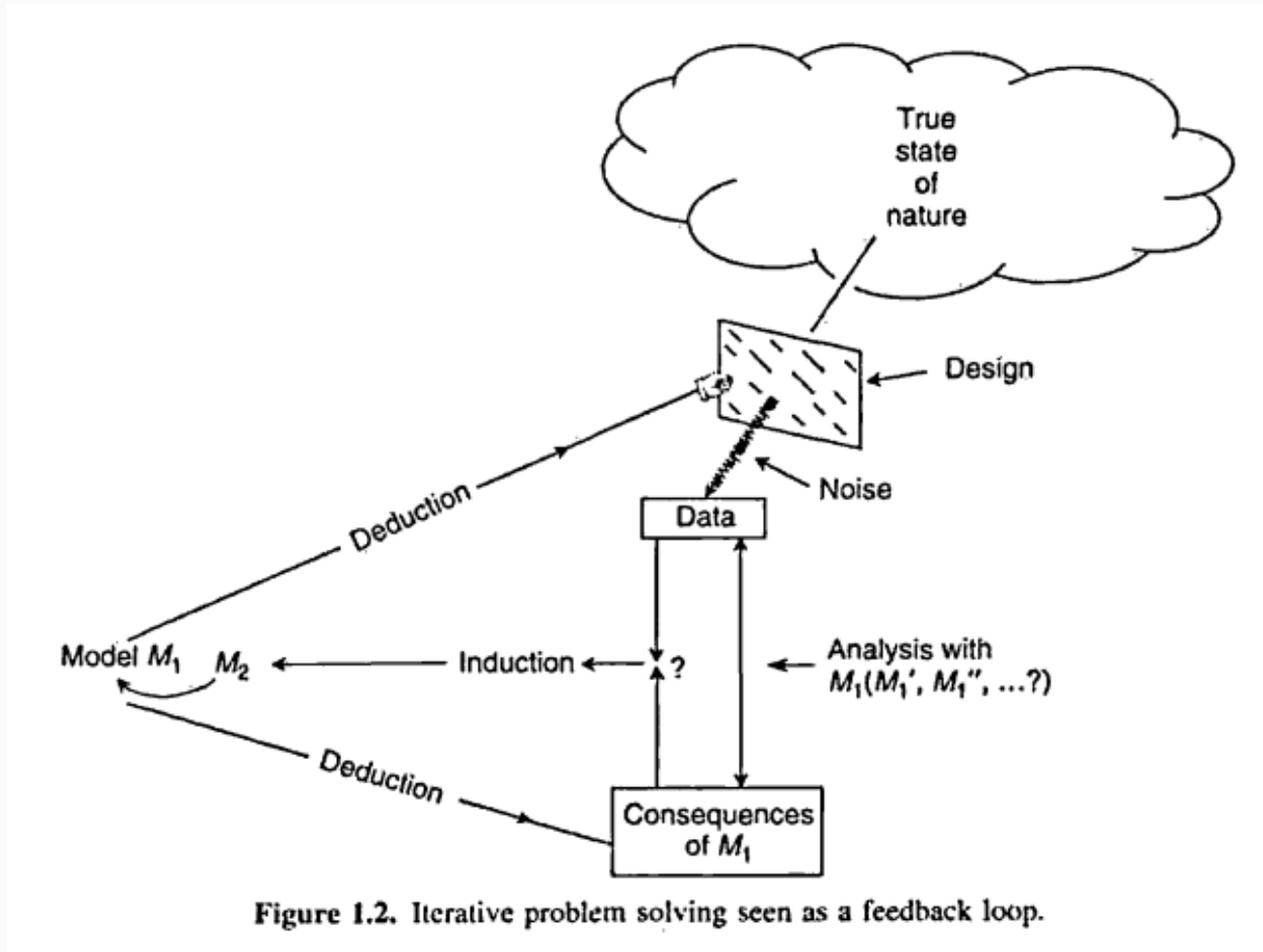


# Método hipotético-dedutivo

- Método definido por **Karl Popper**, a partir de suas críticas ao método indutivo.
- Para ele, o método indutivo não se justifica, pois o **salto** de “alguns” para “todos” exigiria que a **observação de fatos isolados fosse infinita**.
- Pode ser explicado a partir do seguinte esquema:
  - Problema
  - Hipóteses
  - Dedução das consequências observadas
  - Tentativa de falseamento
  - Corroboração
- Para tentar explicar um problema, são formuladas hipóteses; destas deduzem-se consequências que deverão ser testadas ou **falseadas**.
- **Falsear** significa tentar tornar falsas as consequências deduzidas das hipóteses.
- Enquanto no método dedutivo se procura confirmar a hipótese, no **método hipotético-dedutivo se procuram evidências empíricas para derrubá-la**.
- Quando não se consegue derrubar a hipótese, tem-se sua **corroboração**
- Segundo Popper, a hipótese se mostra **válida**, pois superou todos os testes
- Porém ela **não é definitivamente confirmada**, pois a qualquer momento poderá surgir um fato que a invalide.

# Método científico

Um loop de feedback (Box, Hunter, and Hunter, 2005)





Como a ciência funciona

# Como a ciência funciona

*A Ciência é um processo de aprendizado da natureza, onde ideias concorrentes sobre como funciona o mundo são medidas contra observações.*

Richard Feynman, 1965

- Descrições: incompletas
- Observações: incertas e imprecisas
- Métodos para avaliar a concordância entre as ideias e as observações = **Estatística**

- Nenhum cientista consegue ser verdadeiramente **neutro**
- Todos os cientistas atuam dentro de uma **visão fundamental filosófica**
- Isso interfere:
  - Nas ferramentas estatísticas que serão utilizadas
  - Nos tipos de experimentos que deverão ser realizados

# Como a ciência funciona (atualmente)

## Árvore de aprendizado (Platt, 1964)

1. Conceber **hipóteses alternativas**.
2. Conceber um **experimento crucial** (ou vários deles)
  - Possíveis resultados alternativos
  - Cada um poderá **excluir**, dentro do possível, **uma ou mais hipóteses**
3. Realizar o experimento de forma a obter resultados mais confiáveis possíveis.
4. **Reciclar o procedimento**
  - Criar sub-hipóteses ou hipóteses sequenciais para refinar as possibilidades que restam

- Esta visão de Platt é naturalmente uma extensão lógica do trabalho de **Popper**

*Uma hipótese **não pode ser provada**, apenas **desprovada***

- A essência do método Popperiano é "**desafiar**" uma hipótese repetidamente.
  - Se a hipótese permanece válida então ela **não é validada**, mas adquire um certo "**grau de confiança**"

## Como a ciência funciona (atualmente)

Coincidindo com esta filosofia de Popper está o trabalho estatístico de **Ronald Fisher, Karl Pearson, Jerzy Neyman** e outros, que desenvolveram grande parte da teoria estatística atual associada a **testes de hipótese**.

Em um teste de hipótese, nós concentramos em uma única hipótese ("**hipótese nula**" ou  $H_0$ ) e calculamos a probabilidade dos dados terem sido observados **assumindo que a hipótese nula seja verdadeira**

$$P(\text{Dados} | H_0 \text{ verdadeira}) = \alpha^* = p\text{-valor}$$

Se essa probabilidade:

- For muito baixa (usualmente abaixo de 0.05 ou 0.01), então **rejeitamos** a hipótese nula.
- For alta (usualmente acima de 0.05), então **não rejeitamos** a hipótese nula.

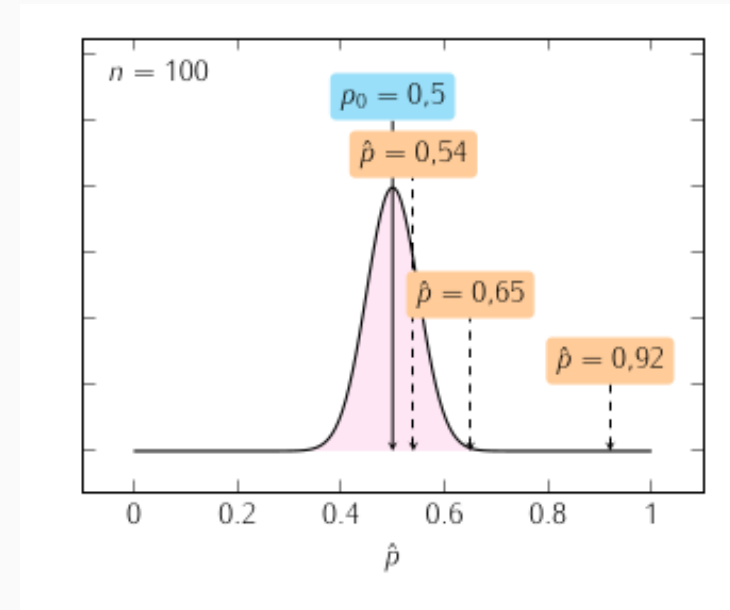
Lembre-se que, segundo a filosofia de Popper:

- Uma hipótese não pode ser provada, apenas desprovada.
- Por isso, não podemos **aceitar** uma hipótese (já que ela não pode ser provada)

**aceitar  $\neq$  não rejeitar**

## Um exemplo: proporção sexual em peixes

- Deseja-se estudar a proporção de peixes machos e fêmeas de uma mesma espécie em uma lagoa.
- Sem nenhuma informação prévia, supõe-se que a proporção sexual é de 50% ( $p = 0.5$ ).
- Se, em uma amostra de 100 peixes:
  - 54 forem fêmeas.
  - 65 forem fêmeas.
  - 92 forem fêmeas.
- Qual a evidência necessária para concluir que a proporção de fêmeas é maior que a de machos nessa população?



Proporções amostrais supondo  $p = 0.5$  na população.

# Tipos de hipótese

## Hipótese nula $H_0$

- É uma afirmativa de que o valor de um parâmetro populacional é **igual** a algum valor especificado.
- Exemplos:

$$\begin{aligned}\mu &= 10 \\ p &= 0.5 \\ \sigma^2 &= 4.\end{aligned}$$

- O termo *nula* é usado para indicar nenhuma mudança ou nenhum efeito.

## Hipótese alternativa $H_a$

- É uma afirmativa de que o parâmetro tem um valor que, de alguma forma, **difere** da hipótese nula.
- Exemplos:

$$\begin{aligned}\mu &\neq 10 \\ p &> 0.5 \\ \sigma^2 &< 4.\end{aligned}$$

# Tipos de hipótese

- Se você está fazendo um estudo e deseja usar um teste de hipótese para **apoiar** sua afirmativa, esta deve ser escrita de modo a se tornar a **hipótese alternativa**.
- Você nunca pode apoiar uma afirmativa de que um parâmetro **seja igual** a algum valor específico.
- Nesse contexto de se tentar apoiar o resultado de pesquisa, a hipótese alternativa é, algumas vezes, chamada de **hipótese de pesquisa**.

No exemplo anterior, a **hipótese de pesquisa** é a de que

*a proporção de fêmeas é maior do que a proporção de machos*

- Supondo inicialmente que a proporção de fêmeas é de 50% ( $p = 0.5$ ), então as **hipóteses estatísticas** são

$$H_0 : p = 0.5 \quad \text{vs} \quad H_a : p > 0.5$$

- Com isso, deseja-se que a **hipótese nula**  $p = 0.5$  seja rejeitada, de modo que a **hipótese alternativa**  $p > 0.5$  seja apoiada.
- Apoiar a hipótese alternativa de que  $p > 0.5$  é o mesmo que apoiar a afirmativa de a proporção de fêmeas na população é maior do que a de machos.

**hipótese de pesquisa  $\neq$  hipótese estatística**

## Como a ciência funciona (atualmente)

Depois de testar a hipótese de que a proporção de fêmeas é maior do que a proporção de machos

- Nós continuaríamos subindo na "árvore de aprendizado" do Platt
- Para que lado da árvore nós vamos dependerá se o resultado foi "estatisticamente significativo" ou não (*i.e* rejeitamos ou não a hipótese nula)

Os pontos chave para essa visão da ciência são:

1. O confronto entre uma **única** hipótese e os dados
2. O experimento crítico
3. A falsificação como a única "verdade"

■ Popper forneceu a filosofia, e Fisher, Pearson e colegas forneceram a estatística.



# Como a ciência funciona (atualmente)

Se a hipótese nula for rejeitada

- Temos uma evidência científica
- Existe apoio à hipótese de pesquisa
- Hipóteses alternativas podem ser **deduzidas** (sobre a árvore)
- Se esse experimento for realizado repetidas vezes, e o resultado permanece o mesmo, então essa hipótese de pesquisa vai adquirindo seu **grau de confiança**

Se a hipótese nula **não** for rejeitada

- Não existe apoio à hipótese de pesquisa
- O que fazer?
  - Reformular a hipótese?
  - Coletar mais dados?
  - ?

Apesar de ser a mais utilizada na estatística (e na ciência em geral), a visão Popperiana do método científico é apenas uma entre várias alternativas.

## Visões alternativas do método científico

# Visões alternativas do método científico

Filósofo	Tema central	Tipo de confronto
Popper	Falsificação da hipótese nula	Uma única hipótese é desprovada em confronto com os dados
Kuhn	Paradigmas, ciência normal, revoluções científicas	Uma única hipótese é utilizada até que existam informações contraditórias suficientes para que ela seja "derrubada" por uma hipótese "melhor"
Polanyi	República da ciência	Múltiplas visões do mundo são permitidas de acordo com a opinião de diferentes cientistas. O confronto entre essas visões e os dados é julgado de acordo com (i) a plausibilidade, (ii) o valor, (iii) o interesse
Lakatos	Programa de pesquisa científica	Confronto entre múltiplas hipóteses, tendo os dados como mediador

# Visões alternativas do método científico

## Thomas Kuhn

- Introduziu as ideias de "ciência normal", "paradigmas científicos", e "revoluções científicas"
- Para Kuhn, os cientistas normalmente atuam dentro de **paradigmas específicos**, que são descrições gerais de como o mundo funciona
- A **ciência normal** envolve a coleta de dados dentro do contexto do paradigma atual
  - Não confronta o paradigma atual, mas sim o executa
  - O paradigma dita o tipo de experimento que deverá ser executado, quais dados serão coletadas, e como serão analisados e interpretados
- Uma verdadeira mudança (quebra de paradigma ou **revolução científica**) ocorrerá quando:
  1. Um grande conjunto de dados contraditórios é acumulado, de maneira que o paradigma atual não consegue mais explicar os dados
  2. Existe um paradigma alternativo, que consegue explicar as discrepâncias entre o antigo paradigma e as observações

# Visões alternativas do método científico

Thomas Kuhn

- Raramente (ou nunca) existirá um experimento crítico **ao nível do paradigma**
- Uma particular "anomalia" (**resultado contraditório**), será tratada como um problema de medida (ou pontual)
- Somente a *coleção de experimentos contraditórios* é que levará à uma revolução científica
- A árvore de aprendizado e os experimentos críticos de Platt **podem** até ocorrer, **mas** somente dentro de um paradigma individual
  - Isso de fato caracteriza os procedimentos da ciência normal
- No exemplo anterior
  - O **procedimento** para a verificação da proporção de fêmeas seria a "ciência normal"
  - Isso ocorre dentro de um paradigma muito mais amplo (como o da seleção natural ou comportamento biológico de populações naturais neste caso)

# Visões alternativas do método científico

## Michael Polanyi

- Descreve que a **república de ciência** consiste de uma comunidade de pensadores independentes cooperando livremente entre si
- Para Polanyi, isso representa uma versão simplificada de uma sociedade livre
  - Cientistas são *treinados* por um *mestre* (orientador)
  - Aprendizes observam e participam
  - Os indivíduos constituem a **república** de cidadãos ensinados por essa cadeia de ensino-aprendizado
  - É este sistema que previne que a ciência se torne "rígida" ou "estagnada"
- O aprendiz recebe um elevado padrão de conhecimento científico e desenvolve sua própria capacidade de julgamento para assuntos científicos
- Segundo Polanyi, existem três critérios para esse julgamento
  1. Plausibilidade (conformidade)
  2. Valor científico (interesse, importância)
  3. Originalidade (pensamento criativo)
- Estes três critérios são apropriados para confrontar hipóteses com dados

# Visões alternativas do método científico

## Michael Polanyi

- Polanyi argumenta implicitamente que o confronto
  - não é entre **uma** hipótese e os dados
  - mas sim **entre hipóteses** (diferentes descrições de como o mundo funciona) e os **dados** (observações e medidas)
- Existe uma interseção entre as ideias de Polanyi e Kuhn
  - O sistema de aprendizado é a essência da "ciência normal" de Kuhn
  - Aprendizes aprendem com seus orientadores os experimentos e análises que devem fazer
  - De certa forma, esses aprendizes continuam trabalhando no mesmo tipo de problema por toda a carreira
  - É apenas o cientista "não usual" que "rompe" com o sistema padrão e entra em uma nova área

# Visões alternativas do método científico

Imre Lakatos

- Lakatos descreve o que chama de **Programa de Pesquisa Científica** (PPC)
  - Um conjunto de regras metodológicas que indicam os caminhos a serem guiados e evitados
  - O "**núcleo rígido**" é o elemento chave de um PPC
    - Ao redor do núcleo, existe um conjunto de hipóteses
    - Esse conjunto de hipóteses é chamado de "**cinturão**", que **protege** o núcleo
  - As hipóteses individuais do cinturão podem ser testadas
  - Raramente o núcleo pode ser desafiado diretamente
- Lakatos aponta que muitas **hipóteses** têm sido consideradas e utilizadas, apesar de suas reconhecidas inconsistências
  - Leis de Newton
  - Teoria da gravidade
  - Modelos gerais de química orgânica
- Apesar disso, elas *são utilizadas por não haver um substituto melhor*



# Visões alternativas do método científico

## Imre Lakatos

- O valor de um PPC é a sua habilidade em fazer novas predições e prover explicações simples e detalhadas **sobre o que é conhecido**
- Um PPC só pode ser substituído por outro PPC
  - *Não podemos rejeitar uma hipótese a menos que exista uma outra melhor para substituí-la*
- Portanto, na visão Lakatosiana, **o confronto deve ser sempre entre hipóteses concorrentes e os dados**
  - Uma hipótese individual **pode** ser *inconsistente* com os dados
  - Mas a menos que exista outra mais consistente, não descartaremos a primeira, pois é necessário que se continue investigando

# Visões alternativas do método científico

De maneira geral

- o falsificacionismo de Popper
- a ciência normal de Kuhn
- a república da ciência de Polanyi
- o cinturão de hipóteses auxiliares de Lakatos

Será muito raro que as ideias gerais como

- a teoria da evolução natural
- a teoria da relatividade

sejam **verdadeiramente testadas**.

são descrições diferentes da **mesma atividade científica**.

Na verdade, a maior parte do trabalho de um cientista será em um nível muito mais "mundano", que, dependendo do filósofo, será

- falsificando hipóteses, segundo Popper
- quebrando paradigmas, segundo Kuhn
- fazendo ciência normal, segundo Polanyi
- testando hipóteses auxiliares, segundo Lakatos

# Visões alternativas do método científico

## Visões alternativas na estatística

A teoria estatística **mais utilizada/ensinada atualmente** é aquela baseada na visão filosófica da ciência de Popper

- falseamento de uma **única** hipótese
- árvore de aprendizado

Será que existem alternativas?

Sim!

O campo chamado de **inferência bayesiana** (ou **estatística bayesiana**)

- provê a teoria e as ferramentas para o teste de **múltiplas hipóteses concorrentes**
- vai de encontro com a visão filosófica da ciência de **Lakatos**
  - o confronto deve ser entre **hipóteses concorrente e os dados**

Para simplificar a comparação vamos chamar essas duas visões de **clássica/Popperiana** e **bayesiana/Lakatosiana**

# Visões alternativas do método científico

## Inferência bayesiana

Baseada no **Teorema de Bayes**

$$\begin{aligned}[H|D] &= \frac{[DH]}{[H]} \\ &= \frac{[D|H][H]}{[H]} \\ &\propto [D|H][H]\end{aligned}$$

- $[H|D]$  é a probabilidade da hipótese  $H$ , condicionada aos dados  $D$  (*posterior*)
- $[D|H]$  é a probabilidade do dado, condicionada à hipótese (*verossimilhança*)
- $[H]$  é a probabilidade da hipótese (*priori*)
- O resultado será a probabilidade de cada uma das hipóteses concorrentes
- É possível incorporar informações prévias sobre uma hipótese, por meio da (distribuição) *a priori*

Suponha que se deseja testar 3 hipóteses concorrentes  $(H_1, H_2, H_3)$  para o mesmo conjunto de dados observado  $D$ . O resultado será

$$[H_1|D] = p_1$$

$$[H_2|D] = p_2$$

$$[H_3|D] = p_3$$

Com isso, é possível determinar qual a **hipótese mais plausível**, de acordo com os dados.

# Visões alternativas do método científico

## Visões alternativas na estatística

### Popperiana/clássica

$$P[D|H_0]$$

- Confronto entre dados e uma **única** hipótese
- **Rejeita/não rejeita** a hipótese nula
- Hipótese é **falsificada** (mas nunca provada)
- **Experimentos críticos** são aqueles que (geralmente) fazem a hipótese nula ser rejeitada

### Lakatosiana/bayesiana

$$P[H_i|D], \quad i = 1, 2, \dots, k$$

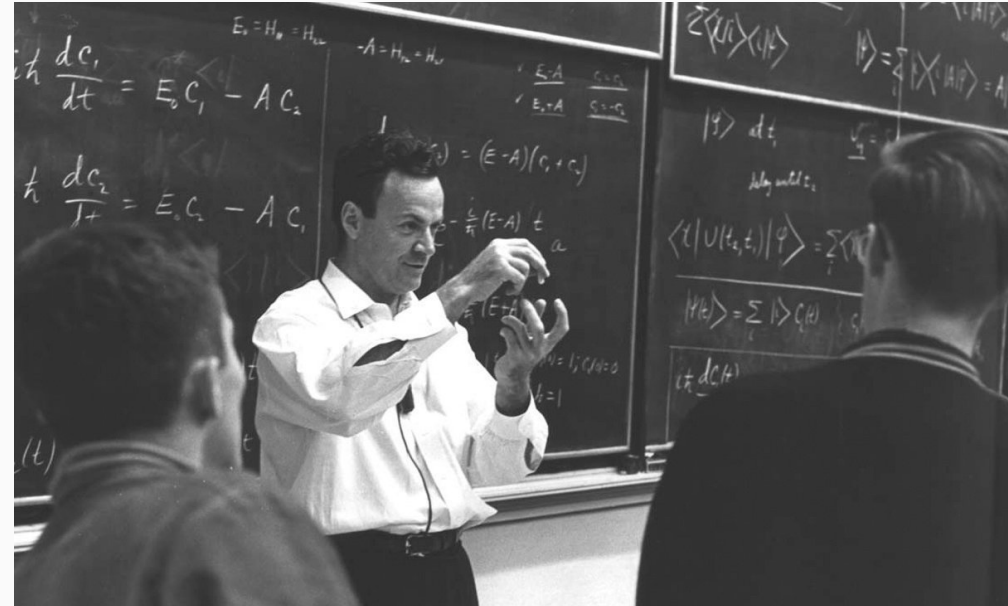
- Confronto entre dados e **múltiplas** hipóteses
- Grau de plausibilidade (ou confiança) em **cada** hipótese
- Hipóteses são **classificadas** em ordem crescente/decrescente de confiança
- **Experimentos críticos** são aqueles capazes de mudar os graus de confiança entre as hipóteses

- Para **Lakatos**, uma hipótese não pode ser rejeitada, a menos que exista uma **alternativa melhor**
- Para **Popper**, uma hipótese pode, **sozinha**, ser rejeitada/não rejeitada
  - Mas e aí?

# Visões alternativas do método científico

*As declarações da ciência não são sobre o que é verdade e o que não é verdade, mas declarações do que é conhecido com diferentes graus de certeza*

@ProfFeynman



## Referências

## Referências

Box, G. E., S. Hunter, and W. G. Hunter (2005). *Statistics for Experimenters: Design, Innovation, and Discovery*. 2nd ed. Cambridge: Wiley, p. 672.

Platt, J. R. (1964). "Strong inference". In: *Science* 146.3642, pp. 347-353. ISSN: 00368075.