

# Probabilidad

# Lógica deductiva

$$A \Rightarrow B$$

$A$  es verdadero, **por lo tanto**  $B$  es verdadero

$B$  es falso, **por lo tanto**  $A$  falso

$A$ : *Tom es un gato*

$B$ : *Tom es un animal*

$B$  es verdadero, **por lo tanto**...

Pero este no es el tipo de razonamiento que utilizamos en la vida cotidiana:

*A: va a llover a las 10 de la mañana*

*B: se nubla antes de las 10 de la mañana*

*B* es verdadero, **por lo tanto** *A* se vuelve más *plausible*

*En una noche oscura, un policía camina por una calle aparentemente desierta. De repente, se escucha la alarma de un local. Se da vuelta y ve, en la vereda de enfrente, una joyería con la vidriera rota. Un hombre con una máscara sale agachado a través del vidrio roto, con una bolsa llena de joyas caras. El policía no duda en concluir que el hombre no tiene buenas intenciones.*

El razonamiento del policía no fue una **deducción lógica**, ya que podría existir una explicación alternativa para lo ocurrido.

*En una noche oscura, un policía camina por una calle aparentemente desierta. De repente, se escucha la alarma de un local. Se da vuelta y ve, en la vereda de enfrente, una joyería con la vidriera rota. Un hombre con una máscara sale agachado a través del vidrio roto, con una bolsa llena de joyas caras. El policía no duda en concluir que el hombre no tiene buenas intenciones.*

El razonamiento del policía no fue una **deducción lógica**, ya que podría existir una explicación alternativa para lo ocurrido.

Dada la evidencia, no podemos decir con seguridad que las intenciones del hombre no son buenas, pero sí que es extremadamente *plausible* que no lo sean.

## Razonamiento plausible

El cerebro humano permanentemente determina si algo se vuelve más o menos *plausible*. Más aún, de alguna manera, evalúa el *grado de plausibilidad* de una proposición.

## Razonamiento plausible

El cerebro humano permanentemente determina si algo se vuelve más o menos *plausible*. Más aún, de alguna manera, evalúa el *grado de plausibilidad* de una proposición.

*La plausibilidad de que llueva a las 10 de la mañana depende fuertemente de la oscuridad de las nubes a las 9:45.*

## Razonamiento plausible

El cerebro humano permanentemente determina si algo se vuelve más o menos *plausible*. Más aún, de alguna manera, evalúa el *grado de plausibilidad* de una proposición.

*La plausibilidad de que llueva a las 10 de la mañana depende fuertemente de la oscuridad de las nubes a las 9:45.*

Este razonamiento hace uso de nuestra experiencia previa. Combina información *a priori* con evidencia disponible. Esto da lugar a un proceso **secuencial**.



# Apuestas

Páguese \$1000 al portador de esta tarjeta si en este grupo hay **alguien** que tiene un loro como mascota

Páguese \$1000 al portador de esta tarjeta si en este grupo **nadie** tiene un loro como mascota

# Apuestas

Páguese \$1000 al portador de esta tarjeta si en este grupo hay **alguien** que tiene un loro como mascota

Páguese \$1000 al portador de esta tarjeta si en este grupo **nadie** tiene un loro como mascota

Tienen a su disposición estas tarjetas. Podemos comprarlas o venderlas. Al final de la clase develamos el misterio y, quien tenga la tarjeta, cobra.

# Apuestas

Páguese \$1000 al portador de esta tarjeta si en este grupo hay **alguien** que tiene un loro como mascota

Páguese \$1000 al portador de esta tarjeta si en este grupo **nadie** tiene un loro como mascota

Tienen a su disposición estas tarjetas. Podemos comprarlas o venderlas. Al final de la clase develamos el misterio y, quien tenga la tarjeta, cobra.

¿Por cuál pagarían más? ¿Cuánto estarían dispuestos a pagar como máximo?

# Apuestas

Páguese \$1000 al portador de esta tarjeta si en este grupo hay **alguien** que tiene un loro como mascota

Páguese \$1000 al portador de esta tarjeta si en este grupo **nadie** tiene un loro como mascota

Tienen a su disposición estas tarjetas. Podemos comprarlas o venderlas. Al final de la clase develamos el misterio y, quien tenga la tarjeta, cobra.

¿Por cuál pagarían más? ¿Cuánto estarían dispuestos a pagar como máximo?

Notar que el precio máximo que estarían dispuestos a pagar para comprarla es el precio mínimo por el que estarían dispuestos a venderla.

Todos pagaríamos  $p \cdot \$1000$  con  $0 \leq p \leq 1$ .

Todos pagaríamos  $p \cdot \$1000$  con  $0 \leq p \leq 1$ .

Decidimos cuánto apostar en función de nuestra incertidumbre en la ocurrencia de un evento (de lo plausible que lo consideremos).  
Decidimos apostar  $p \cdot \$1000$  en favor de un evento, porque le asignamos una plausibilidad o credibilidad de grado  $p$ .

Páguese \$1000 al portador de esta tarjeta si el profe tiene una remera negra

¿Cuánto están dispuestos a pagar para tener esta tarjeta? ¿Por cuánto venderían la tarjeta si la tuvieran?

Páguese \$1000 al portador de esta tarjeta si esta materia es la *mejor* del cuatrimestre

Páguese \$1000 al portador de esta tarjeta si esta materia no es la *mejor* del cuatrimestre



Páguese \$1000 al portador de esta tarjeta si esta materia es la *mejor* del cuatrimestre

Páguese \$1000 al portador de esta tarjeta si esta materia no es la *mejor* del cuatrimestre

Por la primera pagarían como máximo  $p \cdot \$1000$  y por la segunda,  $q \cdot \$1000$ . Es necesario que  $p + q = 1$ . ¿Por qué?

## Dutch book

Supongamos que  $p = 0.7$  y  $q = 0.5$ . Eso significa que:

- ▶ Si no tienen las tarjetas, estarían dispuestos a comprar ambas por \$1200.

Supongamos que  $p = 0.3$  y  $q = 0.2$ . Eso significa que:

- ▶ Si tienen las tarjetas, estarían dispuestos a vender ambas por \$500.

## Dutch book

Supongamos que  $p = 0.7$  y  $q = 0.5$ . Eso significa que:

- ▶ Si no tienen las tarjetas, estarían dispuestos a comprar ambas por \$1200.

Supongamos que  $p = 0.3$  y  $q = 0.2$ . Eso significa que:

- ▶ Si tienen las tarjetas, estarían dispuestos a vender ambas por \$500.

Sabemos que a fin de cuatrimestre, quien tenga las dos tarjetas ganará \$1000...

# Dutch book

## Dutch book

Un **Dutch book** es un conjunto de apuestas que aseguran una pérdida. El argumento del **Dutch book** dice que una persona que tiene creencias inconsistentes actúa irracionalmente y puede ser llevado a una pérdida segura en un juego de apuestas

## Dutch book

### Dutch book

Un **Dutch book** es un conjunto de apuestas que aseguran una pérdida. El argumento del **Dutch book** dice que una persona que tiene creencias inconsistentes actúa irracionalmente y puede ser llevado a una pérdida segura en un juego de apuestas

Los grados de plausibilidad o grados de creencia que una persona le asigna a un conjunto de eventos deben respetar los axiomas de probabilidad.

## Dutch book

### Dutch book

Un **Dutch book** es un conjunto de apuestas que aseguran una pérdida. El argumento del **Dutch book** dice que una persona que tiene creencias inconsistentes actúa irracionalmente y puede ser llevado a una pérdida segura en un juego de apuestas

Los grados de plausibilidad o grados de creencia que una persona le asigna a un conjunto de eventos deben respetar los axiomas de probabilidad.

Se puede asignar un valor de probabilidad a cualquier proposición.

Las probabilidades son la mejor herramienta disponible para cuantificar la incertidumbre y las leyes de la probabilidad, la mejor herramienta para operar con ella.

# Probabilidad

## Tres ideas de probabilidad

- ▶ **Clásica:** si  $n$  eventos son equiprobables, la probabilidad de uno de ellos es  $1/n$ . Además, la probabilidad de un evento se puede calcular como el número de casos favorables dividido el número de casos posibles.
- ▶ **Frecuentista:** la probabilidad de un evento se puede estimar observando su frecuencia relativa sobre un gran número de realizaciones o ensayos.
- ▶ **Subjetiva:** las probabilidades reflejan el grado de creencia o *plausibilidad* que una persona le asigna a un evento.



# Probabilidad subjetiva

- ▶ Es la forma más general de interpretar la probabilidad (eventos no equiprobables y eventos que no pueden repetirse)
- ▶ Se utiliza para cuantificar la incertidumbre o ignorancia (o certidumbre o conocimiento) acerca de un evento o proposición
- ▶ Es personal
- ▶ Depende del estado actual de conocimiento del mundo

## Probabilidad subjetiva

- ▶ Es la forma más general de interpretar la probabilidad (eventos no equiprobables y eventos que no pueden repetirse)
- ▶ Se utiliza para cuantificar la incertidumbre o ignorancia (o certidumbre o conocimiento) acerca de un evento o proposición
- ▶ Es personal
- ▶ Depende del estado actual de conocimiento del mundo

Todos los métodos estadísticos son subjetivos en el sentido que se basan en idealizaciones matemáticas de la realidad (modelos).

# Incertidumbre

Distinguimos dos tipos de incertidumbre:

# Incertidumbre

Distinguimos dos tipos de incertidumbre:

- ▶ **Incertidumbre epistémica**
- ▶ **Incertidumbre aleatoria**

# Incertidumbre

Distinguimos dos tipos de incertidumbre:

- ▶ **Incertidumbre epistémica**
- ▶ **Incertidumbre aleatoria**

Lo retomaremos a lo largo del curso.

# Elicitación de probabilidades

Consideremos la siguiente proposición:

*Voy a aprobar todas las materias de este cuatrimestre ( $W$ )*

## Elicitación de probabilidades

Consideremos la siguiente proposición:

*Voy a aprobar todas las materias de este cuatrimestre ( $W$ )*

Una caja con 5 bolas azules y 5 bolas rojas. Se extrae una bola al azar.  $A$  es el evento *extraer una bola azul*

# Elicitación de probabilidades

Consideremos la siguiente proposición:

*Voy a aprobar todas las materias de este cuatrimestre ( $W$ )*

Una caja con 5 bolas azules y 5 bolas rojas. Se extrae una bola al azar.  $A$  es el evento *extraer una bola azul*

▶  $A_1$ : \$1000 si  $W$

▶  $A_2$ : \$1000 si  $A$



## Elicitación de probabilidades

Consideremos la siguiente proposición:

*Voy a aprobar todas las materias de este cuatrimestre ( $W$ )*

Una caja con 5 bolas azules y 5 bolas rojas. Se extrae una bola al azar.  $A$  es el evento *extraer una bola azul*

►  $A_1$ : \$1000 si  $W$

►  $A_2$ : \$1000 si  $A$

Si prefieren  $A_1$  entonces... 8 bolas azules y 2 bolas rojas. Se extrae una bola al azar.  $A$  es el evento *extraer una bola azul*.

## Elicitación de probabilidades

Consideremos la siguiente proposición:

*Voy a aprobar todas las materias de este cuatrimestre ( $W$ )*

Una caja con 5 bolas azules y 5 bolas rojas. Se extrae una bola al azar.  $A$  es el evento *extraer una bola azul*

▶  $A_1$ : \$1000 si  $W$

▶  $A_2$ : \$1000 si  $A$

Si prefieren  $A_1$  entonces... 8 bolas azules y 2 bolas rojas. Se extrae una bola al azar.  $A$  es el evento *extraer una bola azul*.

▶  $A_3$ : \$1000 si  $W$

▶  $A_4$ : \$1000 si  $A$

Interludio...

Interludio...

¿Qué es más probable?

- ▶ Que el PSG le gane al Lyon
- ▶ Que el PSG le gane al Lyon y Messi haga un gol

Interludio...

¿Qué es más probable?

- ▶ Que el PSG le gane al Lyon
- ▶ Que el PSG le gane al Lyon y Messi haga un gol

# Sesgos

Los seres humanos no estamos optimizados para operar con probabilidades (al menos no intuitivamente).

## Repaso de probabilidad

Probabilidad de un evento

$$\Pr(A)$$

$$\Pr(\bar{A}) = 1 - \Pr(A)$$



Probabilidad de la conjunción:

$$\Pr(A \wedge B) = \Pr(A, B)$$

Si  $A$  y  $B$  son independientes, entonces

$$\Pr(A \wedge B) = \Pr(A)\Pr(B)$$

Probabilidad de la unión:

$$\Pr(A \vee B) = \Pr(A) + \Pr(B) - \Pr(A, B)$$

Donde, si  $A$  y  $B$  son mutuamente excluyentes,

$$\Pr(A \vee B) = \Pr(A) + \Pr(B)$$

$$\Pr(B \mid A) = \frac{\Pr(A, B)}{\Pr(A)}$$

siempre que  $\Pr(A) > 0$  (no se puede condicionar a eventos imposibles)

# Variables aleatorias

Una variable aleatoria (univariada)  $X$  es una función que mapea elementos del espacio muestral  $\mathcal{X}$  a la recta real  $\mathbb{R}$

- ▶ Si  $\mathcal{X}$  es finito o infinito numerable entonces  $X$  es una variable aleatoria discreta
- ▶ Si  $\mathcal{X}$  es cualquier valor en  $\mathbb{R}$  entonces  $X$  es una variable aleatoria continua

Para el caso discreto:

$$p(x) = \Pr(X = x) \quad (\text{pmf})$$

Para el caso continuo:

$$P(x) = \Pr(X \leq x) \quad (\text{cdf})$$

$$p(x) = \frac{d}{dx}P(x) \quad (\text{pdf})$$

$$\Pr(x \leq X \leq x + dx) = p(x)dx$$

# Distribuciones conjuntas

## Caso discreto

$p(X, Y)$	$Y = 0$	$Y = 1$
$X = 0$	0.2	0.3
$X = 1$	0.3	0.2

## Distribución marginal

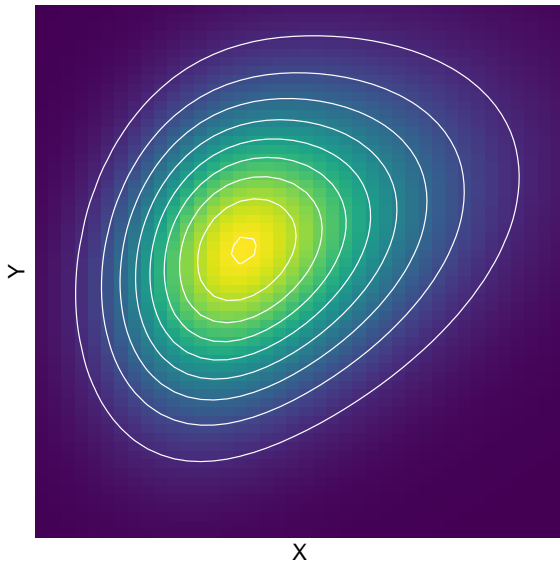
$$p(x) = \sum_y p(x, y)$$

$$p(y) = \sum_x p(x, y)$$

Se conoce como *marginalizar* (en inglés también *integrate out*)

## Caso continuo

$$p(x, y)$$



## Distribución marginal

$$p(x) = \int p(x, y) dy$$

$$p(y) = \int p(x, y) dx$$



## Distribución condicional

$$p(x \mid y) = \frac{p(x, y)}{p(y)}$$

$$p(y \mid x) = \frac{p(x, y)}{p(x)}$$

$p(x)$  normaliza a  $p(x, y)$  (una función de  $y$  ya que  $x$  tomó un valor fijo).

## Regla del producto

También conocida como **regla de la cadena**. Recobramos la distribución conjunta haciendo

$$p(x, y) = p(x \mid y)p(y)$$

$$p(x, y) = p(y \mid x)p(x)$$

$$p(x, y, z) = p(z)p(y \mid z)p(x \mid y, z)$$

## Regla de la probabilidad total

$$p(x) = \int p(x \mid y)p(y)dy$$

$$p(y) = \int p(y \mid x)p(x)dy$$

## Regla de la probabilidad total

$$p(x) = \int p(x | y)p(y)dy$$

$$p(y) = \int p(y | x)p(x)dy$$

La probabilidad marginal de  $x$  (una función de  $x$ ) se obtiene ponderando todos los posibles  $p(x | y)$  (una función de  $x$  para cada valor de  $y$ ) según la probabilidad de  $p(y)$ . Y viceversa.

# Regla de Bayes

$$p(x \mid y) = \frac{p(y \mid x)p(x)}{p(y)}$$

# Regla de Bayes

$$p(x \mid y) = \frac{p(y \mid x)p(x)}{p(y)}$$

Así expresada no nos dice mucho.

# Regla de Bayes

$$p(x \mid y) = \frac{p(y \mid x)p(x)}{p(y)}$$

Así expresada no nos dice mucho.

Recordemos que **utilizamos las probabilidades para expresar nuestra incertidumbre**. La mejor forma de actualizar nuestro grado de creencia sobre alguna hipótesis  $\mathcal{H}$  frente a nueva información  $E$  es utilizar la Regla de Bayes.

$$p(\mathcal{H} \mid E) = \frac{p(E \mid \mathcal{H})p(\mathcal{H})}{p(E)}$$

# Orígenes de la Regla de Bayes

Alrededor de 1740,  
**Thomas Bayes**  
propone una versión  
de la regla pero no la  
publica (¿su  
descubrimiento era  
inútil? ¿era muy  
modesto?). Propuso  
el experimento  
imaginario de un  
juego con bolitas.  
Asignó iguales  
probabilidades *a priori*

**Richard Price**  
publicó el resultado  
del Teorema de la  
Probabilidad Inversa  
de Bayes en *An Essay  
Towards Solving a  
Problem in the  
Doctrine of Chances*  
(1763)

**Pierre-Simon  
Laplace** llegó al  
mismo resultado que  
Bayes (algo que llamó  
*la probabilidad de las  
causas*) y lo publicó  
en *Memoire sur la  
Probabilité des  
Causes par les  
Évenements* (1774).  
Se asemeja más a lo  
que hoy conocemos.  
Reconoció que Bayes  
había descubierto  
algo similar.



*Bayes's rule is a mistake, perhaps the only mistake to which the mathematical world has so deeply committed itself (Fisher, ~1920)*

*Bayes's rule is a mistake, perhaps the only mistake to which the mathematical world has so deeply committed itself (Fisher, ~1920)*

*Bayes's theorem is to the theory of probability what Pythagoras's theorem is to geometry (Savage, ~1950)*

# Ejemplos

Vamos a trabajar con un conjunto de ejemplos que consisten en la aplicación de la regla de Bayes, acercándonos de a poco a forma en la que se usa en la estadística bayesiana.

## Ejemplo 1

Nos encontramos con alguien en la calle y nos dice que tiene dos hijos. Le preguntamos si alguno de ellos es mujer y nos responde que sí. ¿Cuál es la probabilidad de que tenga dos niñas?

		H1	
		V	M
H2	V	$1/4$	$1/4$
	M	$1/4$	$1/4$

		H1	
		V	M
H2	V		$1/3$
	M	$1/3$	$1/3$

		H1	
		V	M
H2	V	$1/4$	$1/4$
	M	$1/4$	$1/4$

		H1	
		V	M
H2	V		$1/3$
	M	$1/3$	$1/3$

¿Cómo lo escribimos con símbolos?

## Ejemplo 2

Un taxi se vio involucrado en un accidente nocturno y se dio a la fuga. En la ciudad hay dos empresas de taxis, la Verde y la Azul. Sobre el accidente se tienen los siguientes datos:

- ▶ 85% de los taxis de la ciudad son de la empresa Verde y 15% de la Azul
- ▶ Un testigo identificó el taxi como azul. La corte evaluó la confiabilidad del testigo en las circunstancias del accidente y concluyó que es capaz de identificar correctamente el color en un 80% de los casos.

## Ejemplo 2

Un taxi se vio involucrado en un accidente nocturno y se dio a la fuga. En la ciudad hay dos empresas de taxis, la Verde y la Azul. Sobre el accidente se tienen los siguientes datos:

- ▶ 85% de los taxis de la ciudad son de la empresa Verde y 15% de la Azul
- ▶ Un testigo identificó el taxi como azul. La corte evaluó la confiabilidad del testigo en las circunstancias del accidente y concluyó que es capaz de identificar correctamente el color en un 80% de los casos.

¿Cuál es la probabilidad de que el taxi haya sido azul, de acuerdo a la declaración del testigo?



$$p(A \mid T_A) = \frac{p(T_A \mid A)p(A)}{p(T_A)}$$

$$p(A \mid T_A) = \frac{p(T_A \mid A)p(A)}{p(T_A)}$$

$$p(A \mid T_A) = \frac{p(T_A \mid A)p(A)}{p(T_A \mid A)p(A) + p(T_A \mid V)p(V)}$$

$$p(A \mid T_A) = \frac{p(T_A \mid A)p(A)}{p(T_A)}$$

$$p(A \mid T_A) = \frac{p(T_A \mid A)p(A)}{p(T_A \mid A)p(A) + p(T_A \mid V)p(V)}$$

$$P(A \mid T_A) = \frac{0.80 \cdot 0.15}{0.80 \cdot 0.15 + 0.2 \cdot 0.85}$$

$$p(A \mid T_A) = 0.414$$

## Ejemplo 3

Se realiza un test de hipótesis que tiene una potencia  $1 - \beta = 80\%$ . Se fija el nivel de significación en  $\alpha = 5\%$ . Se testea  $H_0$  versus una hipótesis alternativa  $H_1$  : no  $H_0$ .

- ▶ Si se supone que la probabilidad de que  $H_0$  sea cierta es de 50%, ¿cuál es la probabilidad de que  $H_1$  sea cierta luego de observar un resultado estadísticamente significativo?
- ▶ Si la hipótesis alternativa es muy rara (digamos 10%), ¿cuál es la probabilidad de que  $H_1$  sea cierta luego de observar un resultado estadísticamente significativo?



$$p(H_1 \mid \text{rechazo } H_0) = \frac{p(\text{rechazo } H_0 \mid H_1)p(H_1)}{p(\text{rechazo } H_0)}$$

$$p(H_1 \mid \text{rechazo } H_0) = \frac{p(\text{rechazo } H_0 \mid H_1)p(H_1)}{p(\text{rechazo } H_0)}$$

Si en el denominador enumeramos exhaustivamente las formas de rechazar  $H_0$ :

$$p(H_1 \mid \text{rechazo } H_0) = \frac{p(\text{rechazo } H_0 \mid H_1)p(H_1)}{p(\text{rechazo } H_0)}$$

Si en el denominador enumeramos exhaustivamente las formas de rechazar  $H_0$ :

$$p(H_1 \mid \text{rechazo } H_0) = \frac{(1 - \beta)p(H_1)}{\alpha p(H_0) + (1 - \beta)p(H_1)}$$

Para el primer caso:

$$p(H_1 \mid \text{rechazo } H_0) = \frac{0.80 \cdot 0.50}{0.05 \cdot 0.50 + 0.80 \cdot 0.50} = 0.94$$

Para el segundo caso:

$$p(H_1 \mid \text{rechazo } H_0) = \frac{0.80 \cdot 0.10}{0.05 \cdot 0.90 + 0.80 \cdot 0.10} = 0.64$$



# Inferencia Bayesiana

## El problema de las urnas

*Se cuenta con 11 urnas etiquetadas según  $u = 0, 1, \dots, 10$ , que contienen diez bolas cada una. La urna  $u$  contiene  $u$  bolas azules y  $10 - u$  bolas blancas. Fede elige una urna  $u$  al azar y extrae con reposición  $N$  bolas, obteniendo  $n_A$  azules y  $N - n_A$  blancas. Nico, el amigo de Fede, observa atentamente. Si después de  $N = 10$  extracciones resulta  $n_A = 3$ , ¿cuál es la probabilidad de que la urna que Fede está usando sea la  $u$ ?*

La teoría de las probabilidades permite predecir una distribución sobre posibles valores de un resultado dado cierto conocimiento (o estado) del universo: **probabilidad hacia adelante**

La teoría de las probabilidades permite predecir una distribución sobre posibles valores de un resultado dado cierto conocimiento (o estado) del universo: **probabilidad hacia adelante**

Por el contrario, muchas veces estamos interesados en realizar inferencias sobre el estado del universo a partir de observaciones: **probabilidad inversa.**

La teoría de las probabilidades permite predecir una distribución sobre posibles valores de un resultado dado cierto conocimiento (o estado) del universo: **probabilidad hacia adelante**

Por el contrario, muchas veces estamos interesados en realizar inferencias sobre el estado del universo a partir de observaciones: **probabilidad inversa**.

$$p(\mathcal{H} \mid E) = \frac{p(E \mid \mathcal{H})p(\mathcal{H})}{p(E)}$$

$$p(\mathcal{H} \mid E) \propto p(E \mid \mathcal{H})p(\mathcal{H})$$