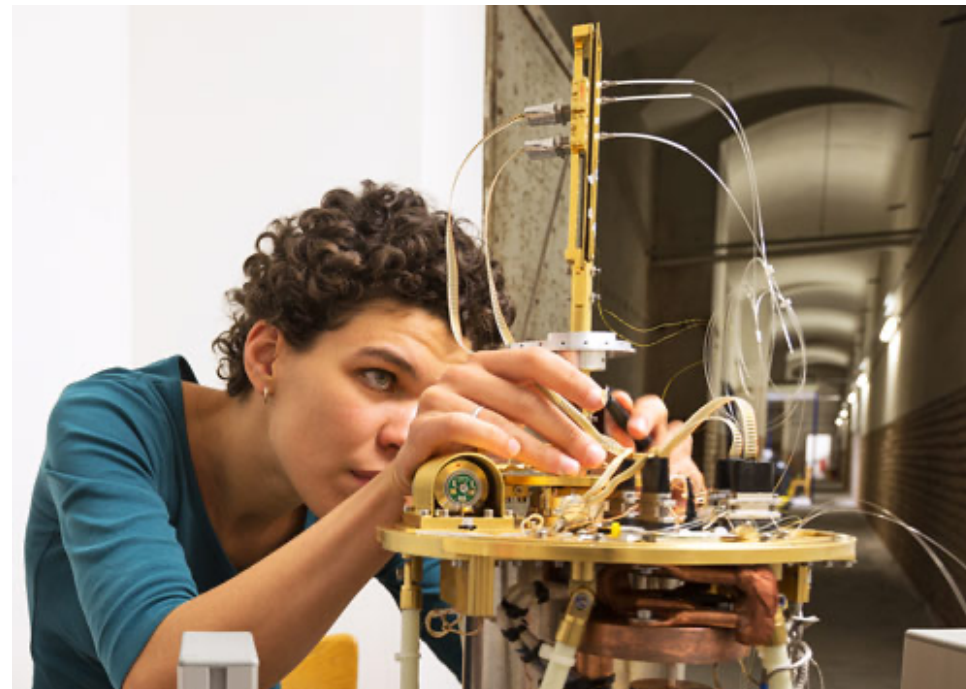
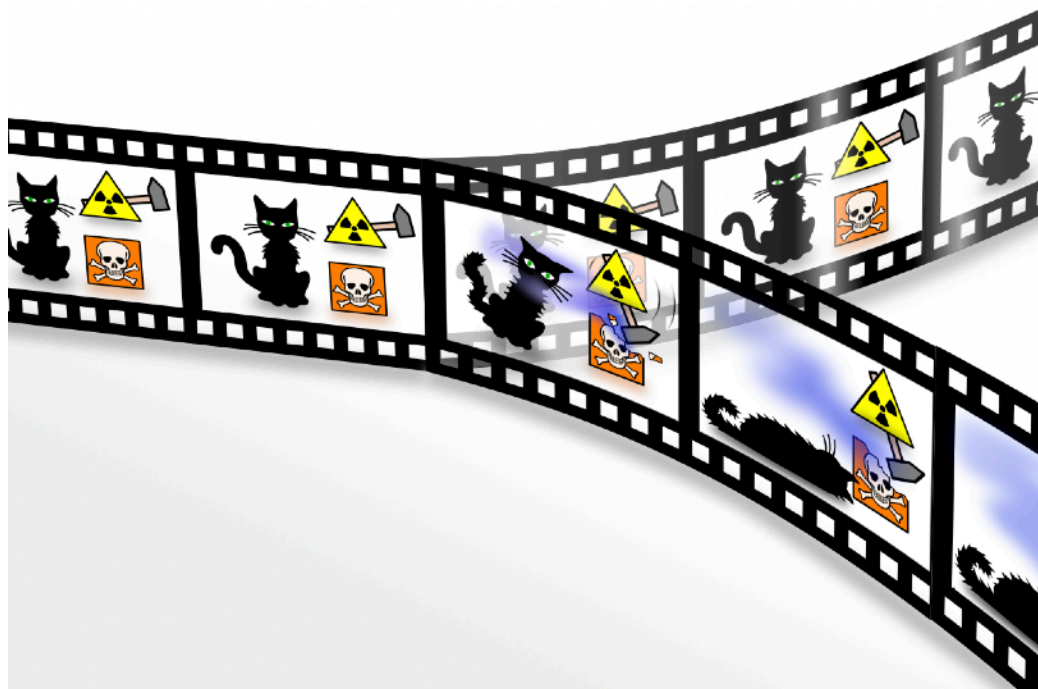


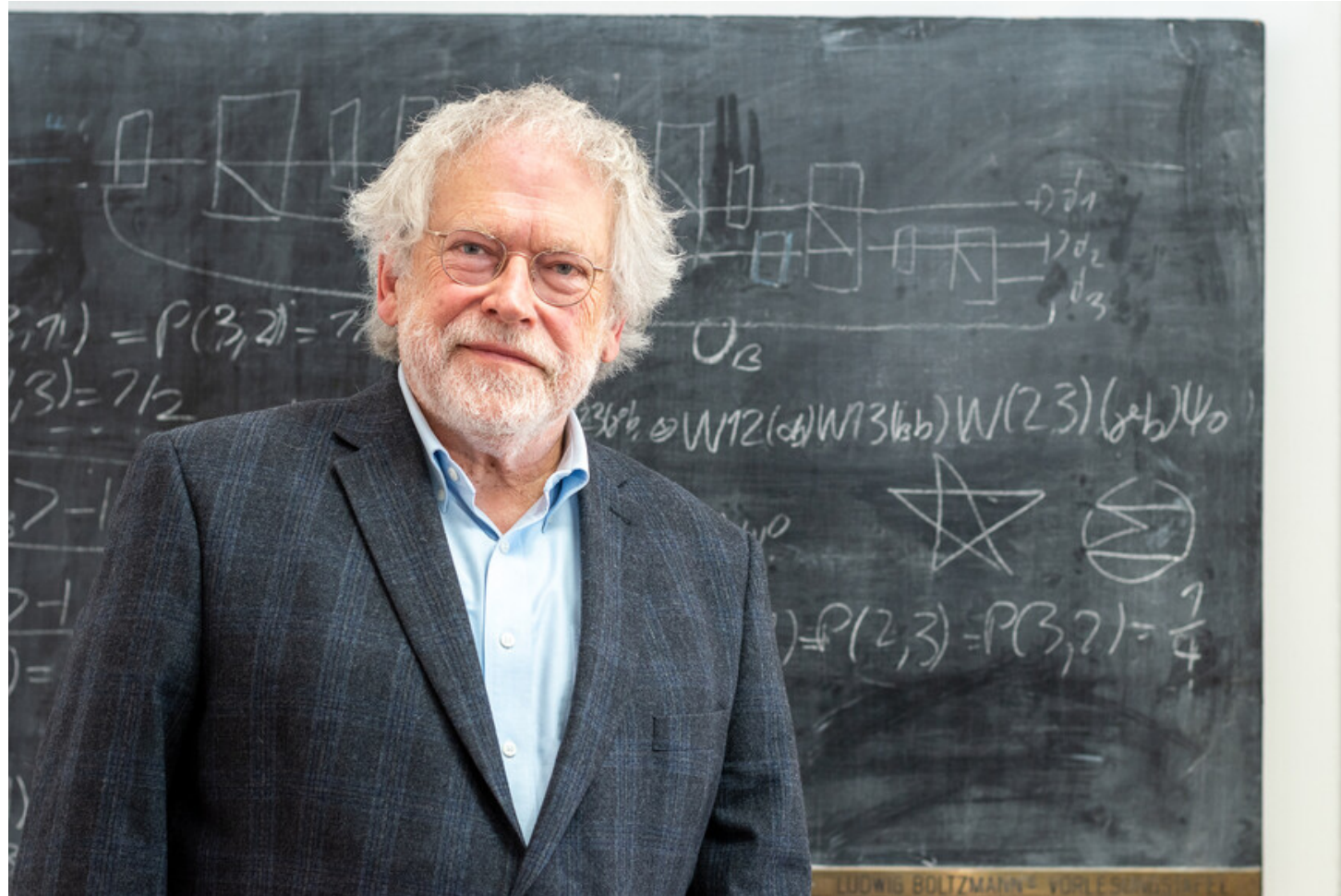
Quantenphysik und Realität: was wir wissen, was wir vermuten, und worüber wir uns wundern

Markus P. Müller

Institute for Quantum Optics and Quantum Information (IQOQI), Vienna
Vienna Center for Quantum Science and Technology (VCQ), Vienna
Perimeter Institute for Theoretical Physics (PI), Waterloo, Canada



Nobelpreis für Physik 2022: Anton Zeilinger...



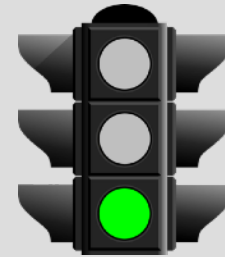
Anton Zeilinger

“... für Experimente mit verschränkten Photonen, die den Nachweis der Verletzung Bell’scher Ungleichungen erlaubten und wegweisend für die Quanteninformationswissenschaften waren.”

Die Welt ist nicht lokal-realistisch.

0. Kurze Vorstellung

1. Was wir wissen und vermuten



1a. Experimente mit Münzen

1b. Die Quantenwelt ist **nicht lokal-realistisch**

1c. Was tun damit? -> Erzeugung sicherer Zufallszahlen

1d. In was für einer verrückten Welt leben wir, die das ermöglicht?

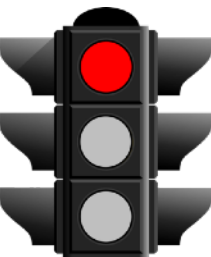
2. Worüber wir uns wundern — und was mich antreibt



2a. Vielleicht stellen wir die falschen Fragen

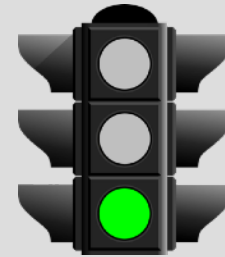
2b. Der **Blick von innen**: “*was passiert mit mir als nächstes?*”

2c. Die Suche nach einer modernen Version des Idealismus



0. Kurze Vorstellung

1. Was wir wissen und vermuten



1a. Experimente mit Münzen

1b. Die Quantenwelt ist **nicht lokal-realistisch**

1c. Was tun damit? -> Erzeugung sicherer Zufallszahlen

1d. In was für einer verrückten Welt leben wir, die das ermöglicht?

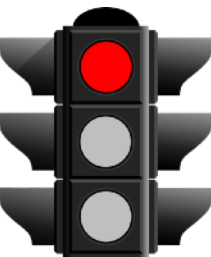
2. Worüber wir uns wundern — und was mich antreibt



2a. Vielleicht stellen wir die falschen Fragen

2b. Der **Blick von innen**: “*was passiert mit mir als nächstes?*”

2c. Die Suche nach einer modernen Version des Idealismus



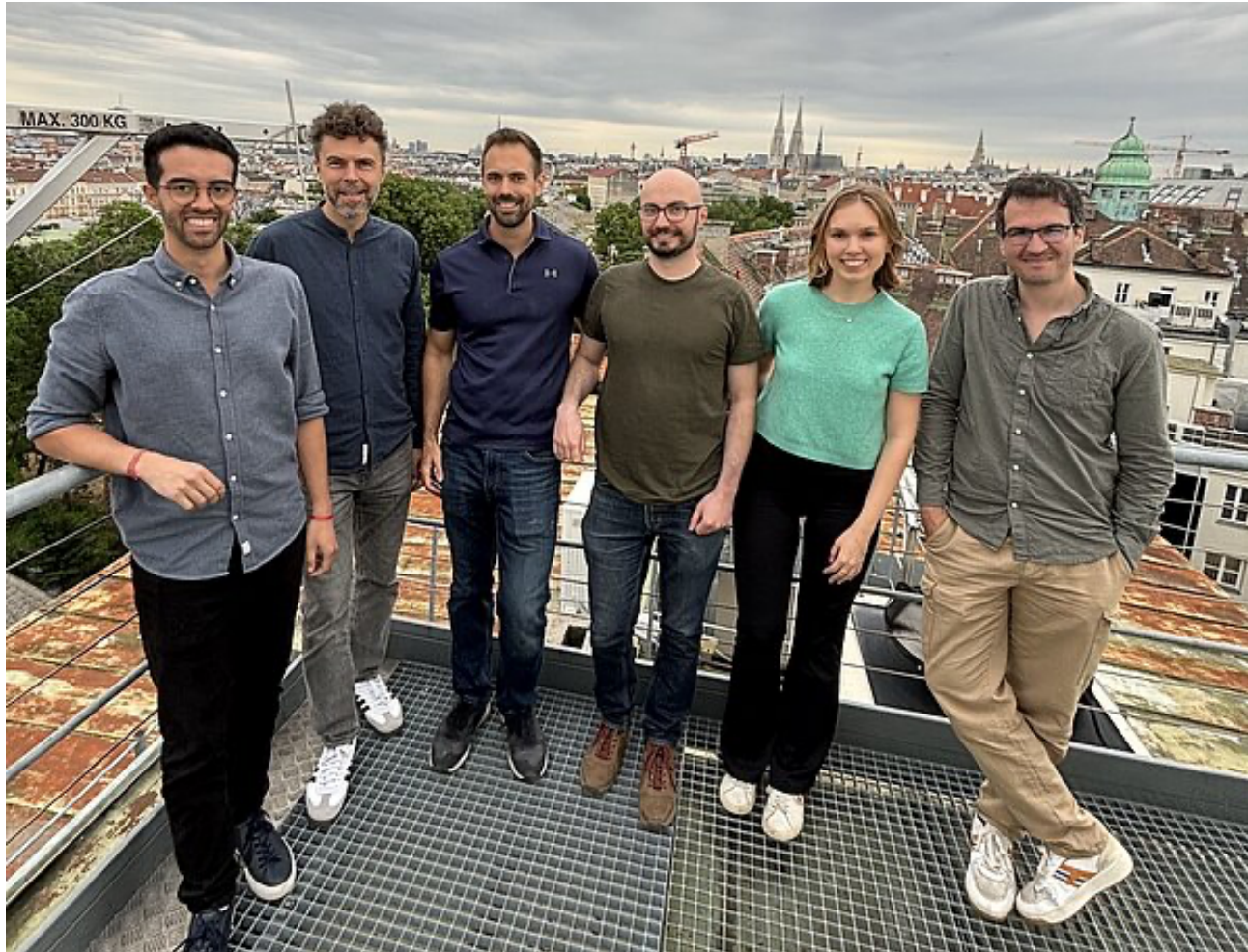
Markus Müller's group @ IQOQI Vienna



Quanteninformationstheorie und Grundlagen der Physik

Manuel Mekonnen (Doktorand), **MM**, **Stefan Ludescher** (Doktorand),
Thomas Galley (Postdoc), **Caroline Jones** (Doktorandin), **Albert Aloy** (Postdoc)

Markus Müller's group @ IQOQI Vienna



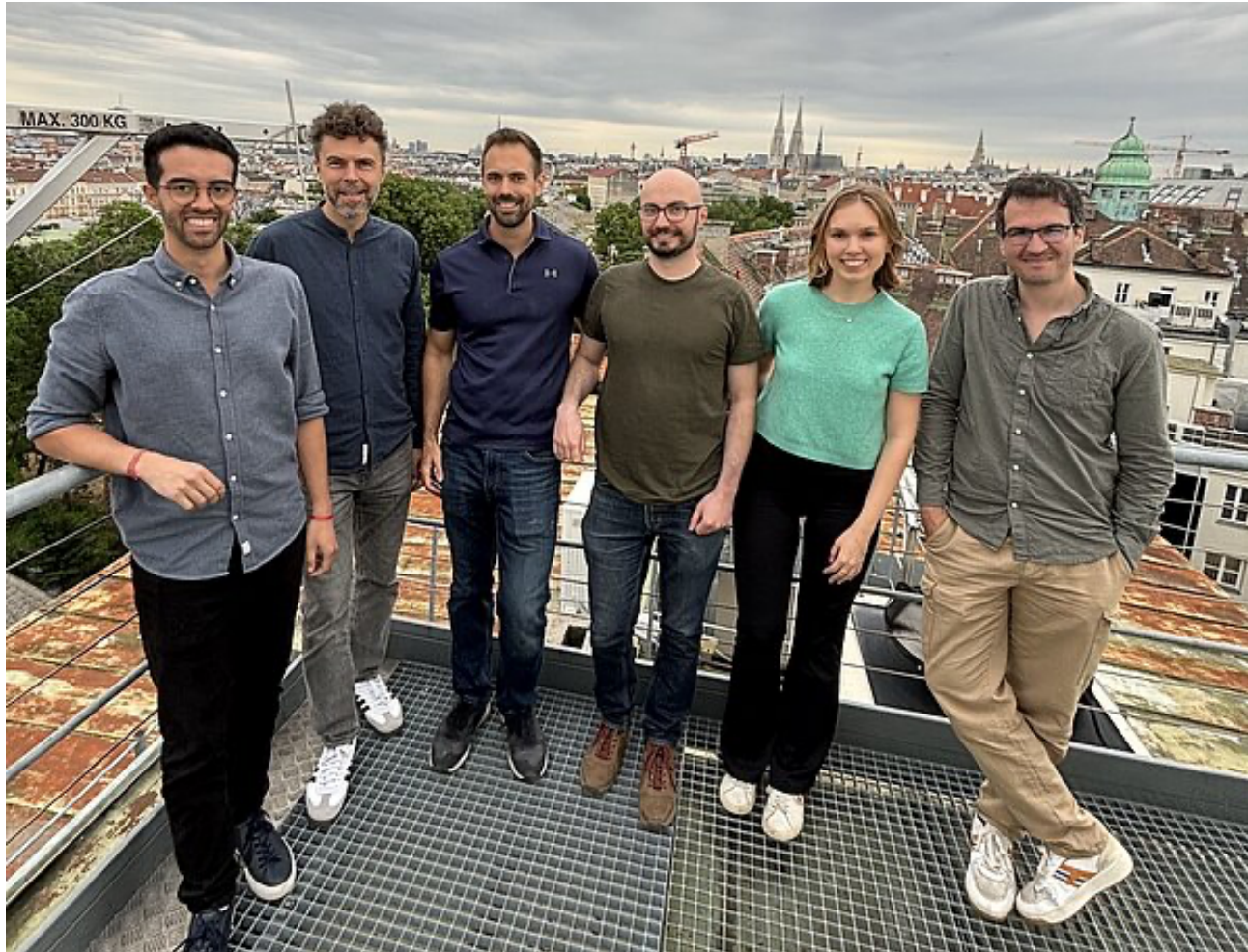
Manuel Mekonnen (Doktorand), **MM**, **Stefan Ludescher** (Doktorand),
Thomas Galley (Postdoc), **Caroline Jones** (Doktorandin), **Albert Aloy** (Postdoc)

Quanteninformationstheorie und Grundlagen der Physik



Jüngste Mitglieder (2 und 5):
klassische Physik (bis jetzt)...

Markus Müller's group @ IQOQI Vienna



Quanteninformationstheorie und Grundlagen der Physik



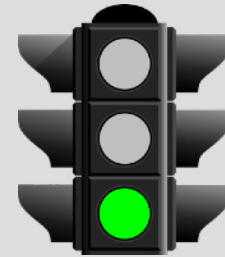
Manuel Mekonnen (Doktorand), **MM**, **Stefan Ludescher** (Doktorand),
Thomas Galley (Postdoc), **Caroline Jones** (Doktorandin), **Albert Aloy** (Postdoc)

Jüngste Mitglieder (2 und 5):
klassische Physik (bis jetzt)...

- MM:
- Aus Morsbrunn (Bayern)
 - Dr. in Mathematischer Physik, TU Berlin, 2007
 - Postdoc Perimeter Institut (Kanada); Juniorgruppenleiter Uni Heidelberg
 - 2015-17: Professor für Mathematik und Philosophie, London ON, Kanada
 - seit 2017: Gruppenleiter am IQOQI Wien

0. Kurze Vorstellung

1. Was wir wissen und vermuten



1a. Experimente mit Münzen

1b. Die Quantenwelt ist **nicht lokal-realistisch**

1c. Was tun damit? -> Erzeugung sicherer Zufallszahlen

1d. In was für einer verrückten Welt leben wir, die das ermöglicht?

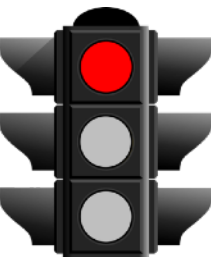
2. Worüber wir uns wundern — und was mich antreibt



2a. Vielleicht stellen wir die falschen Fragen

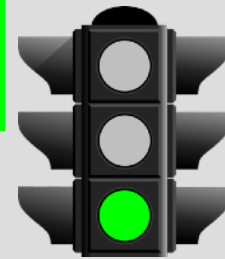
2b. Der **Blick von innen**: “*was passiert mit mir als nächstes?*”

2c. Die Suche nach einer modernen Version des Idealismus



0. Kurze Vorstellung

1. Was wir wissen und vermuten



1a. Experimente mit Münzen

1b. Die Quantenwelt ist **nicht lokal-realistisch**

1c. Was tun damit? -> Erzeugung sicherer Zufallszahlen

1d. In was für einer verrückten Welt leben wir, die das ermöglicht?

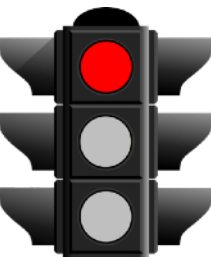


2. Worüber wir uns wundern — und was mich antreibt

2a. Vielleicht stellen wir die falschen Fragen

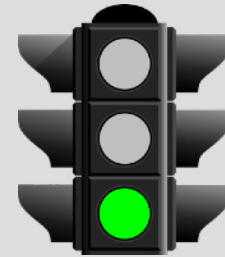
2b. Der **Blick von innen**: “*was passiert mit mir als nächstes?*”

2c. Die Suche nach einer modernen Version des Idealismus



0. Kurze Vorstellung

1. Was wir wissen und vermuten



1a. Experimente mit Münzen

1b. Die Quantenwelt ist **nicht lokal-realistisch**

1c. Was tun damit? -> Erzeugung sicherer Zufallszahlen

1d. In was für einer verrückten Welt leben wir, die das ermöglicht?

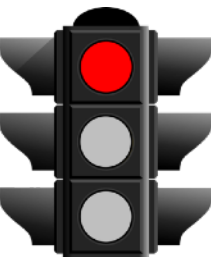
2. Worüber wir uns wundern — und was mich antreibt



2a. Vielleicht stellen wir die falschen Fragen

2b. Der **Blick von innen**: “*was passiert mit mir als nächstes?*”

2c. Die Suche nach einer modernen Version des Idealismus



1a. Experimente mit Münzen

Alice und Bob arbeiten zusammen, um ein Spiel zu gewinnen.

1a. Experimente mit Münzen

Alice und Bob arbeiten zusammen, um ein Spiel zu gewinnen.

1. In der Mitte treffen und **Strategie besprechen**.

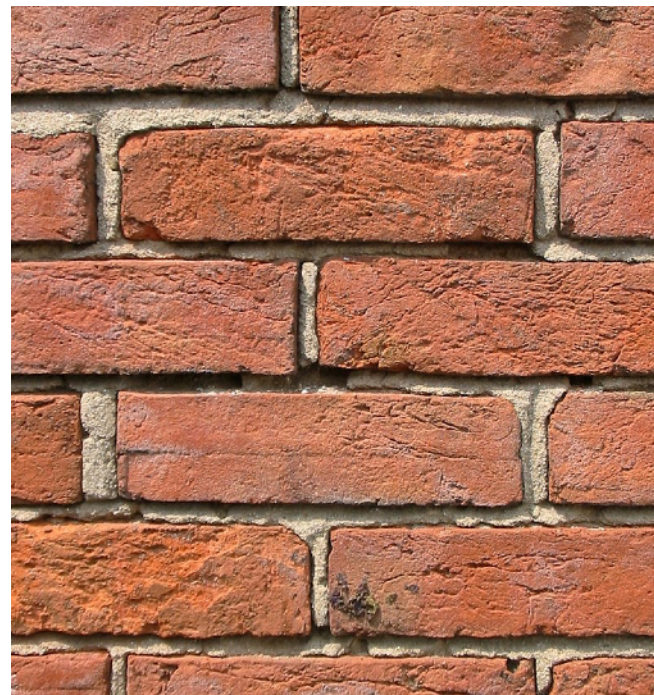


1a. Experimente mit Münzen

Alice und Bob arbeiten zusammen, um ein Spiel zu gewinnen.

1. In der Mitte treffen und **Strategie besprechen**.

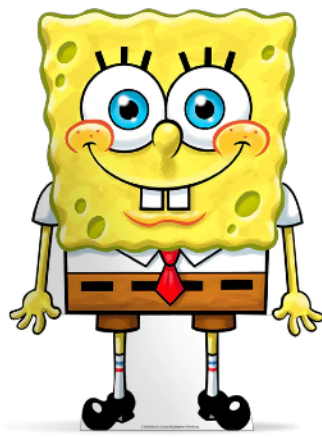
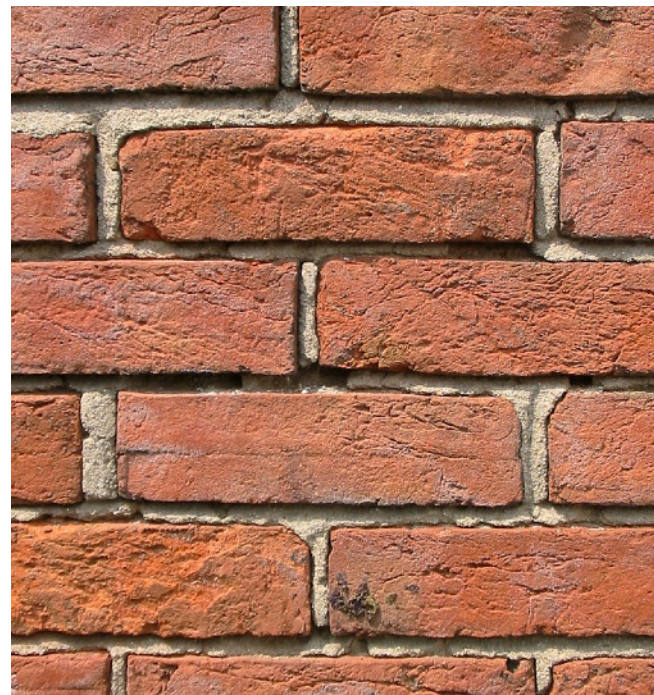
2. Weit voneinander entfernen. **Kommunikation streng verboten!**



1a. Experimente mit Münzen

Alice und Bob arbeiten zusammen, um ein Spiel zu gewinnen.

1. In der Mitte treffen und **Strategie besprechen**.
2. Weit voneinander entfernen. **Kommunikation streng verboten!**
3. Jeder wirft eine **Münze** und notiert das Ergebnis (Kopf/Zahl).



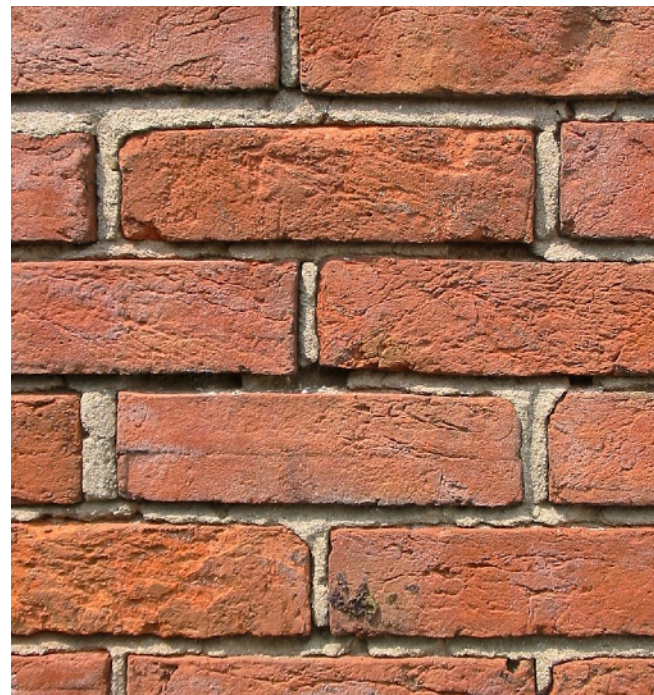
1a. Experimente mit Münzen

Alice und Bob arbeiten zusammen, um ein Spiel zu gewinnen.

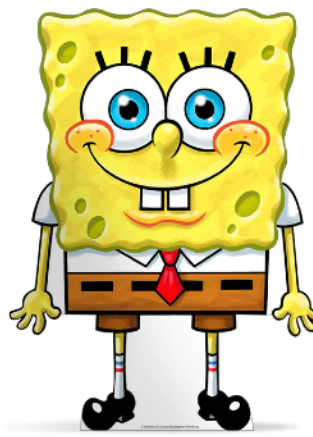
1. In der Mitte treffen und **Strategie besprechen**.
2. Weit voneinander entfernen. **Kommunikation streng verboten!**
3. Jeder wirft eine **Münze** und notiert das Ergebnis (Kopf/Zahl).



Z



K



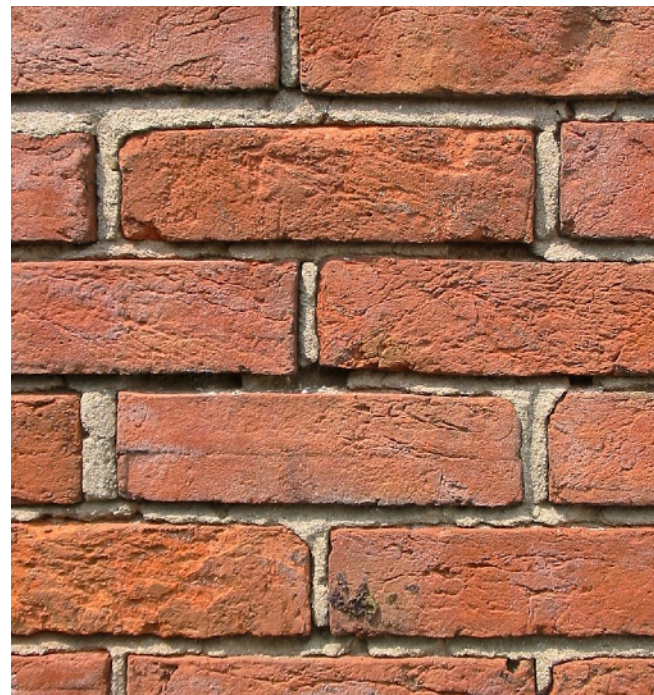
1a. Experimente mit Münzen

Alice und Bob arbeiten zusammen, um ein Spiel zu gewinnen.

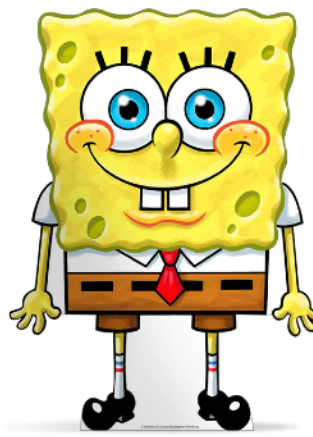
1. In der Mitte treffen und **Strategie besprechen**.
2. Weit voneinander entfernen. **Kommunikation streng verboten!**
3. Jeder wirft eine **Münze** und notiert das Ergebnis (Kopf/Zahl).
4. Jeder entscheidet sich für ein (lokales) Ergebnis: 0 oder 1.



Z



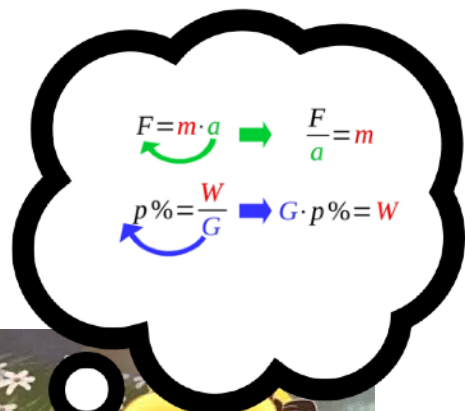
K



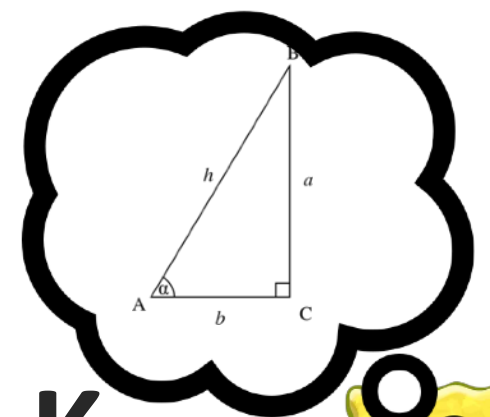
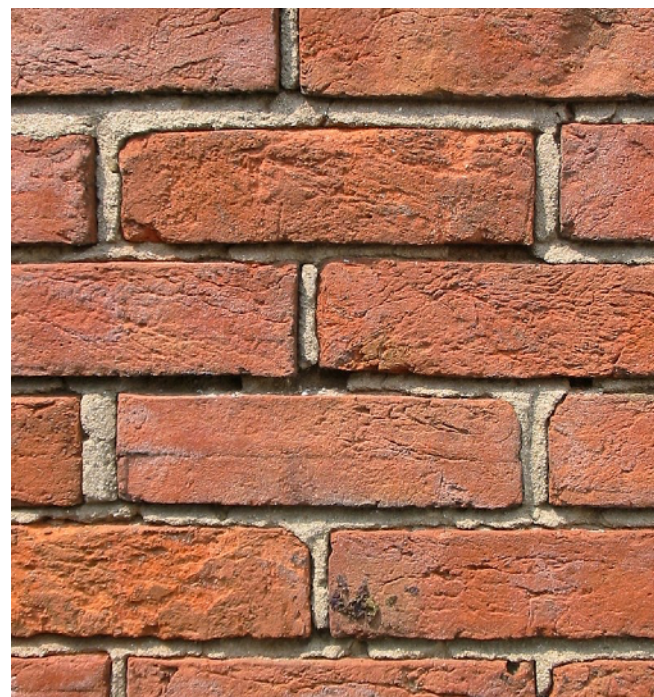
1a. Experimente mit Münzen

Alice und Bob arbeiten zusammen, um ein Spiel zu gewinnen.

1. In der Mitte treffen und **Strategie besprechen**.
2. Weit voneinander entfernen. **Kommunikation streng verboten!**
3. Jeder wirft eine **Münze** und notiert das Ergebnis (Kopf/Zahl).
4. Jeder entscheidet sich für ein (lokales) Ergebnis: 0 oder 1.



Z



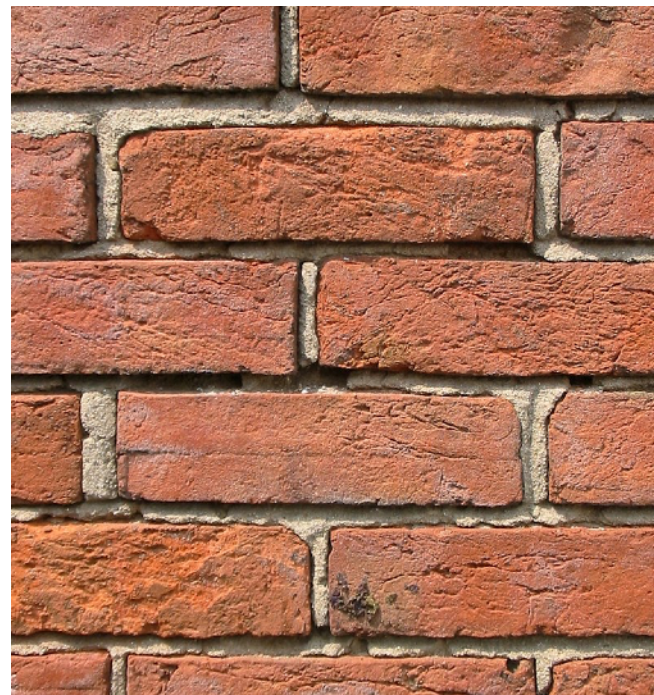
K



1a. Experimente mit Münzen

Alice und Bob arbeiten zusammen, um ein Spiel zu gewinnen.

1. In der Mitte treffen und **Strategie besprechen**.
2. Weit voneinander entfernen. **Kommunikation streng verboten!**
3. Jeder wirft eine **Münze** und notiert das Ergebnis (Kopf/Zahl).
4. Jeder entscheidet sich für ein (lokales) Ergebnis: 0 oder 1.



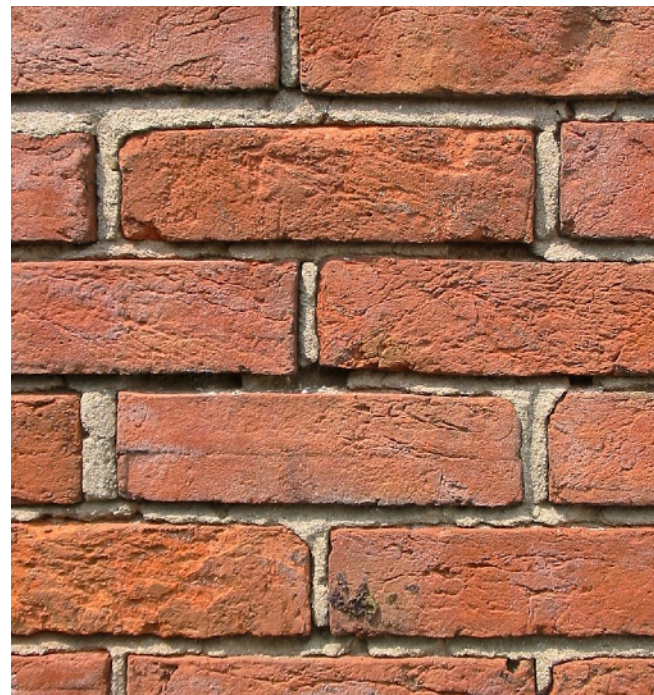
1a. Experimente mit Münzen

Alice und Bob arbeiten zusammen, um ein Spiel zu gewinnen.

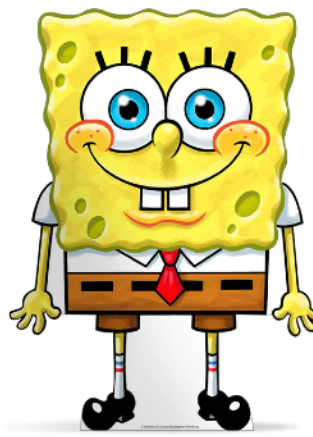
1. In der Mitte treffen und **Strategie besprechen**.
2. Weit voneinander entfernen. **Kommunikation streng verboten!**
3. Jeder wirft eine **Münze** und notiert das Ergebnis (Kopf/Zahl).
4. Jeder entscheidet sich für ein (lokales) Ergebnis: 0 oder 1.



Z 0



K 1



1a. Experimente mit Münzen

Alice und Bob arbeiten zusammen, um ein Spiel zu gewinnen.

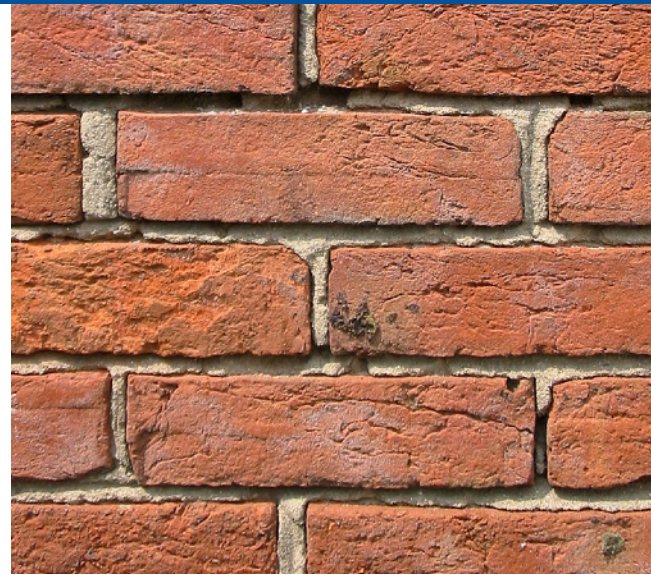
1. In der Mitte treffen und **Strategie besprechen**.
2. Weit voneinander entfernen. **Kommunikation streng verboten!**
3. Jeder wirft eine **Münze** und notiert das Ergebnis (Kopf/Zahl).
4. Jeder entscheidet sich für ein (lokales) Ergebnis: 0 oder 1.

Erstes Spiel:

Alice und Bob sollen so spielen, dass sie

- die **gleichen Ergebnisse** erhalten (00 oder 11), wann immer die Münzen das **gleiche** zeigen (KK bzw. ZZ); aber
- **unterschiedliche Ergebnisse** erhalten (01 oder 10), wenn die Münzen **unterschiedliches** zeigen (KZ bzw. ZK).

1a. Experimente mit Münzen

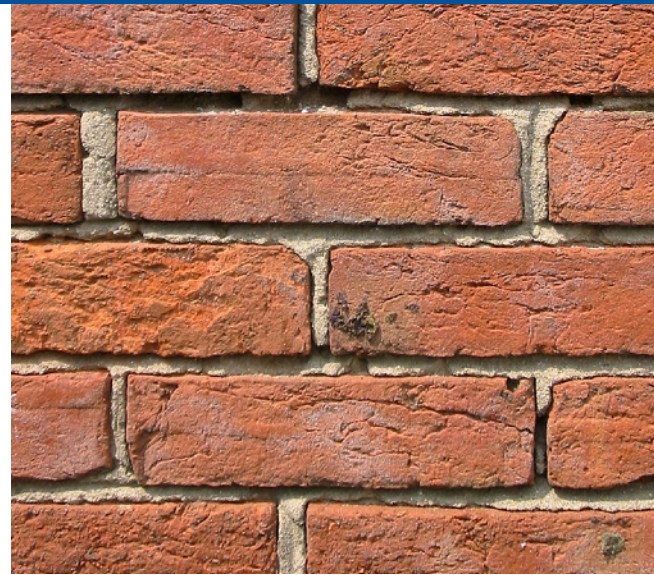


Erstes Spiel:

Alice und Bob sollen so spielen, dass sie

- die **gleichen Ergebnisse** erhalten (00 oder 11), wann immer die Münzen das **gleiche** zeigen (KK bzw. ZZ); aber
- **unterschiedliche Ergebnisse** erhalten (01 oder 10), wenn die Münzen **unterschiedliches** zeigen (KZ bzw. ZK).

1a. Experimente mit Münzen



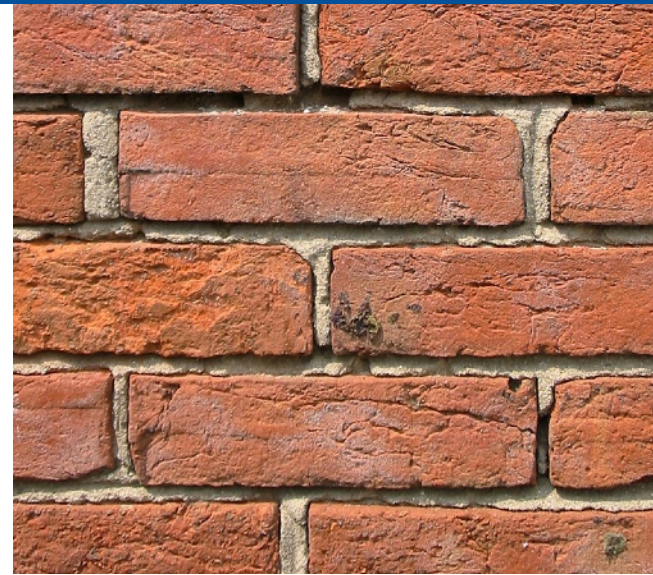
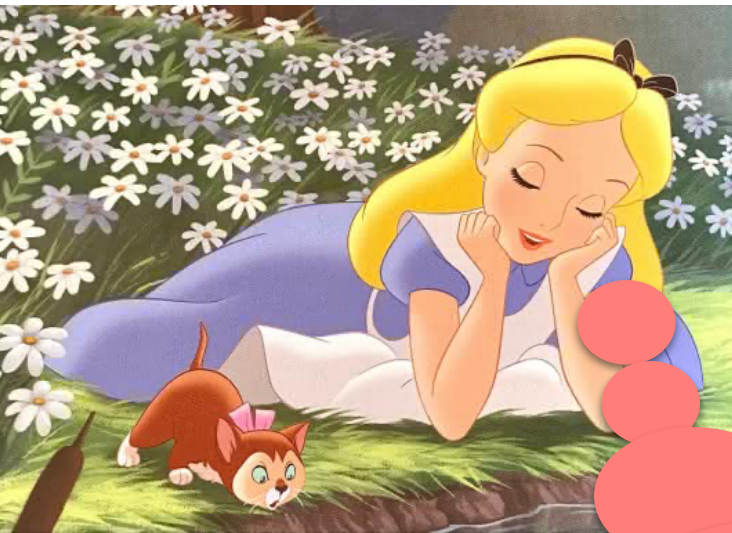
Wenn ich "Zahl" kriege notiere ich "1",
bei "Kopf" notiere ich "0".

Erstes Spiel:

Alice und Bob sollen so spielen, dass sie

- die **gleichen Ergebnisse** erhalten (00 oder 11), wann immer die Münzen das **gleiche** zeigen (KK bzw. ZZ); aber
- **unterschiedliche Ergebnisse** erhalten (01 oder 10), wenn die Münzen **unterschiedliches** zeigen (KZ bzw. ZK).

1a. Experimente mit Münzen



Wenn ich "Zahl" kriege notiere ich "1",
bei "Kopf" notiere ich "0".



11



10



01



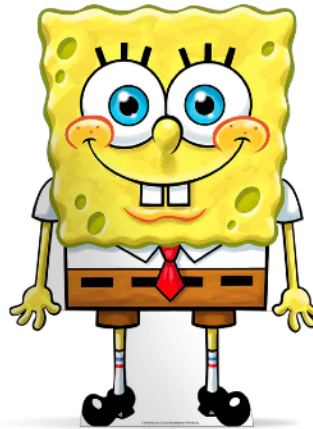
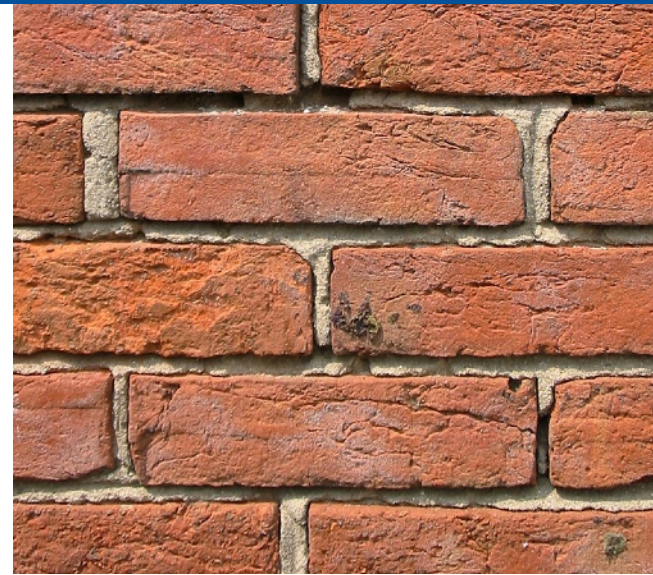
00

Erstes Spiel:

Alice und Bob sollen so spielen, dass sie

- die **gleichen Ergebnisse** erhalten (00 oder 11), wann immer die Münzen das **gleiche** zeigen (KK bzw. ZZ); aber
- **unterschiedliche Ergebnisse** erhalten (01 oder 10), wenn die Münzen **unterschiedliches** zeigen (KZ bzw. ZK).

1a. Experimente mit Münzen



Spiel (immer) gewonnen!



11



10



01



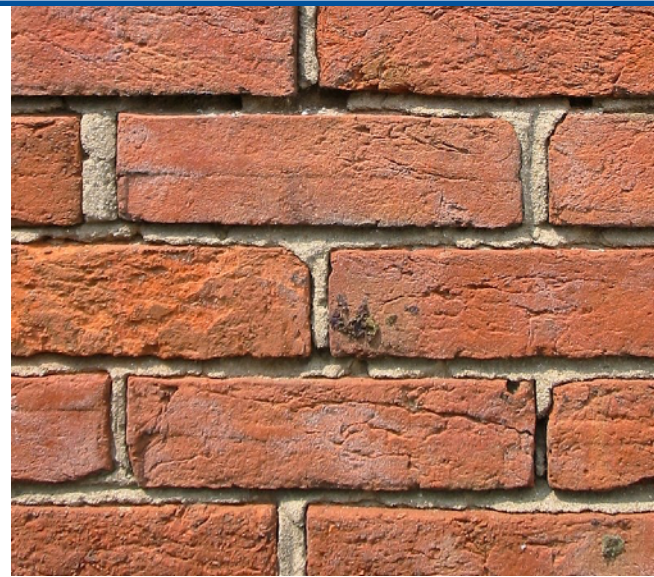
00

Erstes Spiel:

Alice und Bob sollen so spielen, dass sie

- die **gleichen Ergebnisse** erhalten (00 oder 11), wann immer die Münzen das **gleiche** zeigen (KK bzw. ZZ); aber
- **unterschiedliche Ergebnisse** erhalten (01 oder 10), wenn die Münzen **unterschiedliches** zeigen (KZ bzw. ZK).

1a. Experimente mit Münzen



Zweites Spiel:

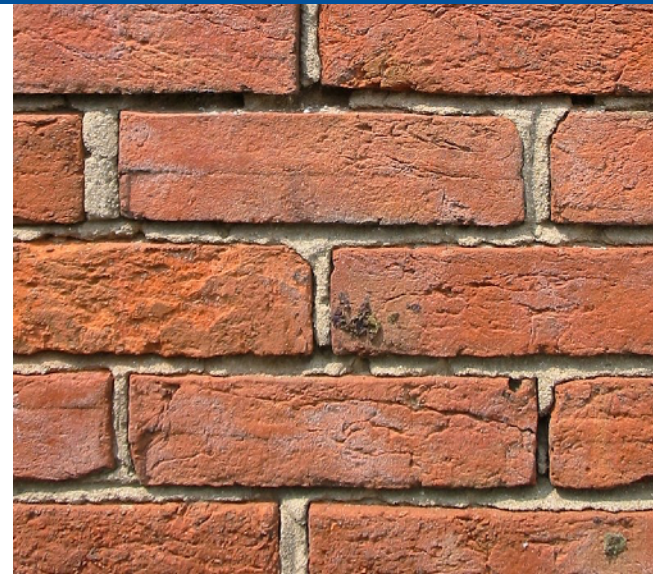
Alice und Bob sollen so spielen, dass sie

- die **gleichen Ergebnisse** erhalten (00 oder 11), wann immer die Münzen **unterschiedliches** zeigen (KZ bzw. ZK); aber
- **unterschiedliche Ergebnisse** erhalten (01 oder 10), wenn die Münzen **das gleiche** zeigen (KK bzw. ZZ).

1a. Experimente mit Münzen



Bei "Zahl" notiere ich "1",
bei "Kopf" notiere ich "0".



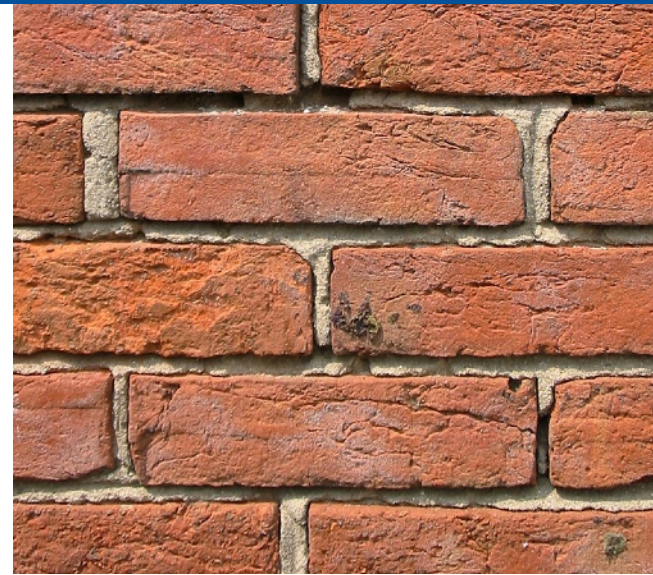
Bei "Zahl" notiere ich "0",
bei "Kopf" notiere ich "1".

Zweites Spiel:

Alice und Bob sollen so spielen, dass sie

- die **gleichen Ergebnisse** erhalten (00 oder 11), wann immer die Münzen **unterschiedliches** zeigen (KZ bzw. ZK); aber
- **unterschiedliche Ergebnisse** erhalten (01 oder 10), wenn die Münzen **das gleiche** zeigen (KK bzw. ZZ).

1a. Experimente mit Münzen



Bei "Zahl" notiere ich "1",
bei "Kopf" notiere ich "0".

Bei "Zahl" notiere ich "0",
bei "Kopf" notiere ich "1".



10



11



00



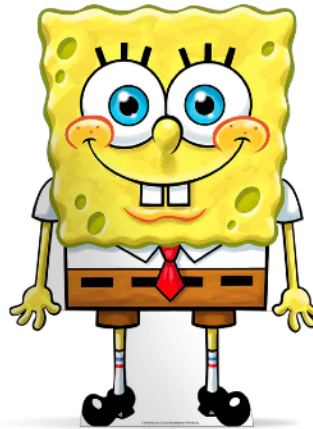
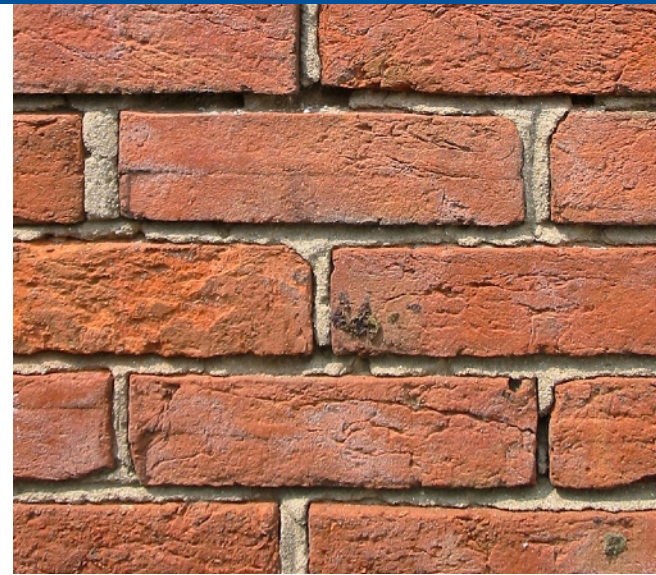
01

Zweites Spiel:

Alice und Bob sollen so spielen, dass sie

- die **gleichen Ergebnisse** erhalten (00 oder 11), wann immer die Münzen **unterschiedliches** zeigen (KZ bzw. ZK); aber
- **unterschiedliche Ergebnisse** erhalten (01 oder 10), wenn die Münzen **das gleiche** zeigen (KK bzw. ZZ).

1a. Experimente mit Münzen



Spiel (immer) gewonnen!



10



11



00



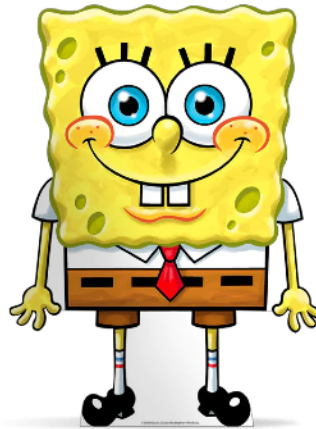
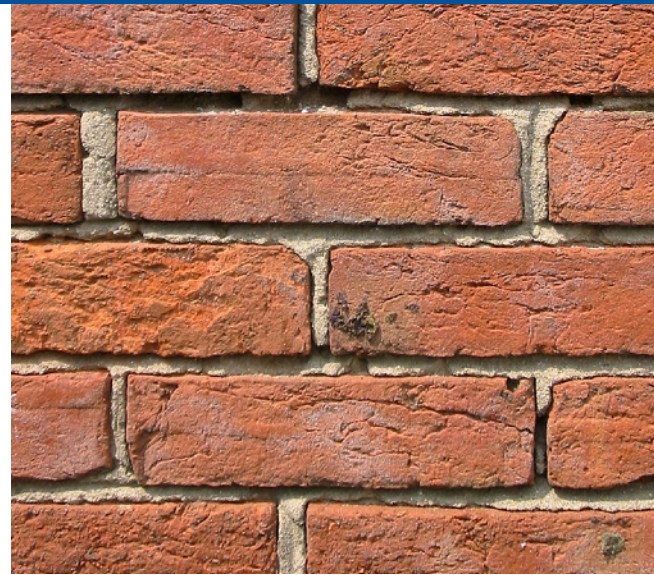
01

Zweites Spiel:

Alice und Bob sollen so spielen, dass sie

- die **gleichen Ergebnisse** erhalten (00 oder 11), wann immer die Münzen **unterschiedliches** zeigen (KZ bzw. ZK); aber
- **unterschiedliche Ergebnisse** erhalten (01 oder 10), wenn die Münzen **das gleiche** zeigen (KK bzw. ZZ).

1a. Experimente mit Münzen

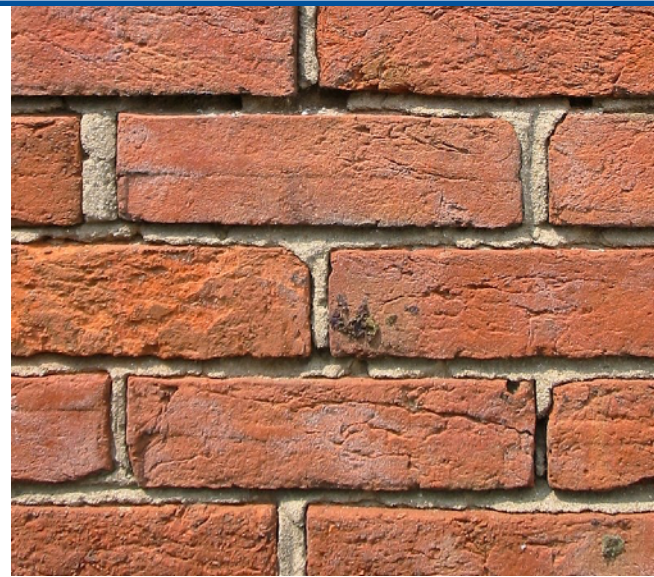


Drittes Spiel:

Alice und Bob sollen so spielen, dass sie

- die **gleichen Ergebnisse** erhalten (00 oder 11), wann immer die Münzen **entweder KZ, ZK oder KK zeigen**; aber
- **unterschiedliche Ergebnisse** erhalten (01 oder 10), wenn **beide Münzen Zahl zeigen (ZZ)**.

1a. Experimente mit Münzen



?!??!

Drittes Spiel:

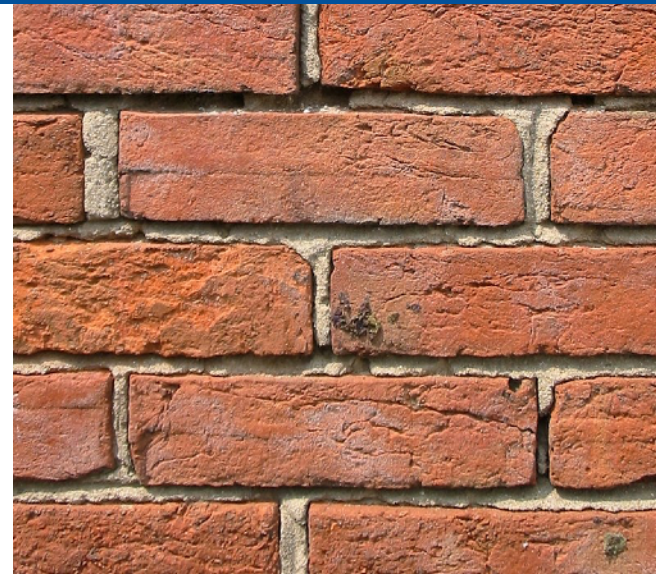
Alice und Bob sollen so spielen, dass sie

- die **gleichen Ergebnisse** erhalten (00 oder 11), wann immer die Münzen **entweder KZ, ZK oder KK zeigen**; aber
- **unterschiedliche Ergebnisse** erhalten (01 oder 10), wenn **beide Münzen Zahl zeigen (ZZ)**.

1a. Experimente mit Münzen



Vielleicht notiere ich einfach immer "0"?



Hmm... bei Kopf notiere ich "0", bei Zahl "1"?!

Drittes Spiel:

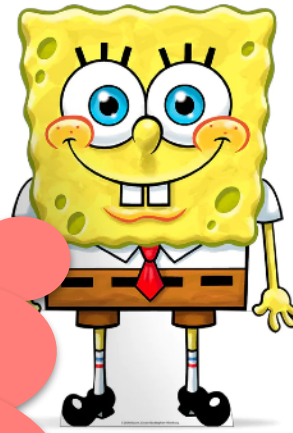
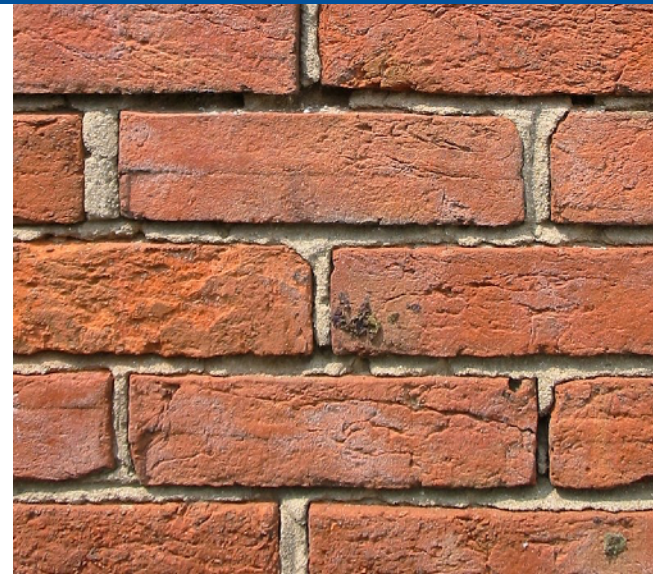
Alice und Bob sollen so spielen, dass sie

- die **gleichen Ergebnisse** erhalten (00 oder 11), wann immer die Münzen **entweder KZ, ZK oder KK zeigen**; aber
- **unterschiedliche Ergebnisse** erhalten (01 oder 10), wenn **beide Münzen Zahl zeigen (ZZ)**.

1a. Experimente mit Münzen



Vielleicht notiere ich einfach immer "0"?



Hmm... bei Kopf notiere ich "0", bei Zahl "1"?!

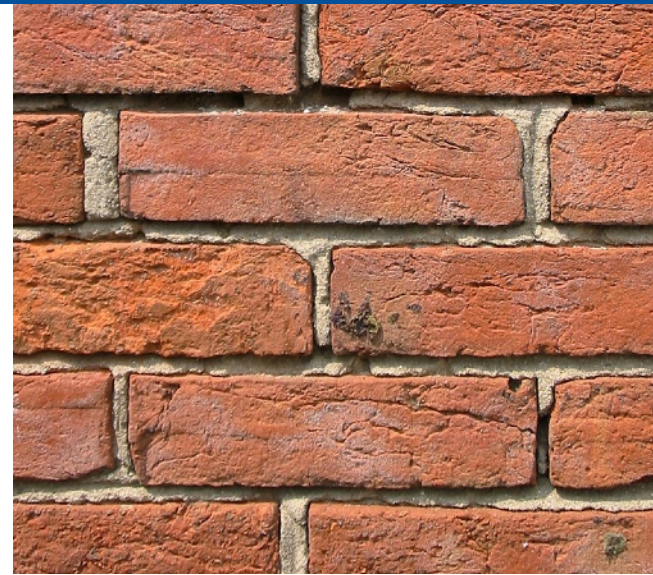


Drittes Spiel:

Alice und Bob sollen so spielen, dass sie

- die **gleichen Ergebnisse** erhalten (00 oder 11), wann immer die Münzen **entweder KZ, ZK oder KK zeigen**; aber
- **unterschiedliche Ergebnisse** erhalten (01 oder 10), wenn **beide Münzen Zahl zeigen (ZZ)**.

1a. Experimente mit Münzen



01



00



01



00



Drittes Spiel:

Alice und Bob sollen so spielen, dass sie

- die **gleichen Ergebnisse** erhalten (00 oder 11), wann immer die Münzen **entweder KZ, ZK oder KK zeigen**; aber
- **unterschiedliche Ergebnisse** erhalten (01 oder 10), wenn **beide Münzen Zahl zeigen (ZZ)**.

1a. Experimente mit Münzen

In unserer Alltagswelt gilt **lokaler Realismus**, und daraus folgt:

$$\text{Gewinnwahrscheinlichkeit} \leq \frac{3}{4} \quad (75\%).$$



Drittes Spiel:

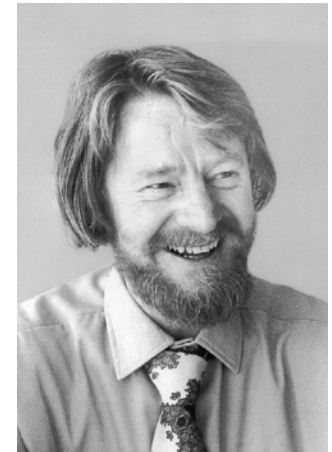
Alice und Bob sollen so spielen, dass sie

- die **gleichen Ergebnisse** erhalten (00 oder 11), wann immer die Münzen **entweder KZ, ZK oder KK zeigen**; aber
- **unterschiedliche Ergebnisse** erhalten (01 oder 10), wenn **beide Münzen Zahl zeigen (ZZ)**.

1a. Experimente mit Münzen

In unserer Alltagswelt gilt **lokaler Realismus**, und daraus folgt:

$$\text{Gewinnwahrscheinlichkeit} \leq \frac{3}{4} \quad (75\%).$$



Das ist eine **Bell'sche Ungleichung** (John Bell 1964).

Drittes Spiel:

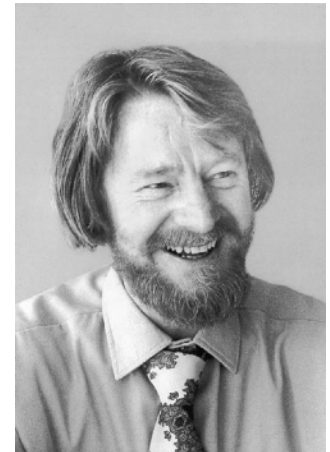
Alice und Bob sollen so spielen, dass sie

- die **gleichen Ergebnisse** erhalten (00 oder 11), wann immer die Münzen **entweder KZ, ZK oder KK zeigen**; aber
- **unterschiedliche Ergebnisse** erhalten (01 oder 10), wenn **beide Münzen Zahl zeigen (ZZ)**.

1a. Experimente mit Münzen

In unserer Alltagswelt gilt **lokaler Realismus**, und daraus folgt:

$$\text{Gewinnwahrscheinlichkeit} \leq \frac{3}{4} \quad (75\%).$$



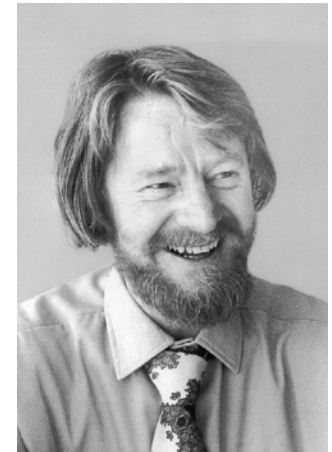
Das ist eine **Bell'sche Ungleichung** (John Bell 1964).

- **Lokalität** bedeutet in etwa, dass die beiden Münzwürfe statistisch unabhängig sind und keine Kommunikation stattfindet.
- **Realismus** bedeutet in etwa, dass die Ergebnisse nur bereits existierende Eigenschaften der Welt enthüllt haben, und sie nicht erst im Moment des Aufschreibens *erzeugt* wurden.

1a. Experimente mit Münzen

In unserer Alltagswelt gilt **lokaler Realismus**, und daraus folgt:

$$\text{Gewinnwahrscheinlichkeit} \leq \frac{3}{4} \quad (75\%).$$



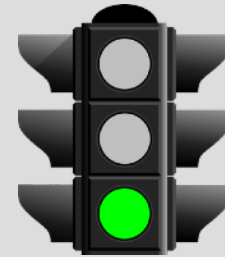
Das ist eine **Bell'sche Ungleichung** (John Bell 1964).

- **Lokalität** bedeutet in etwa, dass die beiden Münzwürfe statistisch unabhängig sind und keine Kommunikation stattfindet.
- **Realismus** bedeutet in etwa, dass die Ergebnisse nur bereits existierende Eigenschaften der Welt enthüllt haben, und sie nicht erst im Moment des Aufschreibens *erzeugt* wurden.

Mehr Details: gleich.

0. Kurze Vorstellung

1. Was wir wissen und vermuten



1a. Experimente mit Münzen

1b. Die Quantenwelt ist **nicht lokal-realistisch**

1c. Was tun damit? -> Erzeugung sicherer Zufallszahlen

1d. In was für einer verrückten Welt leben wir, die das ermöglicht?

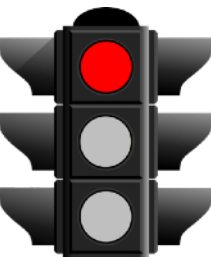
2. Worüber wir uns wundern — und was mich antreibt



2a. Vielleicht stellen wir die falschen Fragen

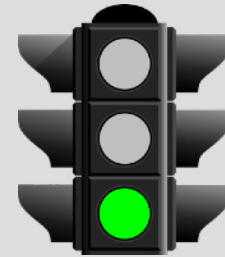
2b. Der **Blick von innen**: “*was passiert mit mir als nächstes?*”

2c. Die Suche nach einer modernen Version des Idealismus



0. Kurze Vorstellung

1. Was wir wissen und vermuten



1a. Experimente mit Münzen

1b. Die Quantenwelt ist nicht lokal-realistisch

1c. Was tun damit? -> Erzeugung sicherer Zufallszahlen

1d. In was für einer verrückten Welt leben wir, die das ermöglicht?

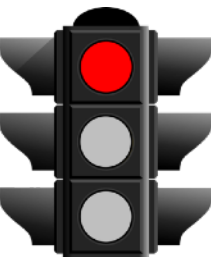
2. Worüber wir uns wundern — und was mich antreibt



2a. Vielleicht stellen wir die falschen Fragen

2b. Der **Blick von innen**: “*was passiert mit mir als nächstes?*”

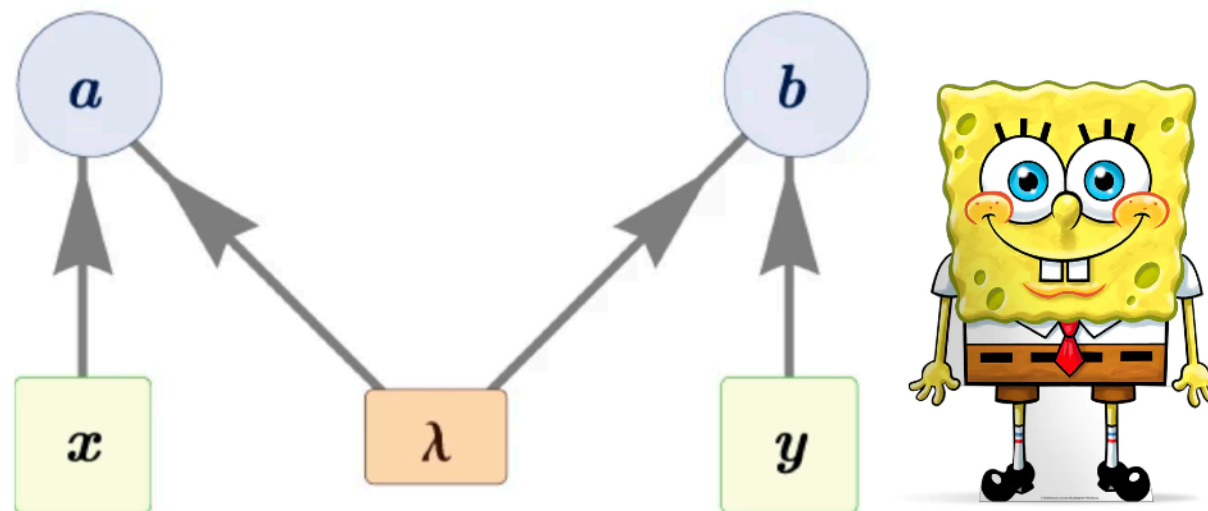
2c. Die Suche nach einer modernen Version des Idealismus



Mathematische Formulierung von "lokalem Realismus"

Mathematische Formulierung von "lokalem Realismus"

$$P(a, b|x, y) = \int_{\Lambda} P(a|x, \lambda)P(b|y, \lambda) d\mu(\lambda)$$



aus: Polino et al., Nat. Commun. **14**, 909 (2023)

Mathematische Formulierung von "lokalem Realismus"

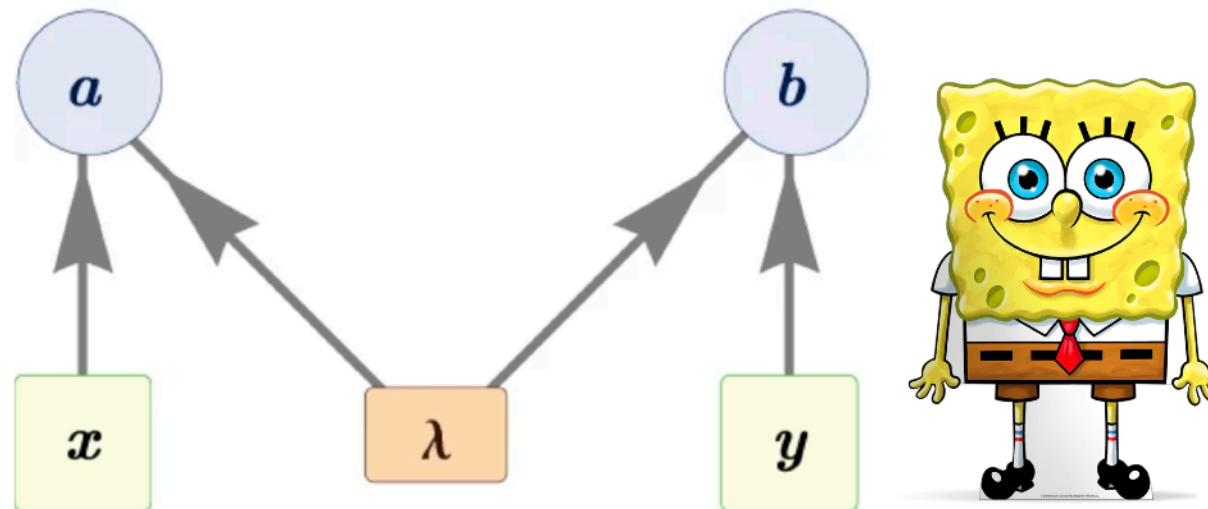
$$P(a, b|x, y) = \int_{\Lambda} P(a|x, \lambda) P(b|y, \lambda) d\mu(\lambda)$$

Alices
Ergebnis

Alices
Münzwurf

Bobs
Münzwurf

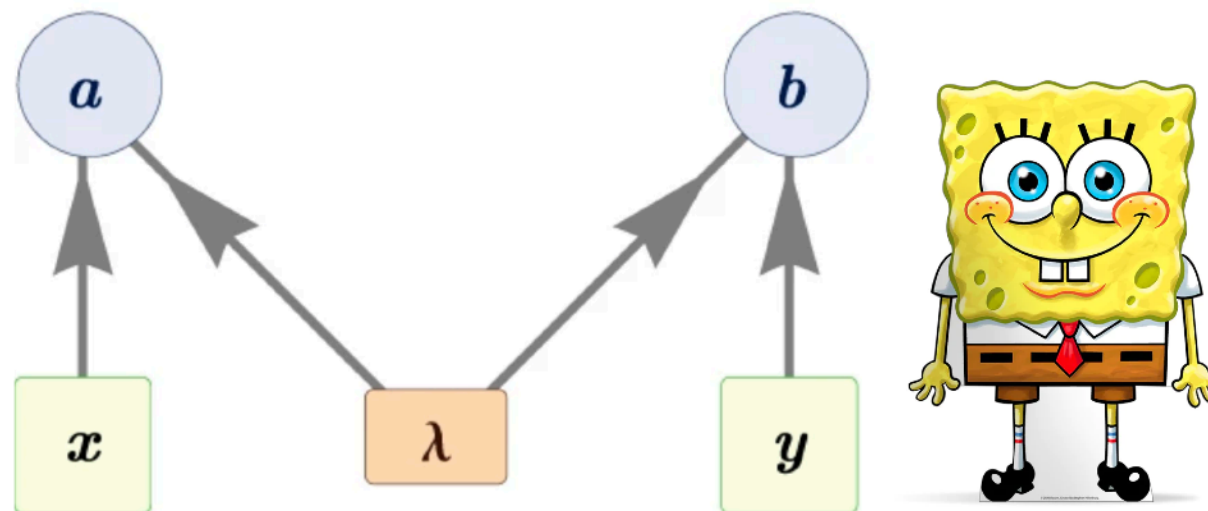
Bobs
Ergebnis



Mathematische Formulierung von "lokalem Realismus"

$$P(a, b|x, y) = \int_{\Lambda} P(a|x, \lambda)P(b|y, \lambda) d\mu(\lambda)$$

↑
"Versteckte Variable":
alles, das vorher zu Alice
und Bob gegangen ist
(Strategie, Luftmoleküle);
"gemeinsame Ursache".

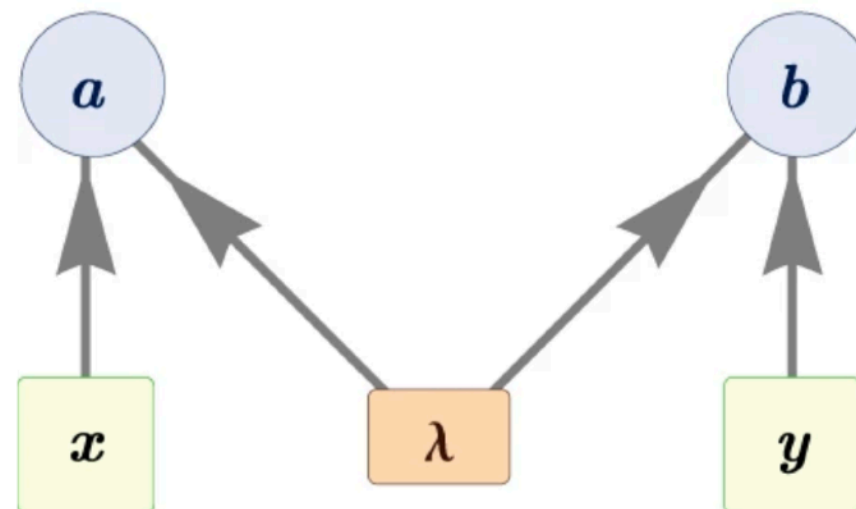


Mathematische Formulierung von "lokalem Realismus"

$$P(a, b|x, y) = \int_{\Lambda} P(a|x, \lambda) P(b|y, \lambda) d\mu(\lambda)$$

statistisches Mittel über
alle möglichen Werte

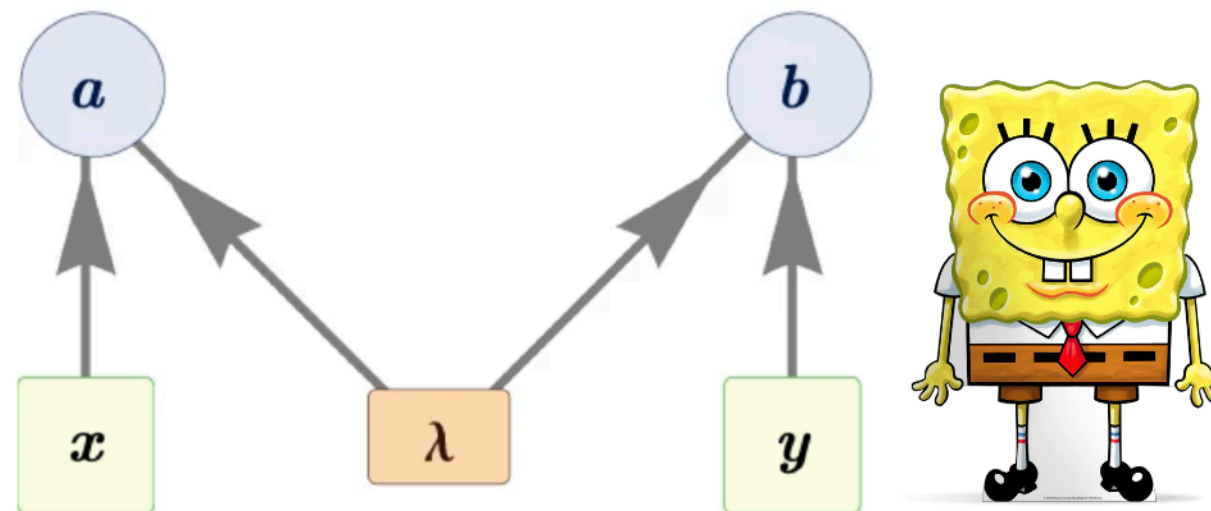
"Versteckte Variable":
alles, das vorher zu Alice
und Bob gegangen ist
(Strategie, Luftmoleküle);
"gemeinsame Ursache".



Mathematische Formulierung von "lokalem Realismus"

$$P(a, b|x, y) = \int_{\Lambda} P(a|x, \lambda) P(b|y, \lambda) d\mu(\lambda)$$

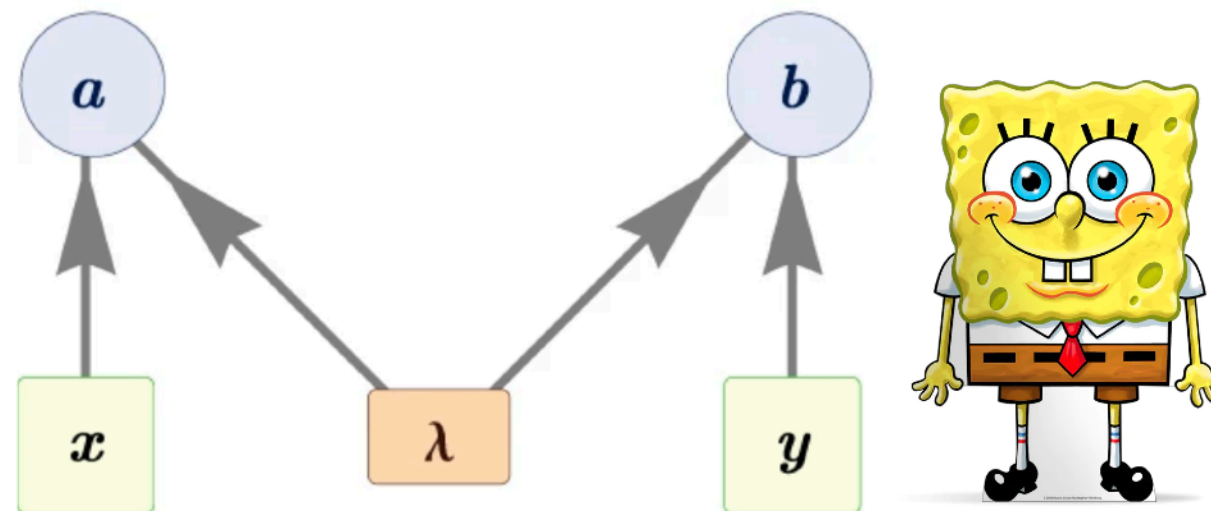
Alices Ergebnis (a) hängt nur von **ihrem** Münzresultat (x) und den versteckten Variablen ab.



Mathematische Formulierung von "lokalem Realismus"

$$P(a, b|x, y) = \int_{\Lambda} P(a|x, \lambda) P(b|y, \lambda) d\mu(\lambda)$$

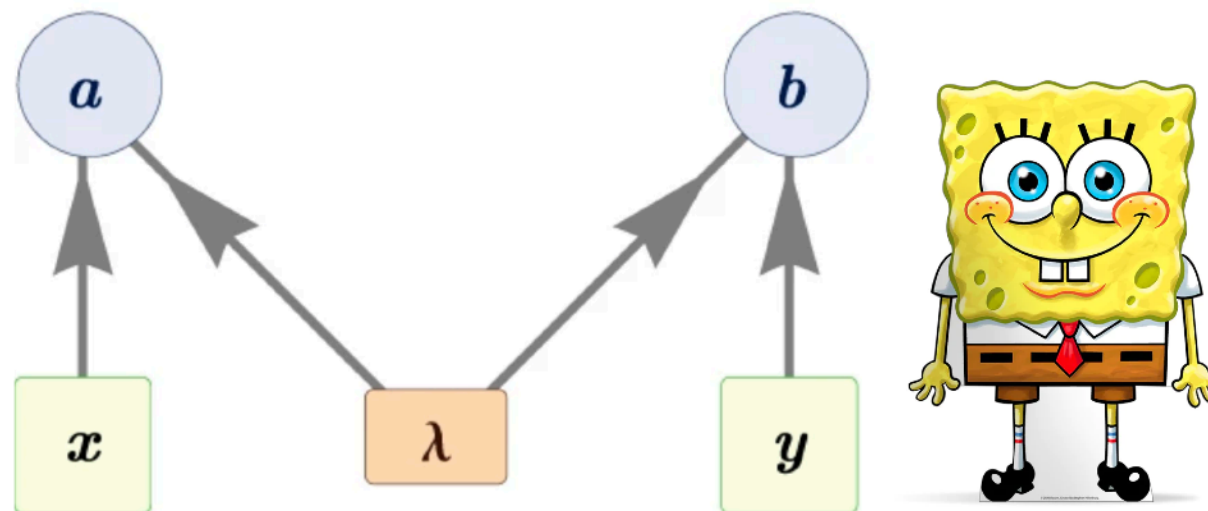
Bobs Ergebnis (b) hängt nur von **seinem** Münzresultat (y) und den versteckten Variablen ab.



Mathematische Formulierung von "lokalem Realismus"

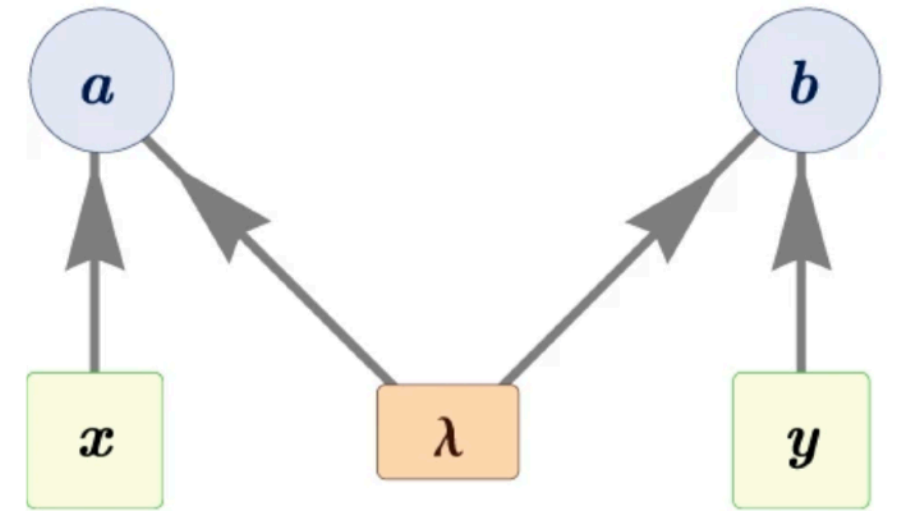
$$P(a, b|x, y) = \int_{\Lambda} P(a|x, \lambda)P(b|y, \lambda) d\mu(\lambda)$$

Die Ergebnisse sind statistisch unabhängig, gegeben die Münzresultate und versteckten Variablen.



Mathematische Formulierung von "lokalem Realismus"

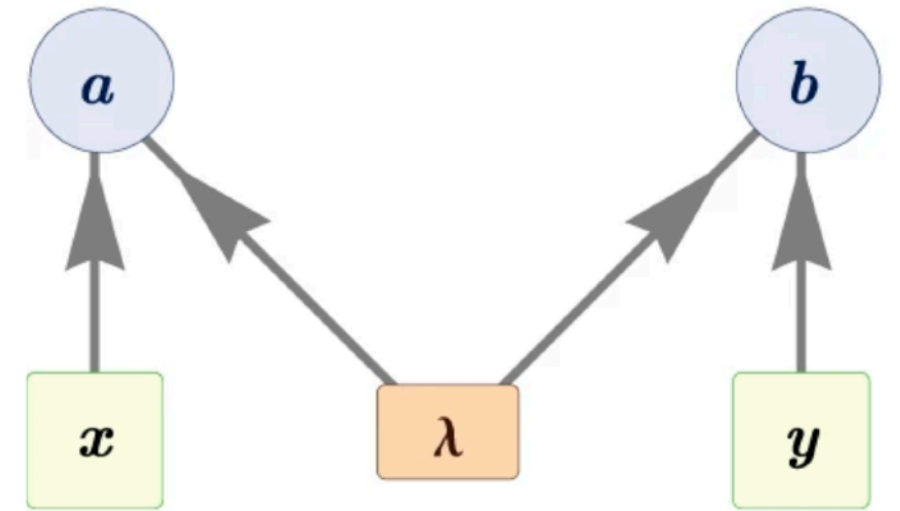
$$P(a, b|x, y) = \int_{\Lambda} P(a|x, \lambda)P(b|y, \lambda) d\mu(\lambda)$$



Mathematische Formulierung von "lokalem Realismus"

$$P(a, b|x, y) = \int_{\Lambda} P(a|x, \lambda)P(b|y, \lambda) d\mu(\lambda)$$

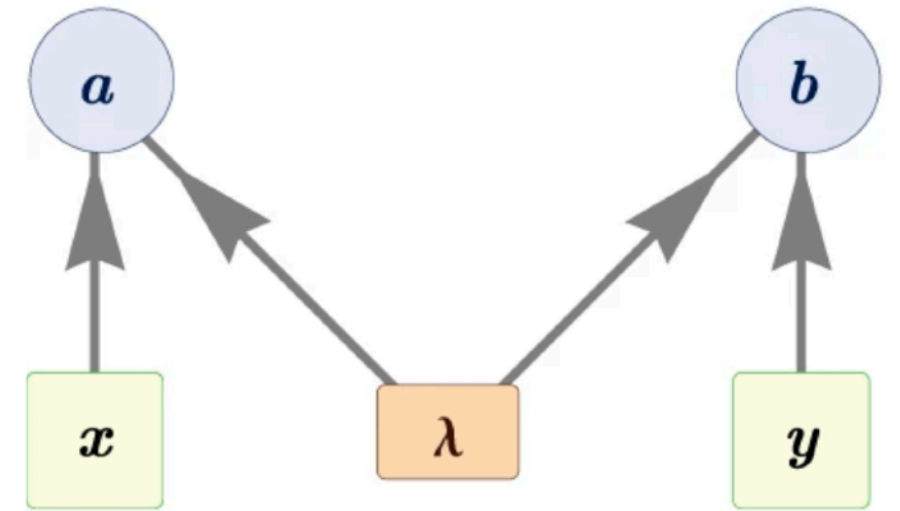
- **Lokalität:** für jeden festen Wert von λ sind die Ergebnisse a und b statistisch unabhängig.
- **Realismus:** insbesondere der Wert von λ steht schon *vor* den Messungen fest (und wird nicht erst durch die Messungen erzeugt etc.)



Mathematische Formulierung von “lokalem Realismus”

$$P(a, b|x, y) = \int_{\Lambda} P(a|x, \lambda)P(b|y, \lambda) d\mu(\lambda)$$

- **Lokalität:** für jeden festen Wert von λ sind die Ergebnisse a und b statistisch unabhängig.
- **Realismus:** insbesondere der Wert von λ steht schon *vor* den Messungen fest (und wird nicht erst durch die Messungen erzeugt etc.)

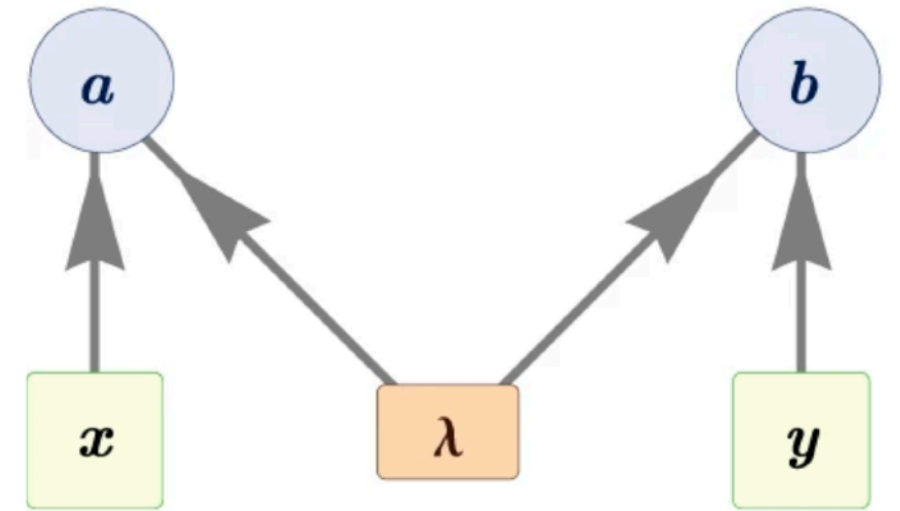


Klar definiert ist eigentlich nur die Kombination **beider** Annahmen. Jeder versteht unter “Realismus” etwas anderes.

Mathematische Formulierung von "lokalem Realismus"

$$P(a, b|x, y) = \int_{\Lambda} P(a|x, \lambda)P(b|y, \lambda) d\mu(\lambda)$$

- **Lokalität:** für jeden festen Wert von λ sind die Ergebnisse a und b statistisch unabhängig.
- **Realismus:** insbesondere der Wert von λ steht schon *vor* den Messungen fest (und wird nicht erst durch die Messungen erzeugt etc.)



Klar definiert ist eigentlich nur die Kombination **beider** Annahmen. Jeder versteht unter "Realismus" etwas anderes.

Gewinnwahrscheinlichkeit

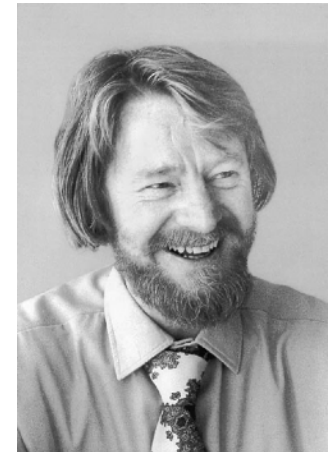
$$\begin{aligned}
 &= \frac{1}{4} (P(+ + |KK) + P(- - |KK) + P(+ + |KZ) + P(- - |KZ) \\
 &\quad + P(+ + |ZK) + P(- - |ZK) + P(+ - |ZZ) + P(- + |ZZ)) \\
 &\leq \frac{3}{4} \quad (\text{mit etwas Mühe}).
 \end{aligned}$$

Gewinnwahrscheinlichkeit in der Quantentheorie

In unserer Alltagswelt gilt **lokaler Realismus**, und daraus folgt:

$$\text{Gewinnwahrscheinlichkeit} \leq \frac{3}{4} \quad (75\%).$$

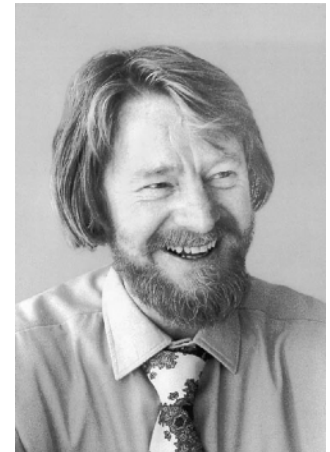
Das ist eine **Bell'sche Ungleichung** (John Bell 1964).



Gewinnwahrscheinlichkeit in der Quantentheorie

In unserer Alltagswelt gilt **lokaler Realismus**, und daraus folgt:

$$\text{Gewinnwahrscheinlichkeit} \leq \frac{3}{4} \quad (75\%).$$



Das ist eine **Bell'sche Ungleichung** (John Bell 1964).

Die Quantenmechanik erlaubt es, das Spiel mit einer Wahrscheinlichkeit von **85%** zu gewinnen.

$$\frac{1}{2} + \frac{1}{2\sqrt{2}} = 0.853553\dots$$

Die (Quanten-)Welt ist also nicht lokal-realistisch!

Wie gewinnt man das Spiel quantenmechanisch 85%ig?

Polarisierende
Brillengläser



Wie gewinnt man das Spiel quantenmechanisch 85%ig?

Polarisierende
Brillengläser

einzelnes
Lichtteilchen
(Photon)



Wie gewinnt man das Spiel quantenmechanisch 85%ig?

Polarisierende
Brillengläser

einzelnes
Lichtteilchen
(Photon)



“klick”?

Ja: **1**

Nein: **0**

Wie gewinnt man das Spiel quantenmechanisch 85%ig?

Polarisierende
Brillengläser



einzelnes
Lichtteilchen
(Photon)

“klick”?

Ja: **1**

Nein: **0**



Falls Zahl (**Z**): lass Brille wie sie ist



Falls Kopf (**K**): drehe Brille um 45°

Wie gewinnt man das Spiel quantenmechanisch 85%ig?

Polarisierende
Brillengläser



einzelnes
Lichtteilchen
(Photon)

“klick”?

Ja: **1**

Nein: **0**

Wir verdoppeln das:
Alice und Bob
je eine “Brille”



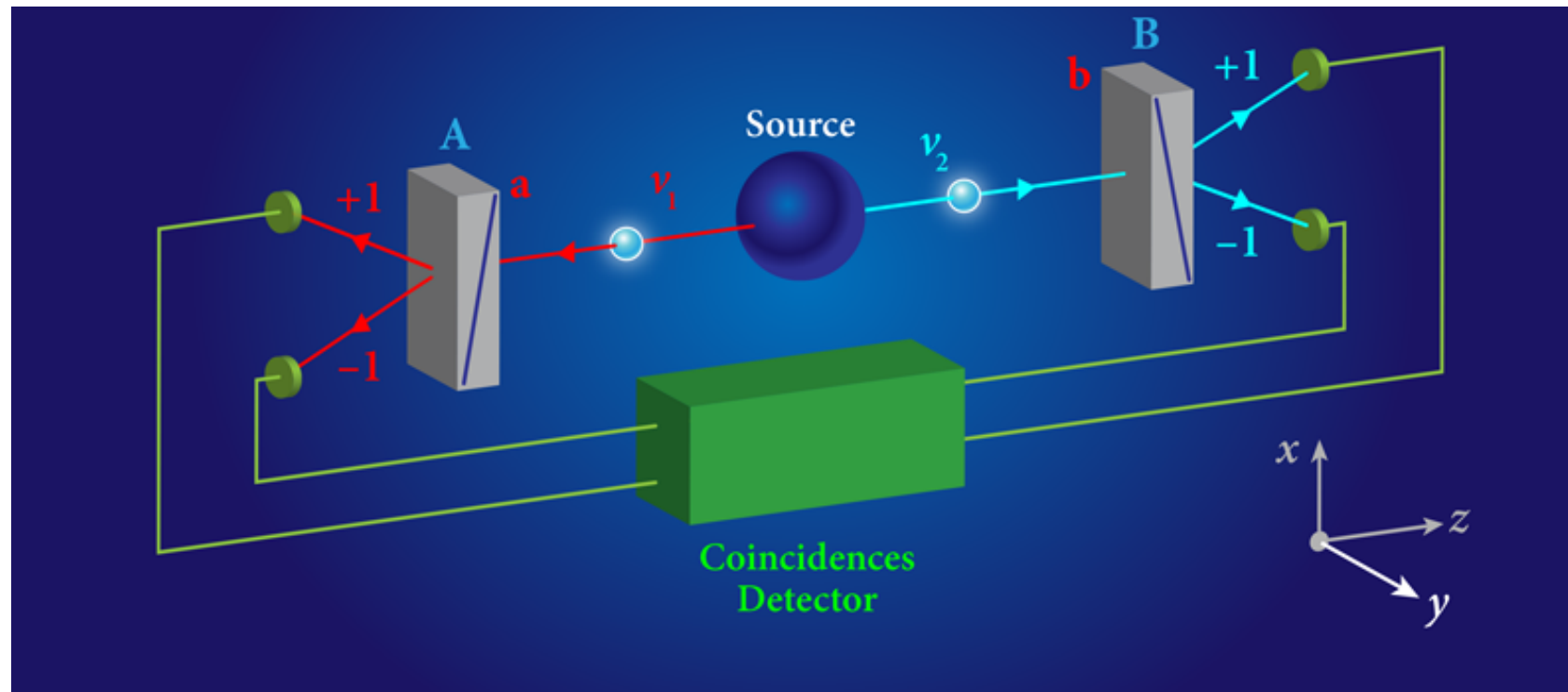
Falls Zahl (**Z**): lass Brille wie sie ist



Falls Kopf (**K**): drehe Brille um 45°

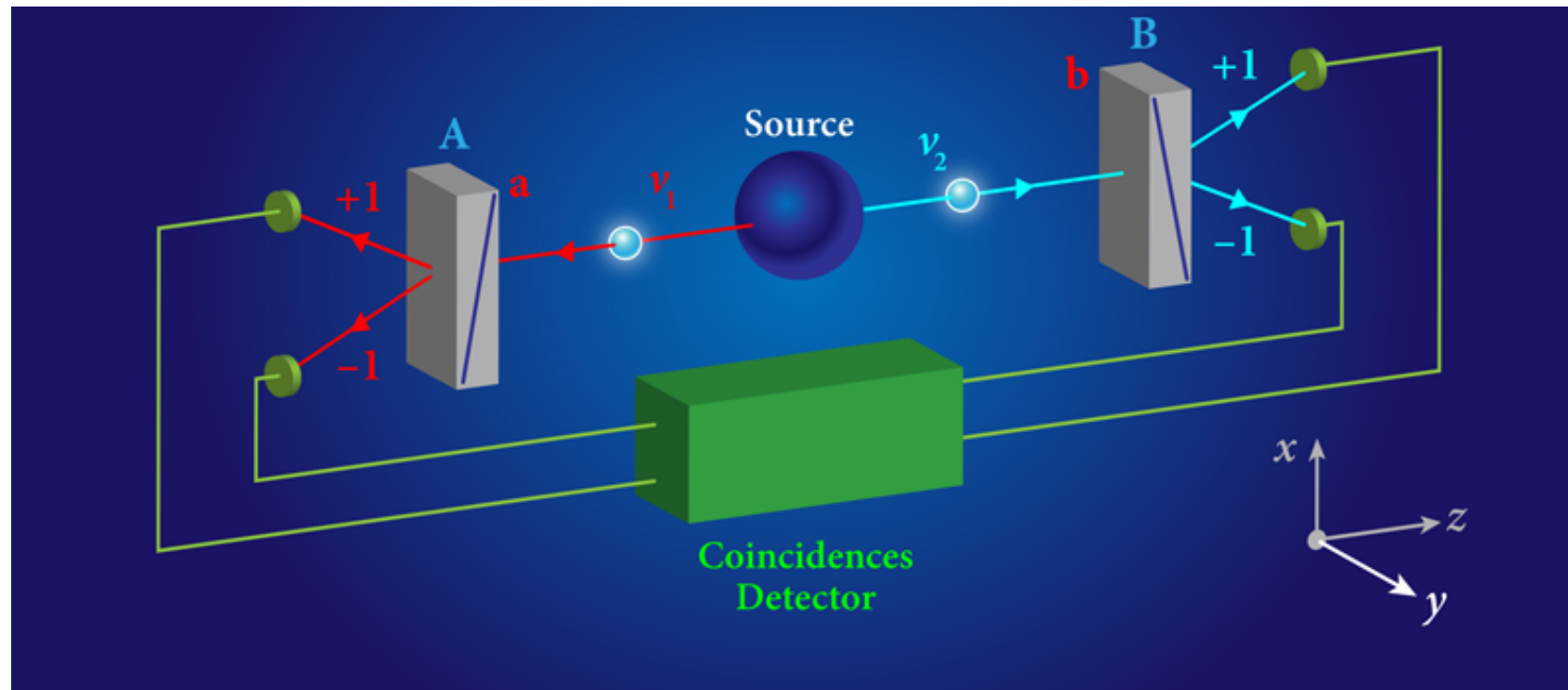
Experimentelle Realisierung

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|HH\rangle + |VV\rangle).$$



Experimentelle Realisierung

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|HH\rangle + |VV\rangle).$$



PRL 115, 250401 (2015)

 Selected for a **Viewpoint** in *Physics*
PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
18 DECEMBER 2015

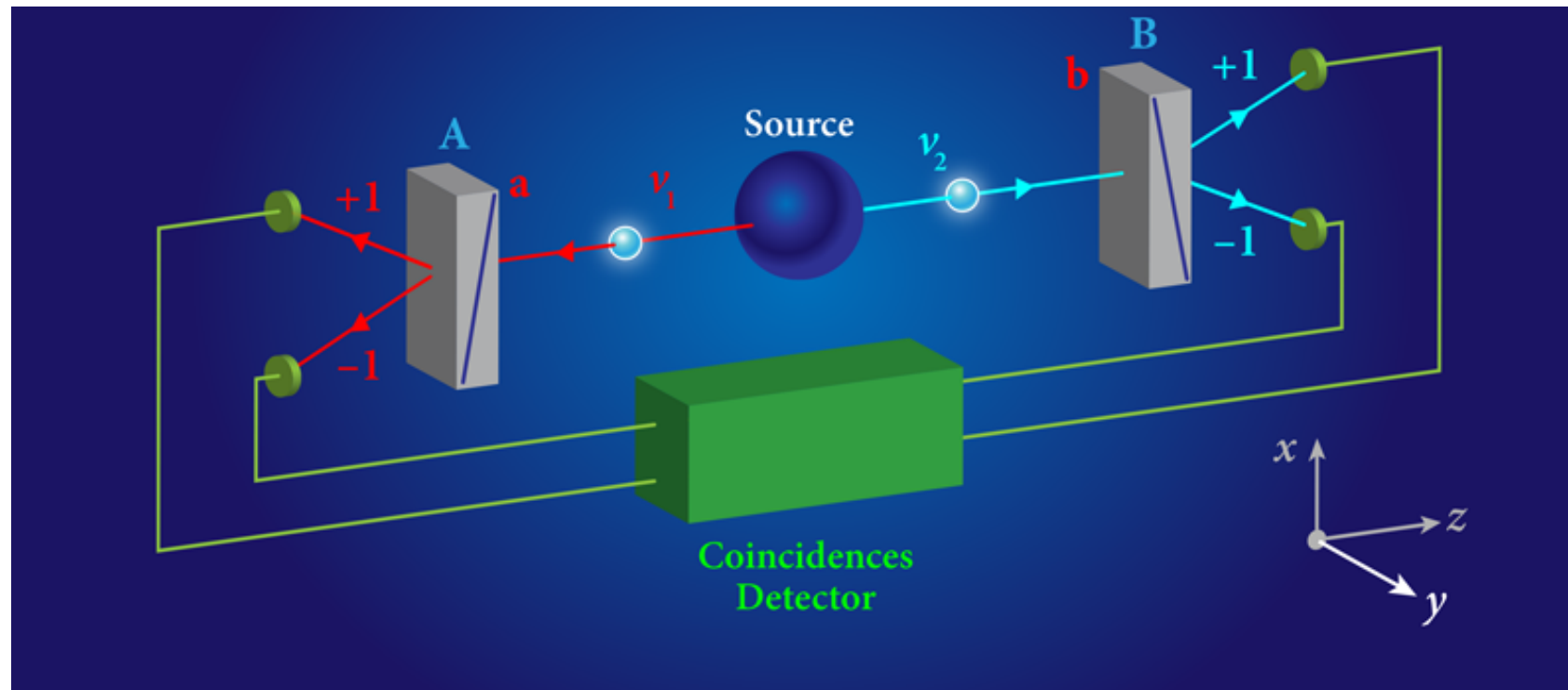


Significant-Loophole-Free Test of Bell's Theorem with Entangled Photons

Marissa Giustina,^{1,2,*} Marijn A. M. Versteegh,^{1,2} Sören Wengerowsky,^{1,2} Johannes Handsteiner,^{1,2} Armin Hochrainer,^{1,2}
Kevin Phelan,¹ Fabian Steinlechner,¹ Johannes Kofler,³ Jan-Åke Larsson,⁴ Carlos Abellán,⁵ Waldimar Amaya,⁵

Experimentelle Realisierung

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|HH\rangle + |VV\rangle).$$



(a)

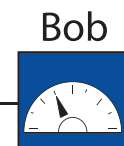


Alice

~29m

Source

~29m



Bob

PRL 115, 250401 (2015)

Selected for a **Viewpoint** in *Physics*
 PHYSICAL REVIEW LETTERS

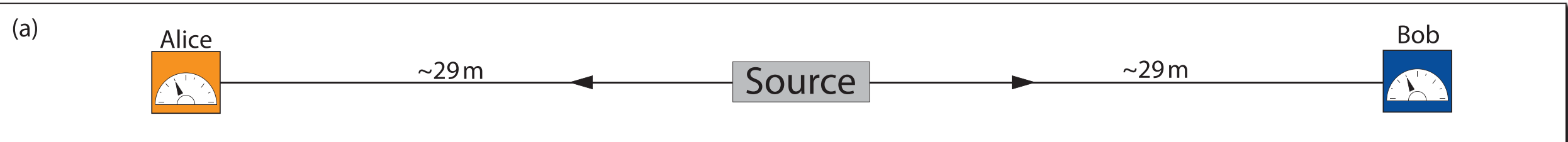
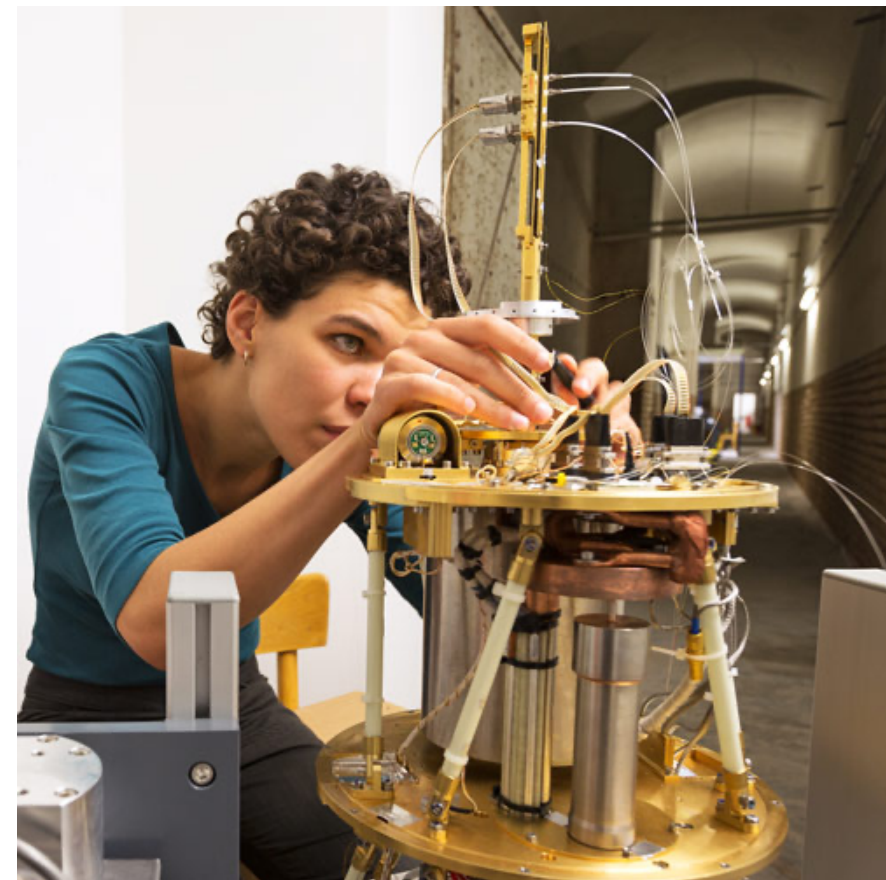
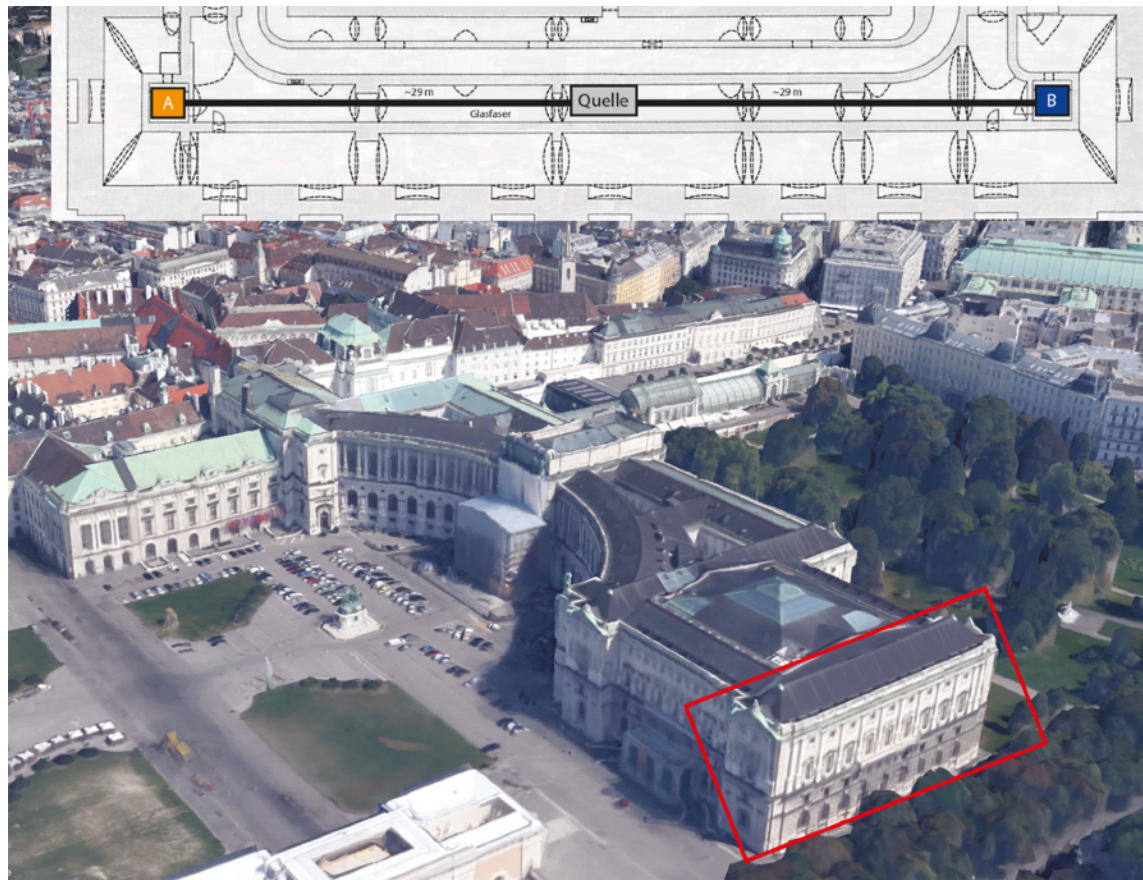
week ending
 18 DECEMBER 2015



Significant-Loophole-Free Test of Bell's Theorem with Entangled Photons

Marissa Giustina,^{1,2,*} Marijn A. M. Versteegh,^{1,2} Sören Wengerowsky,^{1,2} Johannes Handsteiner,^{1,2} Armin Hochrainer,^{1,2}
 Kevin Phelan,¹ Fabian Steinlechner,¹ Johannes Kofler,³ Jan-Åke Larsson,⁴ Carlos Abellán,⁵ Waldimar Amaya,⁵

Experimentelle Realisierung



PRL **115**, 250401 (2015)

Selected for a **Viewpoint** in *Physics*
 PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
 18 DECEMBER 2015



Significant-Loophole-Free Test of Bell's Theorem with Entangled Photons

Marissa Giustina,^{1,2,*} Marijn A. M. Versteegh,^{1,2} Sören Wengerowsky,^{1,2} Johannes Handsteiner,^{1,2} Armin Hochrainer,^{1,2}
 Kevin Phelan,¹ Fabian Steinlechner,¹ Johannes Kofler,³ Jan-Åke Larsson,⁴ Carlos Abellán,⁵ Waldimar Amaya,⁵

Theoretische Beschreibung

Theoretische Beschreibung

Lokalität und Realismus würden bedeuten:

$$P(a, b|x, y) = \int_{\Lambda} P(a|x, \lambda)P(b|y, \lambda) d\mu(\lambda)$$

Theoretische Beschreibung

Lokalität und Realismus würden bedeuten:

$$P(a, b|x, y) = \int_{\Lambda} P(a|x, \lambda)P(b|y, \lambda) d\mu(\lambda)$$

⇒ Gewinnwahrscheinlichkeit (Spiel 3) **höchstens 75%**.

Theoretische Beschreibung

Lokalität und Realismus würden bedeuten:

$$P(a, b|x, y) = \int_{\Lambda} P(a|x, \lambda) P(b|y, \lambda) d\mu(\lambda)$$

⇒ Gewinnwahrscheinlichkeit (Spiel 3) **höchstens 75%**.

Die quantenmechanische Rechenregel ist eine andere:

$$P(a, b|x, y) = \langle \psi | \hat{P}_{a|x} \otimes \hat{P}_{b|y} | \psi \rangle$$

Theoretische Beschreibung

Lokalität und Realismus würden bedeuten:

$$P(a, b|x, y) = \int_{\Lambda} P(a|x, \lambda) P(b|y, \lambda) d\mu(\lambda)$$

⇒ Gewinnwahrscheinlichkeit (Spiel 3) **höchstens 75%**.

Die quantenmechanische Rechenregel ist eine andere:

$$P(a, b|x, y) = \langle \psi | \hat{P}_{a|x} \otimes \hat{P}_{b|y} | \psi \rangle$$

Quantenzustand
des Photonenpaars

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|HH\rangle + |VV\rangle).$$

Theoretische Beschreibung

Lokalität und Realismus würden bedeuten:

$$P(a, b|x, y) = \int_{\Lambda} P(a|x, \lambda) P(b|y, \lambda) d\mu(\lambda)$$

⇒ Gewinnwahrscheinlichkeit (Spiel 3) **höchstens 75%**.

Die quantenmechanische Rechenregel ist eine andere:

$$P(a, b|x, y) = \langle \psi | \hat{P}_{a|x} \otimes \hat{P}_{b|y} | \psi \rangle$$

Messung, die
Alice ausführt

Messung, die
Bob ausführt

Theoretische Beschreibung

Lokalität und Realismus würden bedeuten:

$$P(a, b|x, y) = \int_{\Lambda} P(a|x, \lambda) P(b|y, \lambda) d\mu(\lambda)$$

⇒ Gewinnwahrscheinlichkeit (Spiel 3) **höchstens 75%**.

Die quantenmechanische Rechenregel ist eine andere:

$$P(a, b|x, y) = \langle \psi | \hat{P}_{a|x} \otimes \hat{P}_{b|y} | \psi \rangle$$

Für bestimmte Wahlen von ψ und den \hat{P} erhält man eine Wahrscheinlichkeitstabelle $P(a, b|x, y)$, die zu einer Gewinnwahrscheinlichkeit von **85%** ($>3/4$) führt!

Theoretische Beschreibung

Lokalität und Realismus würden bedeuten:

$$P(a, b|x, y) = \int_{\Lambda} P(a|x, \lambda) P(b|y, \lambda) d\mu(\lambda)$$

⇒ Gewinnwahrscheinlichkeit (Spiel 3) **höchstens 75%**.

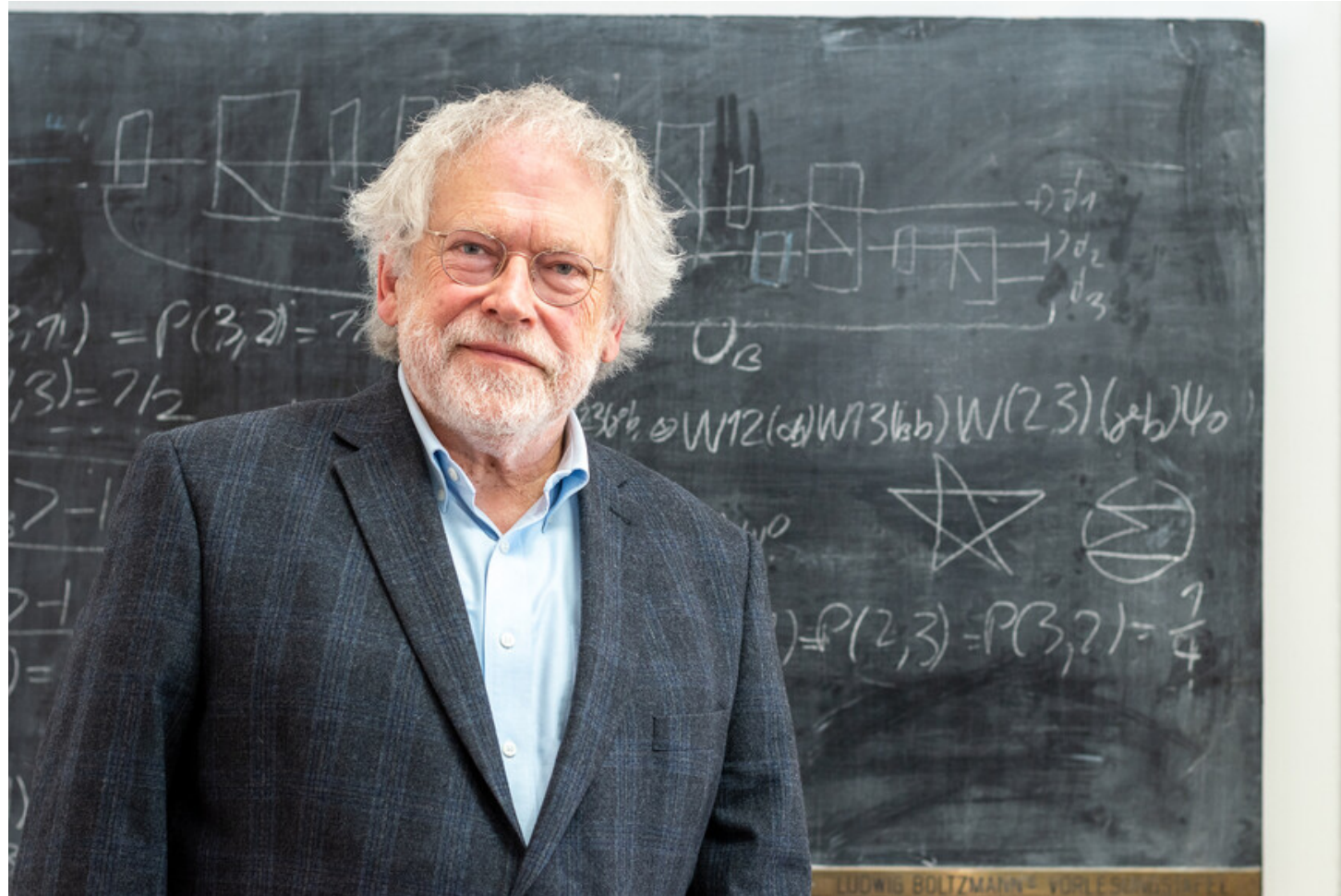
Die quantenmechanische Rechenregel ist eine andere:

$$P(a, b|x, y) = \langle \psi | \hat{P}_{a|x} \otimes \hat{P}_{b|y} | \psi \rangle$$

Für bestimmte Wahlen von ψ und den \hat{P} erhält man eine Wahrscheinlichkeitstabelle $P(a, b|x, y)$, die zu einer Gewinnwahrscheinlichkeit von **85%** ($>3/4$) führt!

Solche Zustände und Messungen wurden in dem genannten Experiment realisiert. **Verletzung von lokalem Realismus.**

Nobelpreis für Physik 2022: Anton Zeilinger...



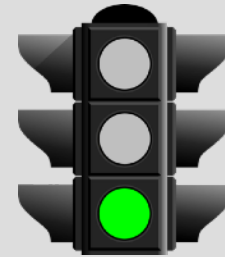
Anton Zeilinger

“... für Experimente mit verschränkten Photonen, die den Nachweis der Verletzung Bell’scher Ungleichungen erlaubten und wegweisend für die Quanteninformationswissenschaften waren.”

Die Welt ist nicht lokal-realistisch.

0. Kurze Vorstellung

1. Was wir wissen und vermuten



1a. Experimente mit Münzen

1b. Die Quantenwelt ist nicht lokal-realistisch

1c. Was tun damit? -> Erzeugung sicherer Zufallszahlen

1d. In was für einer verrückten Welt leben wir, die das ermöglicht?

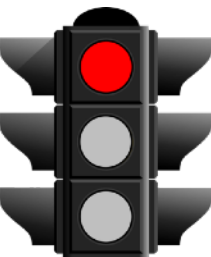
2. Worüber wir uns wundern — und was mich antreibt



2a. Vielleicht stellen wir die falschen Fragen

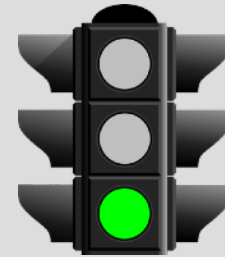
2b. Der **Blick von innen**: “*was passiert mit mir als nächstes?*”

2c. Die Suche nach einer modernen Version des Idealismus



0. Kurze Vorstellung

1. Was wir wissen und vermuten



1a. Experimente mit Münzen

1b. Die Quantenwelt ist **nicht lokal-realistisch**

1c. Was tun damit? -> Erzeugung sicherer Zufallszahlen

1d. In was für einer verrückten Welt leben wir, die das ermöglicht?

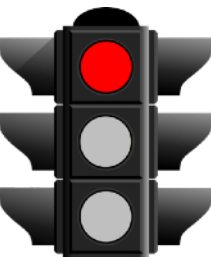
2. Worüber wir uns wundern — und was mich antreibt



2a. Vielleicht stellen wir die falschen Fragen

2b. Der **Blick von innen**: “*was passiert mit mir als nächstes?*”

2c. Die Suche nach einer modernen Version des Idealismus



Anwendung: Erzeugung echter Zufallszahlen



Anwendung: Erzeugung echter Zufallszahlen



Richard Jarecki

Anwendung: Erzeugung echter Zufallszahlen



Richard Jarecki

Ergebnisse sollen nicht nur zufällig aussehen, sondern **grundsätzlich von niemandem** vorhergesagt werden können — selbst von Leuten, die viel mehr über die Geräte wissen als wir!

Anwendung: Erzeugung echter Zufallszahlen



Richard Jarecki

Ergebnisse sollen nicht nur zufällig aussehen, sondern **grundsätzlich von niemandem** vorhergesagt werden können — selbst von Leuten, die viel mehr über die Geräte wissen als wir!

“Device-independent randomness / cryptography”

Anwendung: Erzeugung echter Zufallszahlen

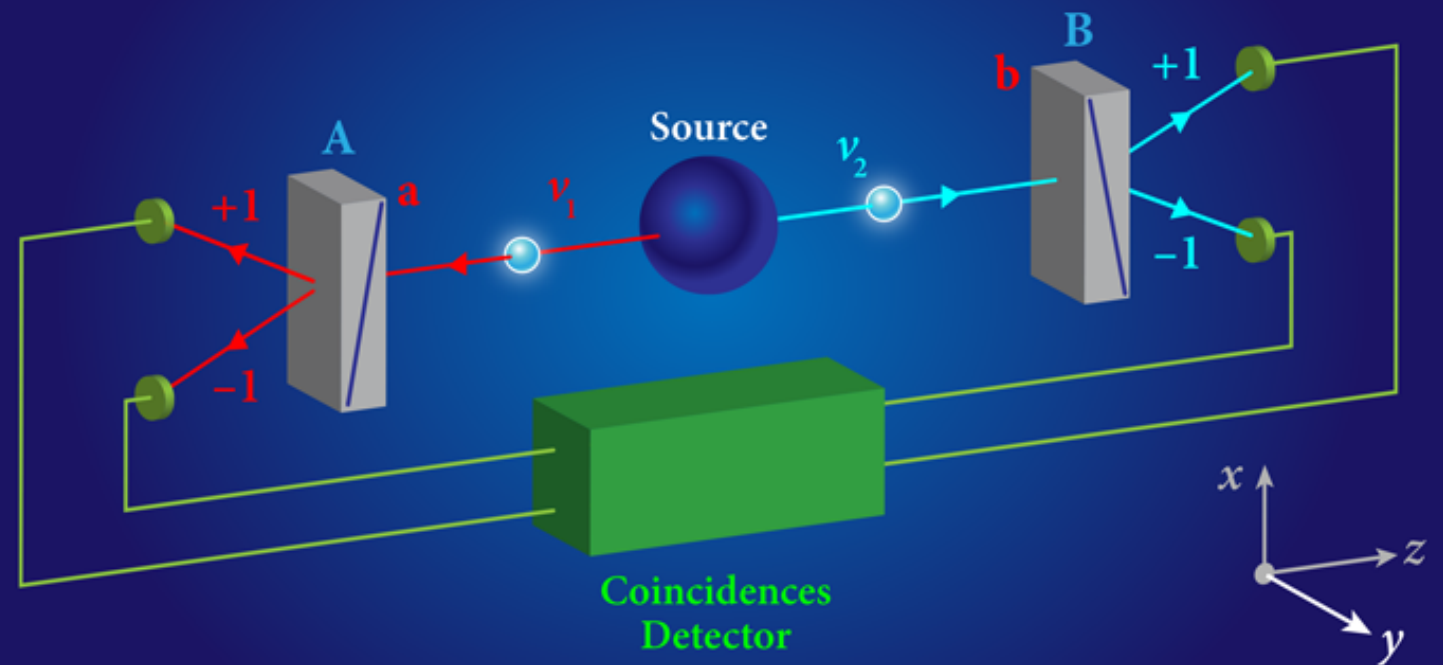
Idee: Spiele das 3. Spiel oft, notiere die Ergebnisse (011010111...) und überprüfe, dass

$$P_{\text{win}} \gg 75\%.$$

Anwendung: Erzeugung echter Zufallszahlen

Idee: Spiele das 3. Spiel oft, notiere die Ergebnisse (011010111...) und überprüfe, dass

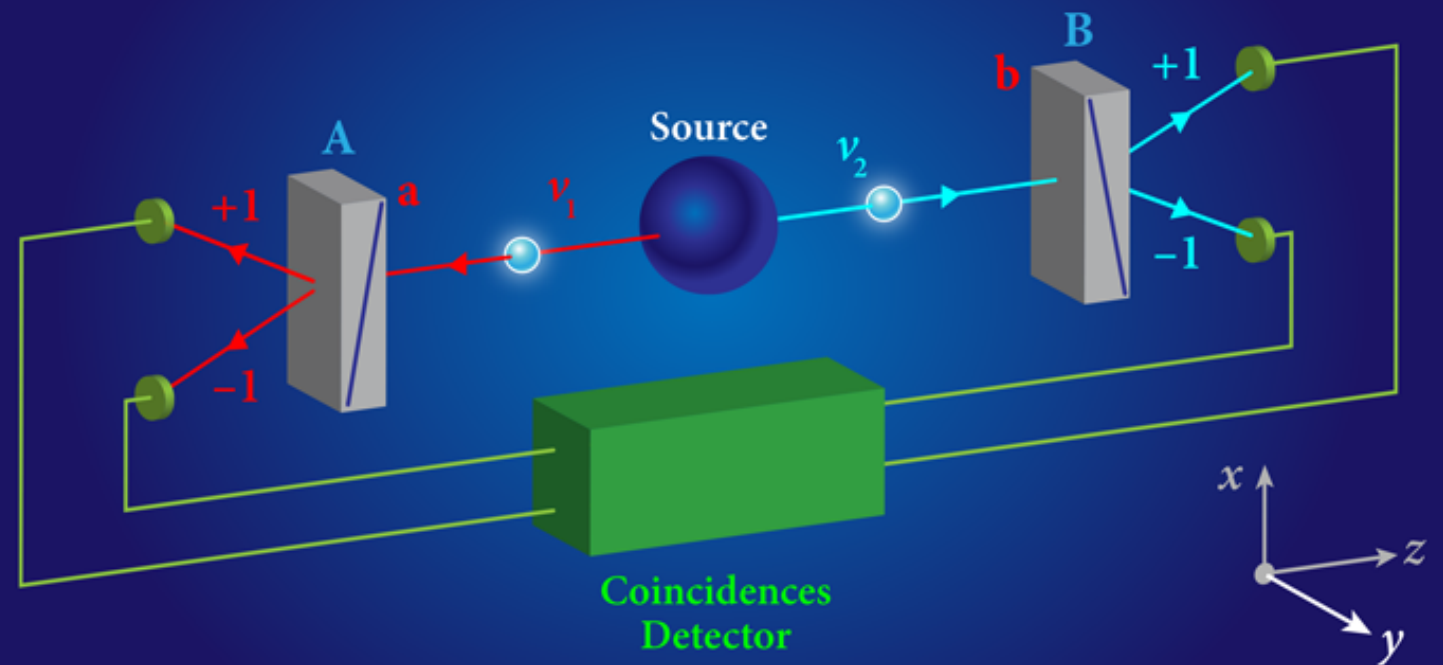
$$P_{\text{win}} \gg 75\%.$$



Anwendung: Erzeugung echter Zufallszahlen

Idee: Spiele das 3. Spiel oft, notiere die Ergebnisse (011010111...) und überprüfe, dass

$$P_{\text{win}} \gg 75\%.$$

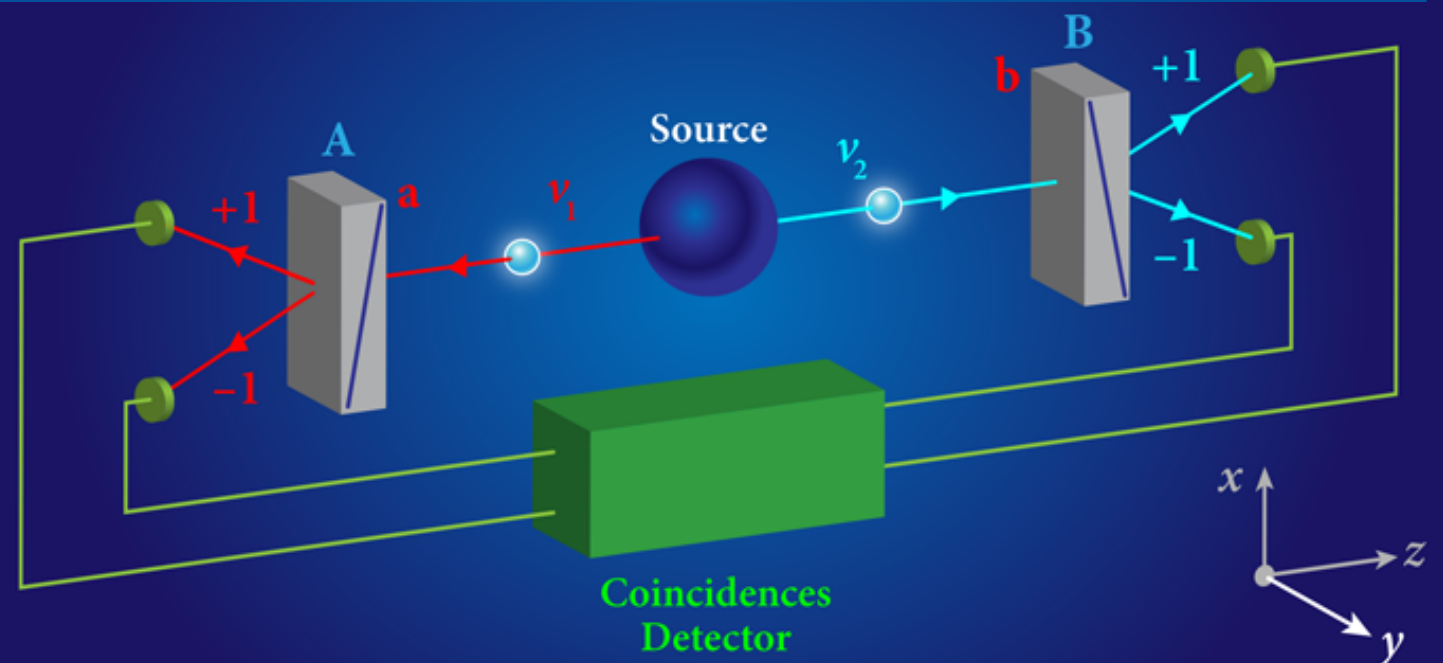


Dann muss lokaler Realismus verletzt gewesen sein.

Anwendung: Erzeugung echter Zufallszahlen

Idee: Spiele das 3. Spiel oft, notiere die Ergebnisse (011010111...) und überprüfe, dass

$$P_{\text{win}} \gg 75\%.$$



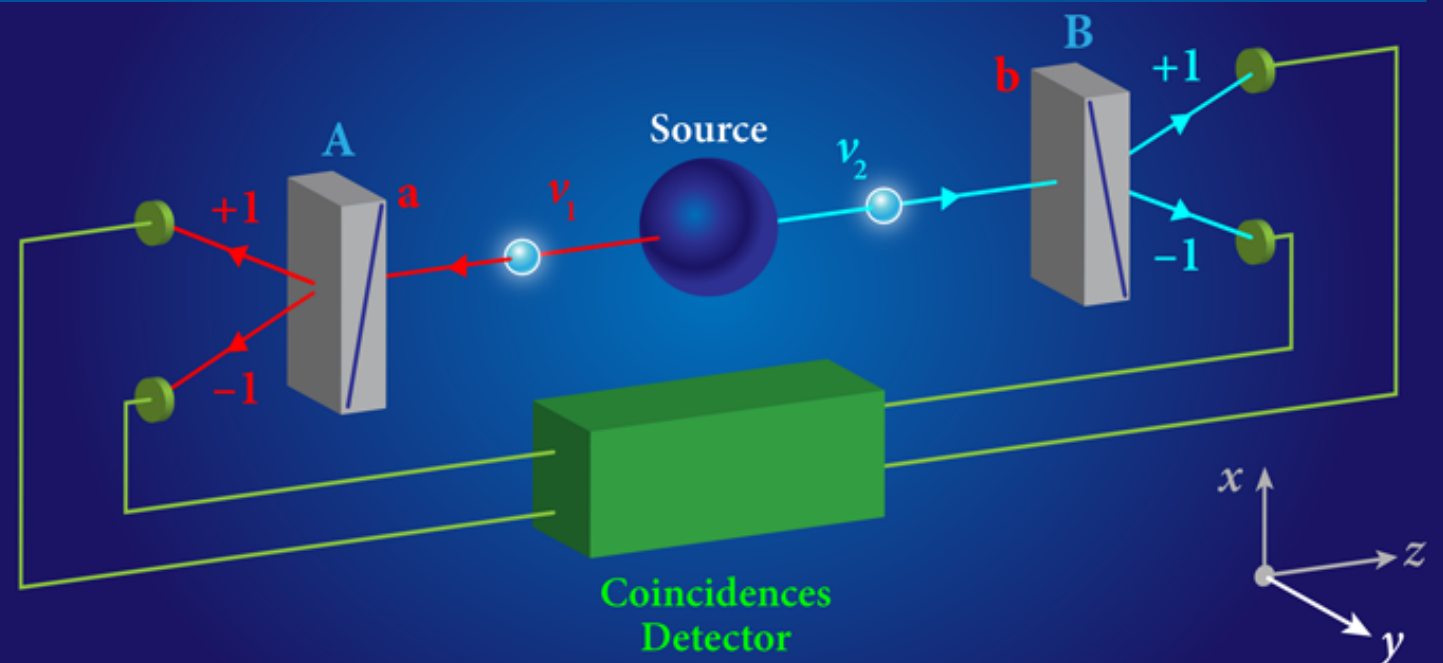
Dann muss lokaler Realismus verletzt gewesen sein.

Sind A und B so weit entfernt, dass kein Lichtsignal schnell genug von A nach B kann (oder umgekehrt), dann muss Lokalität gültig sein (für den Teil der Welt, auf den Physiker/Spieler Zugriff haben).

Anwendung: Erzeugung echter Zufallszahlen

Idee: Spiele das 3. Spiel oft, notiere die Ergebnisse (011010111...) und überprüfe, dass

$$P_{\text{win}} \gg 75\%.$$



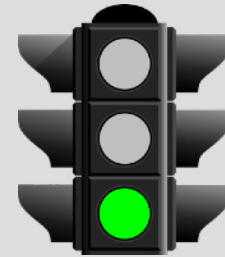
Dann muss lokaler Realismus verletzt gewesen sein.

Sind A und B so weit entfernt, dass kein Lichtsignal schnell genug von A nach B kann (oder umgekehrt), dann muss Lokalität gültig sein (für den Teil der Welt, auf den Physiker/Spieler Zugriff haben).

Also muss Realismus verletzt sein: die Ergebnisse können nicht vorher schon vollständig festgestanden haben, also von solchen Spielern / Physikern auch nicht vollständig vorhergesagt werden.

0. Kurze Vorstellung

1. Was wir wissen und vermuten



1a. Experimente mit Münzen

1b. Die Quantenwelt ist **nicht lokal-realistisch**

1c. Was tun damit? -> Erzeugung sicherer Zufallszahlen

1d. In was für einer verrückten Welt leben wir, die das ermöglicht?

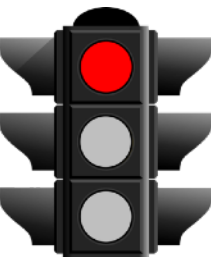
2. Worüber wir uns wundern — und was mich antreibt



2a. Vielleicht stellen wir die falschen Fragen

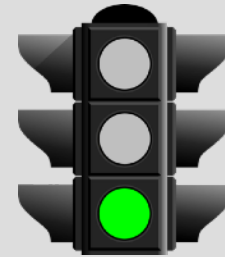
2b. Der **Blick von innen**: “*was passiert mit mir als nächstes?*”

2c. Die Suche nach einer modernen Version des Idealismus



0. Kurze Vorstellung

1. Was wir wissen und vermuten



1a. Experimente mit Münzen

1b. Die Quantenwelt ist **nicht lokal-realistisch**

1c. Was tun damit? -> Erzeugung sicherer Zufallszahlen

1d. In was für einer verrückten Welt leben wir, die das ermöglicht?

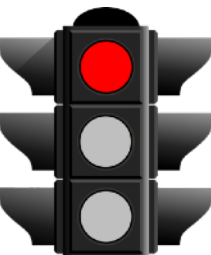
2. Worüber wir uns wundern — und was mich antreibt



2a. Vielleicht stellen wir die falschen Fragen

2b. Der **Blick von innen**: “*was passiert mit mir als nächstes?*”

2c. Die Suche nach einer modernen Version des Idealismus



Was sagt das über unsere Welt?

Die Quantenmechanik erlaubt es, das Spiel mit einer Wahrscheinlichkeit von **85%** zu gewinnen.

$$\frac{1}{2} + \frac{1}{2\sqrt{2}} = 0.853553\dots$$

Die Welt ist also nicht lokal-realistisch!

Wie macht die Natur das nur?

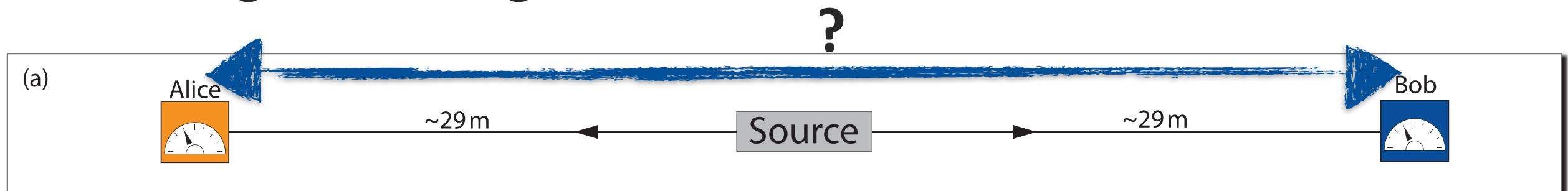
Interpretationen der Quantentheorie

Lokalität und **Realismus** können nicht beide richtig sein.

Lokalität und **Realismus** können nicht beide richtig sein.

- **Option 1: die Welt ist nichtlokal.**

D.h. es gibt versteckten Informationsaustausch mit Überlichtgeschwindigkeit.

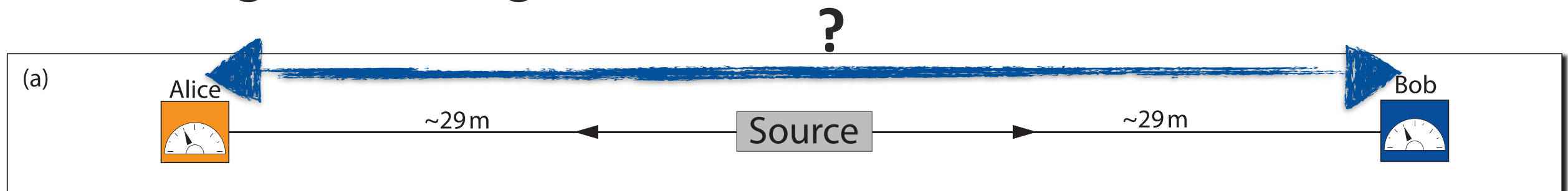


Interpretationen der Quantentheorie

Lokalität und **Realismus** können nicht beide richtig sein.

- **Option 1: die Welt ist nichtlokal.**

D.h. es gibt versteckten Informationsaustausch mit Überlichtgeschwindigkeit.

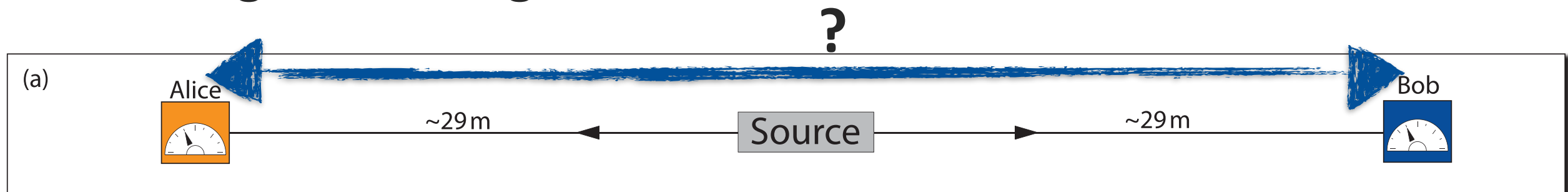


Mögliches Modell: **de Broglie-Bohm Theorie.**

Lokalität und **Realismus** können nicht beide richtig sein.

- **Option 1: die Welt ist nichtlokal.**

D.h. es gibt versteckten Informationsaustausch mit Überlichtgeschwindigkeit.



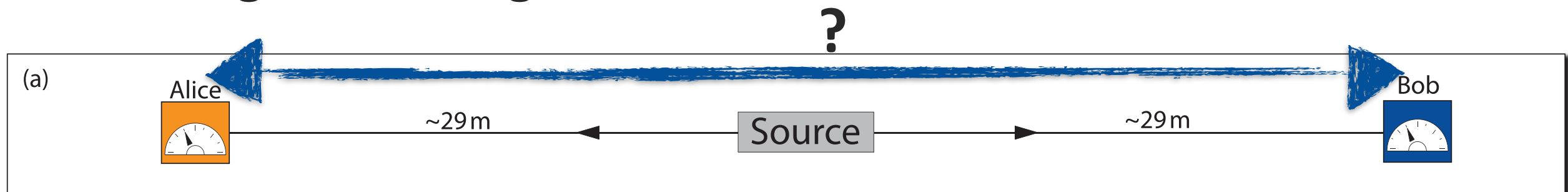
Mögliches Modell: **de Broglie-Bohm Theorie.**

Problem: dann muss das so geschickt vor uns verborgen sein, dass wir es mit keinem Experiment der Welt nutzen können!

Lokalität und **Realismus** können nicht beide richtig sein.

- **Option 1: die Welt ist nichtlokal.**

D.h. es gibt versteckten Informationsaustausch mit Überlichtgeschwindigkeit.



Mögliches Modell: **de Broglie-Bohm Theorie.**

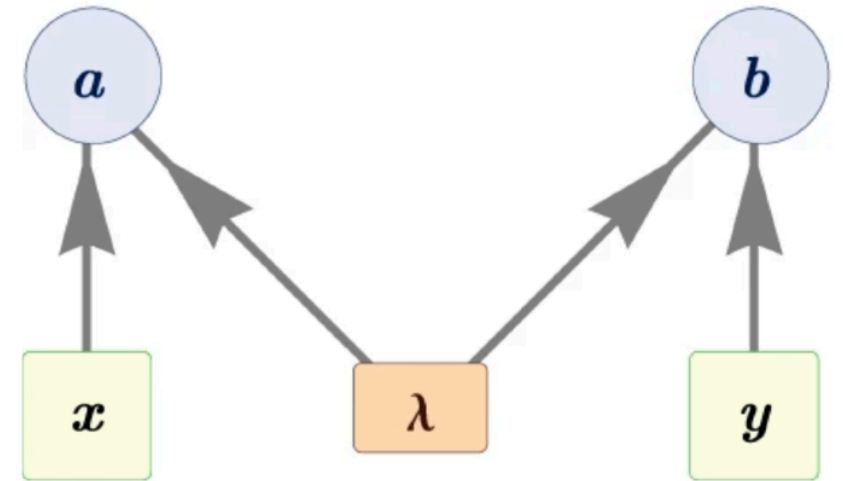
Problem: dann muss das so geschickt vor uns verborgen sein, dass wir es mit keinem Experiment der Welt nutzen können!

No-Communication-Theorem: man kann Verschränkung **nicht** dazu nutzen, Information (überlichtschnell) zu übertragen.

Wie beweist man das?

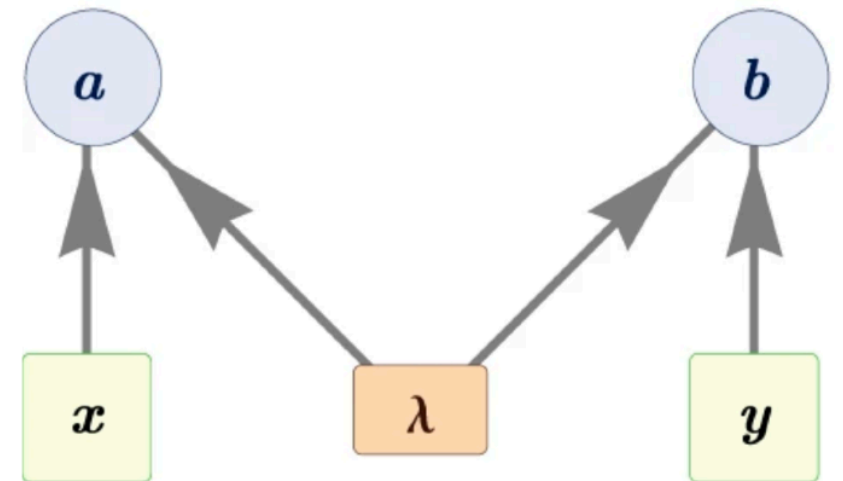
No-Communication-Theorem: man kann Verschränkung **nicht** dazu nutzen, Information (überlichtschnell) zu übertragen.

$$P(a, b|x, y) = \langle \psi | \hat{P}_{a|x} \otimes \hat{P}_{b|y} | \psi \rangle$$



Wie beweist man das?

No-Communication-Theorem: man kann Verschränkung **nicht** dazu nutzen, Information (überlichtschnell) zu übertragen.



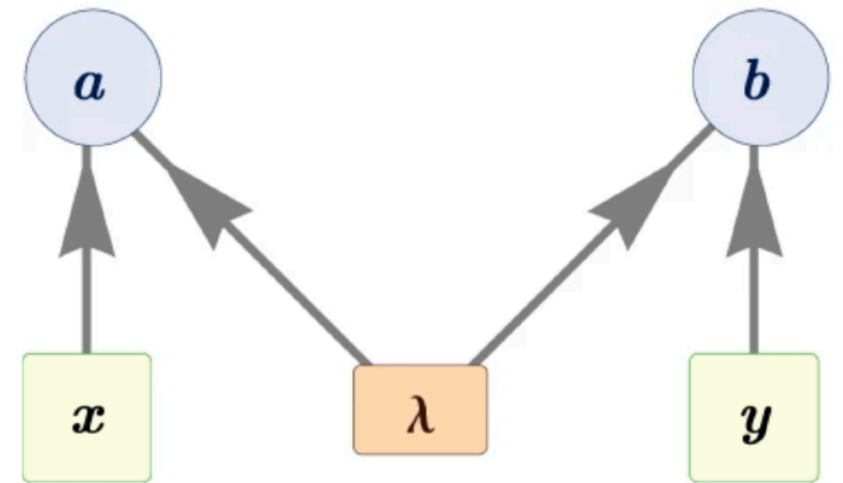
$$P(a, b|x, y) = \langle \psi | \hat{P}_{a|x} \otimes \hat{P}_{b|y} | \psi \rangle$$

Gesetze der Wahrscheinlichkeitstheorie: W'keit, die Alice sieht (ohne Bob):

$$\begin{aligned} P(a|x, y) &= \sum_b P(a, b|x, y) \\ &= \sum_b \langle \psi | \hat{P}_{a|x} \otimes \hat{P}_{b|y} | \psi \rangle \quad (\text{QM}) \end{aligned}$$

Wie beweist man das?

No-Communication-Theorem: man kann Verschränkung **nicht** dazu nutzen, Information (überlichtschnell) zu übertragen.



$$P(a, b|x, y) = \langle \psi | \hat{P}_{a|x} \otimes \hat{P}_{b|y} | \psi \rangle$$

Gesetze der Wahrscheinlichkeitstheorie: W'keit, die Alice sieht (ohne Bob):

$$P(a|x, y) = \sum_b P(a, b|x, y)$$

$$= \sum_b \langle \psi | \hat{P}_{a|x} \otimes \hat{P}_{b|y} | \psi \rangle$$

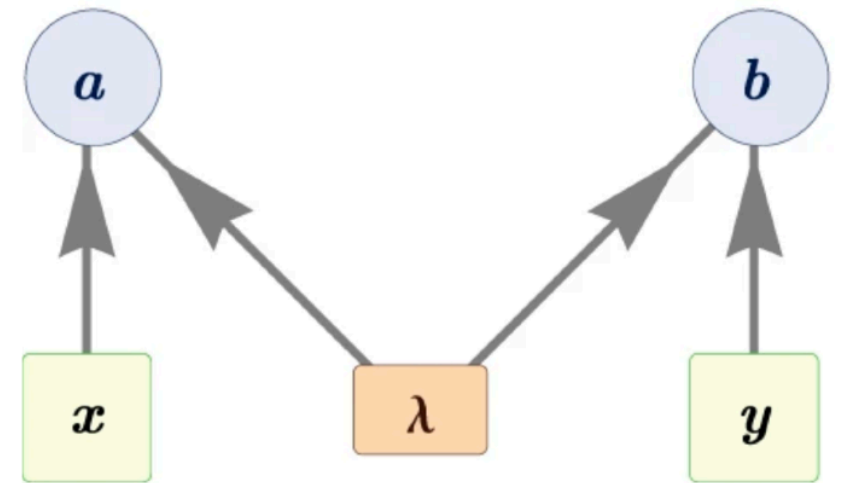
(QM)

$$= \langle \psi | \hat{P}_{a|x} \otimes \left(\sum_b \hat{P}_{b|y} \right) | \psi \rangle$$

(Linearität)

Wie beweist man das?

No-Communication-Theorem: man kann Verschränkung **nicht** dazu nutzen, Information (überlichtschnell) zu übertragen.



$$P(a, b|x, y) = \langle \psi | \hat{P}_{a|x} \otimes \hat{P}_{b|y} | \psi \rangle$$

Gesetze der Wahrscheinlichkeitstheorie: W'keit, die Alice sieht (ohne Bob):

$$P(a|x, y) = \sum_b P(a, b|x, y)$$

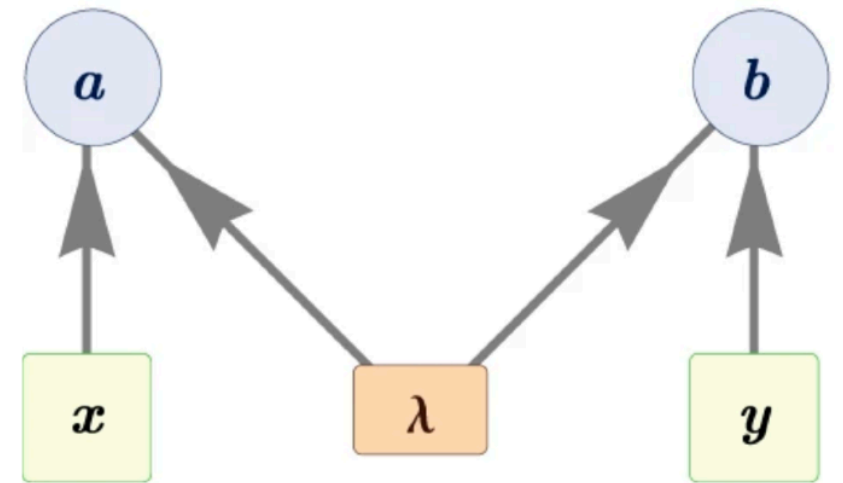
$$= \sum_b \langle \psi | \hat{P}_{a|x} \otimes \hat{P}_{b|y} | \psi \rangle \quad \text{(QM)}$$

$$= \langle \psi | \hat{P}_{a|x} \otimes \left(\sum_b \hat{P}_{b|y} \right) | \psi \rangle \quad \text{(Linearität)}$$

$$= \langle \psi | \hat{P}_{a|x} \otimes \mathbf{1} | \psi \rangle. \quad \text{(Messoperatoren in QM)}$$

Wie beweist man das?

No-Communication-Theorem: man kann Verschränkung **nicht** dazu nutzen, Information (überlichtschnell) zu übertragen.



$$P(a, b|x, y) = \langle \psi | \hat{P}_{a|x} \otimes \hat{P}_{b|y} | \psi \rangle$$

Gesetze der Wahrscheinlichkeitstheorie: W'keit, die Alice sieht (ohne Bob):

$$\begin{aligned} P(a|x, y) &= \sum_b P(a, b|x, y) \\ &= \sum_b \langle \psi | \hat{P}_{a|x} \otimes \hat{P}_{b|y} | \psi \rangle && \text{(QM)} \\ &= \langle \psi | \hat{P}_{a|x} \otimes \left(\sum_b \hat{P}_{b|y} \right) | \psi \rangle && \text{(Linearität)} \\ &= \langle \psi | \hat{P}_{a|x} \otimes \mathbf{1} | \psi \rangle. && \text{(Messoperatoren in QM)} \end{aligned}$$

Das Ergebnis ist **unabhängig** von Bob's Wahl der Messung y .

Lokalität und **Realismus** können nicht beide richtig sein.

- **Option 2: Realismus ist verletzt.**

D.h. Messungen enthüllen nicht bereits vorhandene Ergebnisse, sondern **erzeugen** sie erst.

Lokalität und **Realismus** können nicht beide richtig sein.

- **Option 2: Realismus ist verletzt.**

D.h. Messungen enthüllen nicht bereits vorhandene Ergebnisse, sondern **erzeugen** sie erst.

Asher Peres: “Unperformed experiments have no results.”

Lokalität und **Realismus** können nicht beide richtig sein.

- **Option 2: Realismus ist verletzt.**

D.h. Messungen enthüllen nicht bereits vorhandene Ergebnisse, sondern **erzeugen** sie erst.

Asher Peres: “Unperformed experiments have no results.”

Oder auch: Eigenschaften von Objekten existieren nur **relativ** zu dem, der sie gemessen hat.

Lokalität und **Realismus** können nicht beide richtig sein.

- **Option 2: Realismus ist verletzt.**

D.h. Messungen enthüllen nicht bereits vorhandene Ergebnisse, sondern **erzeugen** sie erst.

Asher Peres: “Unperformed experiments have no results.”

Oder auch: Eigenschaften von Objekten existieren nur **relativ** zu dem, der sie gemessen hat.

Kopenhagen-Interpretation;
Quantum Bayesianism,
Rovelli's Relational QM...

Lokalität und **Realismus** können nicht beide richtig sein.

- **Option 2: Realismus ist verletzt.**

D.h. Messungen enthüllen nicht bereits vorhandene Ergebnisse, sondern **erzeugen** sie erst.

Asher Peres: “Unperformed experiments have no results.”

Oder auch: Eigenschaften von Objekten existieren nur **relativ** zu dem, der sie gemessen hat.

Kopenhagen-Interpretation;
Quantum Bayesianism,
Rovelli's Relational QM...



Ist der Mond da, wenn niemand hinschaut?

Lokalität und **Realismus** können nicht beide richtig sein.

- **Option 3: Der ganze Rahmen, innerhalb dessen wir hier diskutieren (Variablen mit bestimmten Werten / Eigenschaften) ist auf überraschende Weise verletzt.**

Lokalität und **Realismus** können nicht beide richtig sein.

- **Option 3: Der ganze Rahmen, innerhalb dessen wir hier diskutieren (Variablen mit bestimmten Werten / Eigenschaften) ist auf überraschende Weise verletzt.**

THE THEORY OF THE UNIVERSAL WAVE FUNCTION

Hugh Everett, III

I. INTRODUCTION

We begin, as a way of entering our subject, by characterizing a particular interpretation of quantum theory which, although not representative of the more careful formulations of some writers, is the most common form encountered in textbooks and university lectures on the subject.

A physical system is described completely by a state function ψ ,

Lokalität und **Realismus** können nicht beide richtig sein.

- **Option 3: Der ganze Rahmen, innerhalb dessen wir hier diskutieren (Variablen mit bestimmten Werten / Eigenschaften) ist auf überraschende Weise verletzt.**

THE THEORY OF THE UNIVERSAL WAVE FUNCTION

Hugh Everett, III

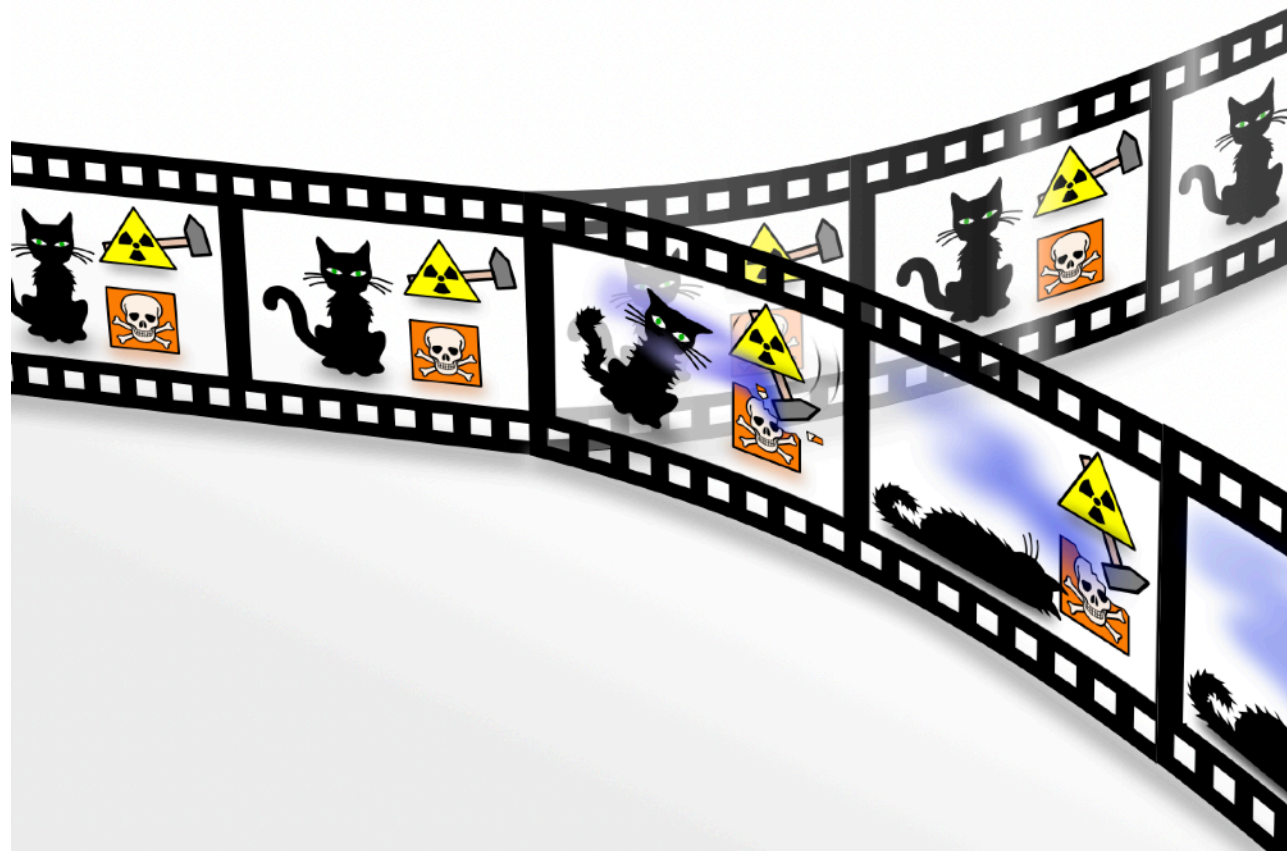
I. INTRODUCTION

We begin, as a way of entering our subject, by characterizing a particular interpretation of quantum theory which, although not representative of the more careful formulations of some writers, is the most common form encountered in textbooks and university lectures on the subject.

A physical system is described completely by a state function ψ ,

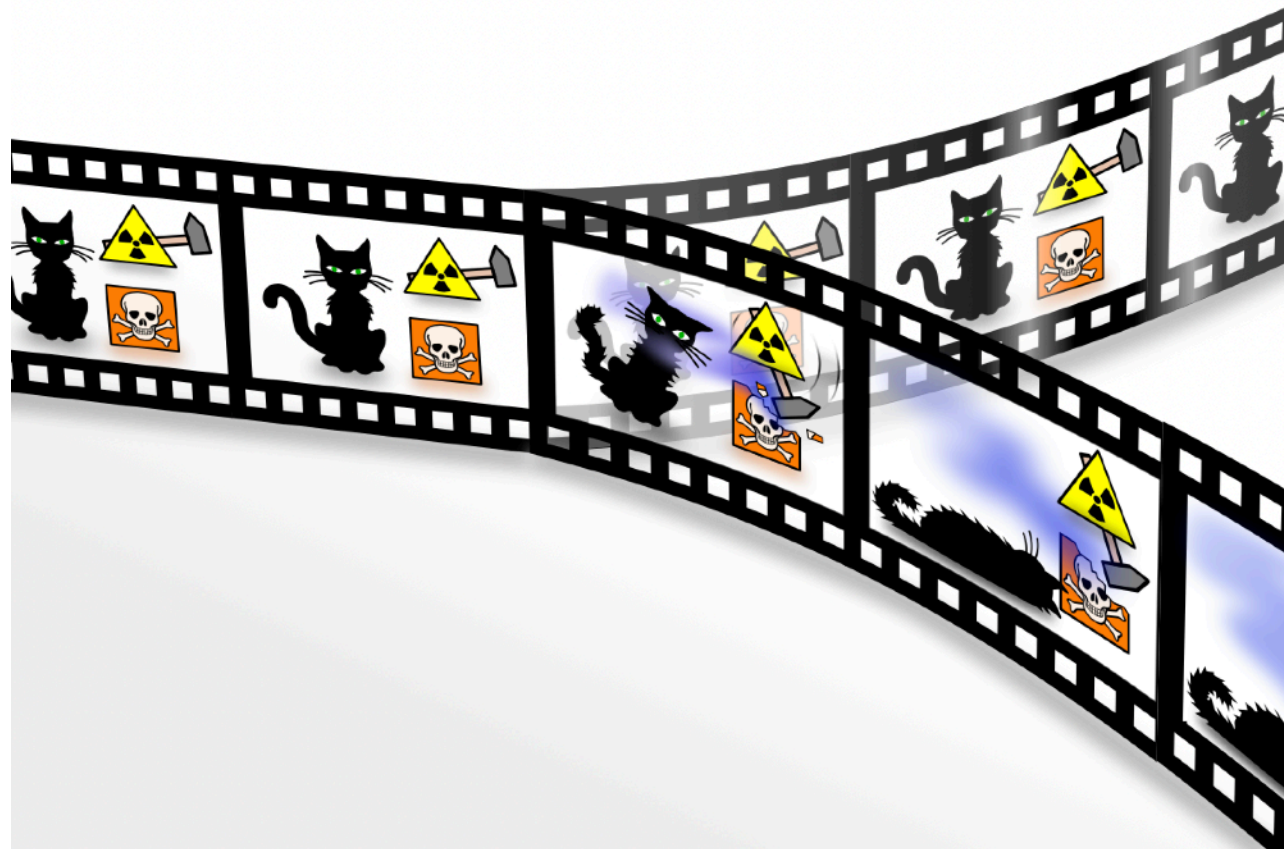
Doktorarbeit von Hugh Everett, 1957: **Viele-Welten-Hypothese.**

Viele-Welten-Interpretation der Quantentheorie



Hugh Everett III (1930-1982)

Viele-Welten-Interpretation der Quantentheorie



Hugh Everett III (1930-1982)

Paul Raymond-Robichaud & Gilles Brassard, 2016:

Article

Parallel Lives: A Local-Realistic Interpretation of “Nonlocal” Boxes *

Gilles Brassard ^{1,2} and Paul Raymond-Robichaud ³

¹ Département d’informatique et de recherche opérationnelle, Université de Montréal;
brassard@iro.umontreal.ca.

² Canadian Institute for Advanced Research, Toronto, Canada.

³ ISI Foundation, Torino, Italy; work done while at (1) above;
paul.r.robichaud@gmail.com.

Wie gewinnt man unser Spiel in vielen Welten?

Parallel Lives: A local realistic interpretation of "nonlocal" boxes

Gilles Brassard and Paul Raymond-Robichaud, Université de Montréal

"What is proved by impossibility proofs is lack of imagination" - John Bell
 "Imagination is more important than knowledge" - Albert Einstein

Abstract:

We show how local realism can be consistent with bipartite correlations that are usually considered to be nonlocal. For this purpose, we conduct a thought experiment in an imaginary world.

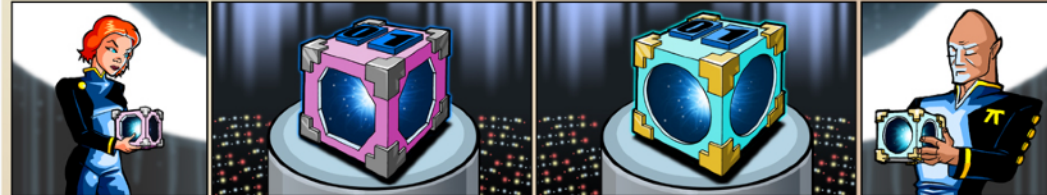
Imaginary World:

Our imaginary world follows the principles of Locality and Realism.

Principle of Locality: No action taken at a point A can have any effect at a point B at a speed faster than light.

Principle of Realism: There is a real world and observations are determined by the state of the real world.

This world has two inhabitants, Alice and Bob, which are each carrying a PR box, introduced by Popescu and Rorhlich.



A PR box has a "0" and a "1" button. Whenever a button is pushed, it instantaneously flashes a red or green light with equal probability. If Alice and Bob both push a button, they will discover when they meet that they have seen different colours precisely when they both have pushed the "1" button.

(Note that the PR box does not enable instantaneous communication between Alice and Bob)

Alice and Bob will test the boxes with this protocol:

They travel far apart in their spaceships. Alice and Bob flip coins and push the corresponding button simultaneously.



Once a button is pushed, the box flashes either a green or red light.

The experiment is performed with sufficient simultaneity that Alice's box cannot know the result of Bob's coin flip (hence the input to Bob's box) before it has to flash its own light, and vice versa.

After many experiments, they meet and realize that the boxes work perfectly.

The Einstein-Podolsky-Rosen Argument:

- Alice's pushing of a button cannot have any instantaneous effect on Bob's system by the principle of Locality.
- After Alice pushes her button, she can know with certainty what colour Bob will see depending on which button he pushes. (For example, if Alice pushes "1" and sees green, she knows that if Bob pushes "0" he will see green)
- Since it is possible for Alice to predict with certainty what light Bob will see when he pushes a button, without influencing his system, it means that his observations were predetermined.
- The observations of Bob should be described by local hidden variables B_0 and B_1 .

$B_0 = 0$ if Bob will observe green after pushing "0"	$B_1 = 0$ if Bob will observe green after pushing "1"
$B_0 = 1$ if Bob will observe red after pushing "0"	$B_1 = 1$ if Bob will observe red after pushing "1"
- Likewise, Alice's system should be described by local hidden variables A_0 and A_1 .

$A_0 = 0$ if Alice will observe green after pushing "0"	$A_1 = 0$ if Alice will observe green after pushing "1"
$A_0 = 1$ if Alice will observe red after pushing "0"	$A_1 = 1$ if Alice will observe red after pushing "1"
- A local hidden variable theory would give a local realistic explanation of this experiment.

Bell's Theorem: Local hidden variable theories can only produce PR boxes that work at most 75% of the time.

Proof: A hidden variable theory of these boxes must satisfy the following 4 equations:

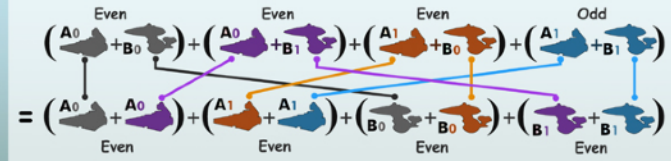
$$A_0 + B_0 = \text{EVEN}$$

$$A_0 + B_1 = \text{EVEN}$$

$$A_1 + B_0 = \text{EVEN}$$

$$A_1 + B_1 = \text{ODD}$$

Summing these equations on both sides and rearranging the terms:



This implies: Even = Odd!

It is not possible for the four equations to be all correct. At least one of the four possible choices of buttons pushed will give incorrect results.

Many people have concluded that any world that could produce PR boxes that work more than 75% of the time cannot be Local and Realistic. Remarkably, quantum mechanics enables PR boxes that work 85% of the time. Must we conclude that quantum mechanics cannot be Local and Realistic?

Here is how the seemingly impossible is accomplished:

Each spaceship lives inside a bubble.

When Alice pushes a button on her box (here "1"), her bubble splits into two bubbles. Each bubble contains a copy of its spaceship and its inhabitant. Inside one bubble, Alice has seen the red light flash; inside the other, she has seen the green light flash. From now on, the two bubbles are living parallel lives. They cannot interact in any way and will never meet again. Notice that this phenomenon is strictly local.

The same phenomenon takes place when Bob pushes his button (here "0") on the box. Let's see what happens when they travel toward each other.

Each of the two bubbles that contain Alice is allowed to interact with and see only a single bubble that contains Bob, namely the one that satisfies the equations described above.



Note that such a perfect matching is always possible. Furthermore, each bubble can "know" with which other bubble to interact provided it keeps a local memory of which button was pushed and which light flashed. Alice and Bob will be under the illusion of correlations that seem to emerge from outside of space and time. In our imaginary world, the Einstein-Podolsky-Rosen argument does not hold because whenever Alice pushes a button and can predict something about Bob, she is really predicting, not what is happening simultaneously at Bob's place, but how their various lives will meet in the future.

Conclusion:

The virtue of our imaginary world is to demonstrate in an exceedingly simple way that local reality can produce correlations that are impossible in any classical theory based on local hidden variables.

In quantum mechanics, a theory analogous to this one can be traced back to at least Deutsch and Hayden.

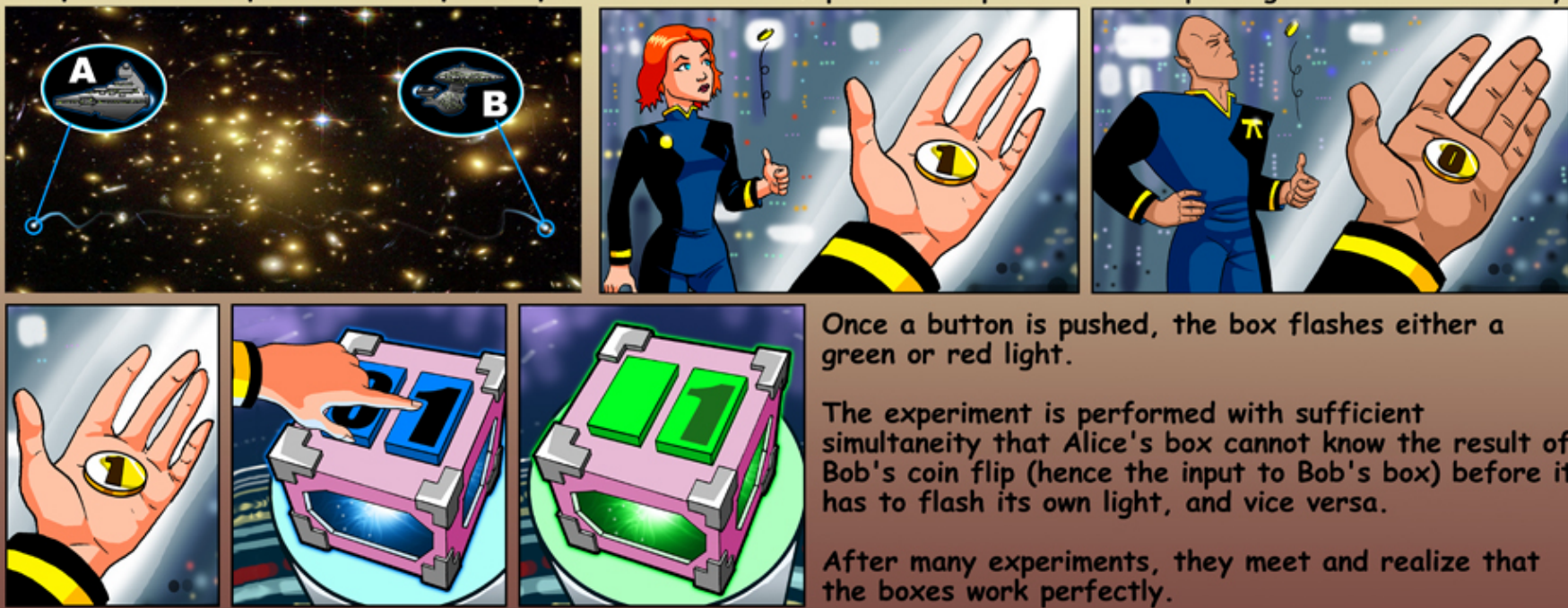
Perhaps we live parallel lives?

References:

Bell, J.S. (1964) On the Einstein-Podolsky-Rosen paradox, *Physics* 1:195-200.
 Brassard, G. and Raymond-Robichaud, P. (2013). Can free will emerge from determinism in quantum theory? Chapter 4 in *Is Science Compatible with Free Will? Exploring Free Will and Consciousness in the Light of Quantum Physics and Neuroscience*. Suarez, A. and Adams, P. (eds), Springer.
 Also available at: <http://arxiv.org/abs/1204.2128>.
 Deutsch, D. and Hayden, P. (2000). Information flow in entangled quantum systems. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A* 456(1999):1759-1774.
 Also available at: <http://arxiv.org/abs/quant-ph/9906007>.
 Einstein, A., Podolsky, B. and Rosen, N. (1935). Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? *Physical Review* 47:777-780.
 Popescu, S. and Rorhlich, D. (1994) Quantum nonlocality as an axiom. *Foundations of Physics* 24(3):379-385.

Wie gewinnt man unser Spiel in vielen Welten?

Alice and Bob will test the boxes with this protocol:
They travel far apart in their spaceships. Alice and Bob flip coins and push the corresponding button simultaneously.



Once a button is pushed, the box flashes either a green or red light.

The experiment is performed with sufficient simultaneity that Alice's box cannot know the result of Bob's coin flip (hence the input to Bob's box) before it has to flash its own light, and vice versa.

After many experiments, they meet and realize that the boxes work perfectly.

$$\begin{array}{l} A_0 + B_0 = \text{EVEN} \\ A_0 + B_1 = \text{EVEN} \\ A_1 + B_0 = \text{EVEN} \\ A_1 + B_1 = \text{ODD} \end{array}$$

“even”: gleiche Farben
“odd”: unterschiedliche

Wie gewinnt man unser Spiel in vielen Welten?

Alice and Bob will test the boxes with this protocol:

They travel far apart in their spaceships. Alice and Bob flip coins and push the corresponding button simultaneously.



Once a button is pushed, the box flashes either a green or red light.

The experiment is performed with sufficient simultaneity that Alice's box cannot know the result of Bob's coin flip (hence the input to Bob's box) before it has to flash its own light, and vice versa.

After many experiments, they meet and realize that the boxes work perfectly.

$$A_0 + B_0 = \text{EVEN}$$

$$A_0 + B_1 = \text{EVEN}$$

$$A_1 + B_0 = \text{EVEN}$$

$$A_1 + B_1 = \text{ODD}$$

“even”: gleiche Farben
 “odd”: unterschiedliche

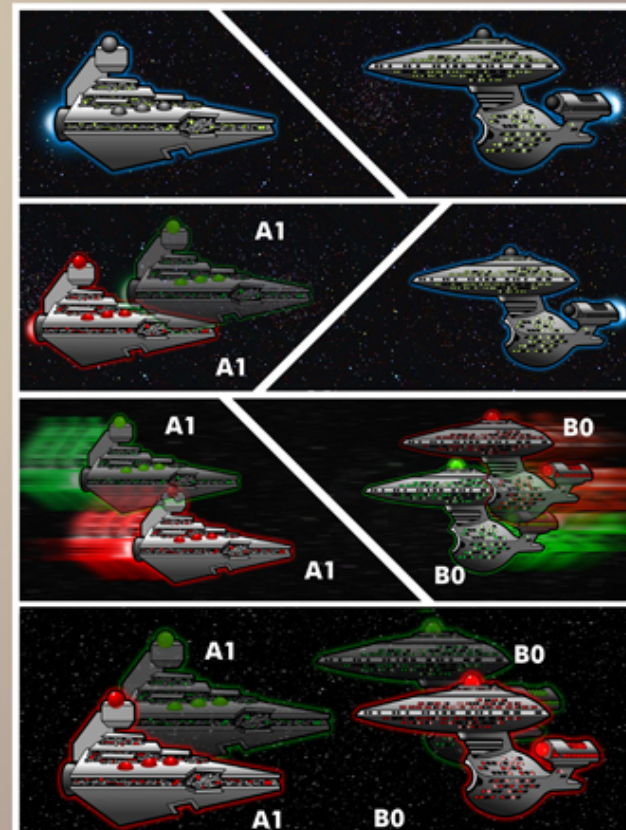
Here is how the seemingly impossible is accomplished:

Each spaceship lives inside a bubble.

When Alice pushes a button on her box (here “1”), her bubble splits into two bubbles. Each bubble contains a copy of its spaceship and its inhabitant. Inside one bubble, Alice has seen the red light flash; inside the other, she has seen the green light flash. From now on, the two bubbles are living parallel lives. They cannot interact in any way and will never meet again. Notice that this phenomenon is strictly local.

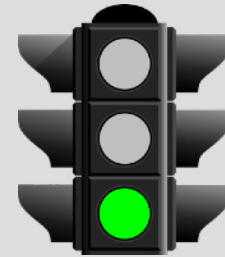
The same phenomenon takes place when Bob pushes his button (here “0”) on the box. Let's see what happens when they travel toward each other.

Each of the two bubbles that contain Alice is allowed to interact with and see only a single bubble that contains Bob, namely the one that satisfies the equations described above.



0. Kurze Vorstellung

1. Was wir wissen und vermuten



1a. Experimente mit Münzen

1b. Die Quantenwelt ist **nicht lokal-realistisch**

1c. Was tun damit? -> Erzeugung sicherer Zufallszahlen

1d. In was für einer verrückten Welt leben wir, die das ermöglicht?

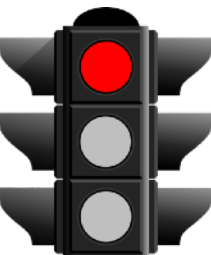
2. Worüber wir uns wundern — und was mich antreibt



2a. Vielleicht stellen wir die falschen Fragen

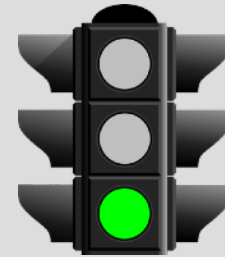
2b. Der **Blick von innen**: “*was passiert mit mir als nächstes?*”

2c. Die Suche nach einer modernen Version des Idealismus



0. Kurze Vorstellung

1. Was wir wissen und vermuten



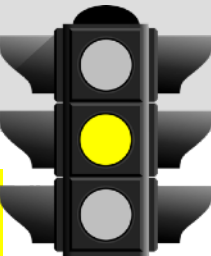
1a. Experimente mit Münzen

1b. Die Quantenwelt ist **nicht lokal-realistisch**

1c. Was tun damit? -> Erzeugung sicherer Zufallszahlen

1d. In was für einer verrückten Welt leben wir, die das ermöglicht?

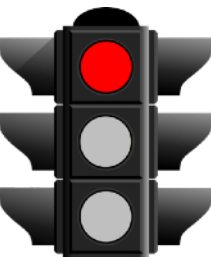
2. Worüber wir uns wundern — und was mich antreibt



2a. Vielleicht stellen wir die falschen Fragen

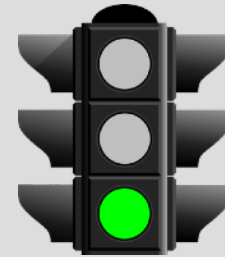
2b. Der **Blick von innen**: “*was passiert mit mir als nächstes?*”

2c. Die Suche nach einer modernen Version des Idealismus



0. Kurze Vorstellung

1. Was wir wissen und vermuten



1a. Experimente mit Münzen

1b. Die Quantenwelt ist **nicht lokal-realistisch**

1c. Was tun damit? -> Erzeugung sicherer Zufallszahlen

1d. In was für einer verrückten Welt leben wir, die das ermöglicht?

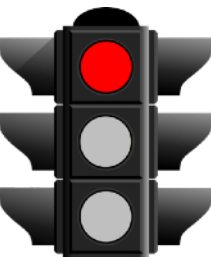
2. Worüber wir uns wundern — und was mich antreibt



2a. Vielleicht stellen wir die falschen Fragen

2b. Der **Blick von innen**: “*was passiert mit mir als nächstes?*”

2c. Die Suche nach einer modernen Version des Idealismus



Vielleicht stellen wir die falschen Fragen



“*Will* das Wasser immer nach unten fließen?”
“Hat das Wasser Angst, weit oben zu sein?”



Vielleicht stellen wir die falschen Fragen



“*Will* das Wasser immer nach unten fließen?”
“Hat das Wasser Angst, weit oben zu sein?”



“Wenn du erwachsen bist und ganz lange in der Schule warst, dann wirst du die Antwort auf die Frage wissen!”

Vielleicht stellen wir die falschen Fragen



“*Will* das Wasser immer nach unten fließen?”
“Hat das Wasser Angst, weit oben zu sein?”



“Wenn du erwachsen bist und ganz lange in der Schule warst,
dann wirst du ~~die Antwort auf die Frage wissen!~~”

verstehen, dass das nicht die richtige Frage ist.

Vielleicht stellen wir die falschen Fragen



“Will das Wasser immer nach unten fließen?”
“Hat das Wasser Angst, weit oben zu sein?”

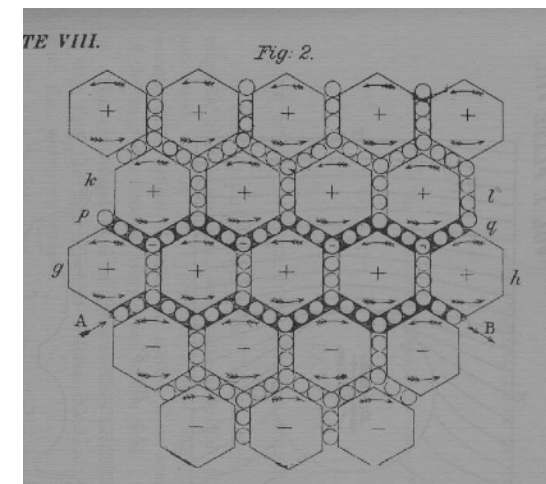


“Wenn du erwachsen bist und ganz lange in der Schule warst,
dann wirst du ~~die Antwort auf die Frage wissen!~~”

verstehen, dass das nicht die richtige Frage ist.

Geschichte der Physik:

“Welche mechanischen Eigenschaften hat der **Äther**?”



Vielleicht stellen wir die falschen Fragen



“Will das Wasser immer nach unten fließen?”
“Hat das Wasser Angst, weit oben zu sein?”



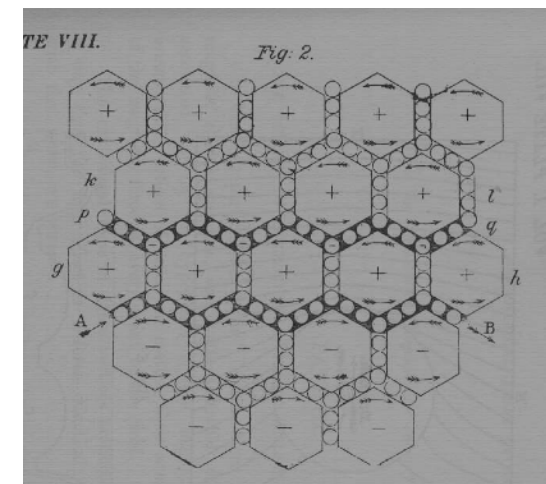
“Wenn du erwachsen bist und ganz lange in der Schule warst,
dann wirst du ~~die Antwort auf die Frage wissen!~~”

verstehen, dass das nicht die richtige Frage ist.

Geschichte der Physik:

“Welche mechanischen Eigenschaften hat der **Äther**?”

Fortschritt besteht manchmal darin, Fragen loszuwerden
oder aufzulösen, anstatt sie zu beantworten.



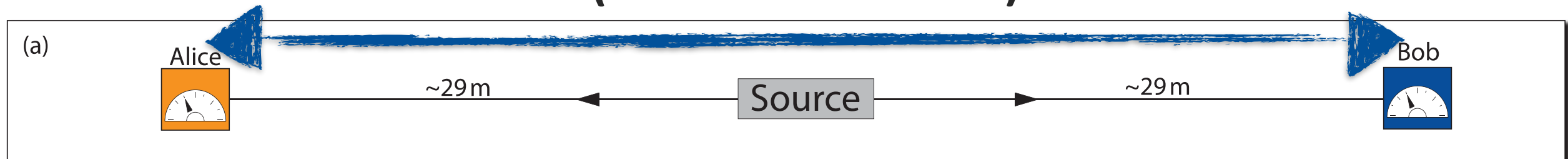
Keine Welt, oder viele Welten?

Persönliche Entscheidung: ich halte Interpretationen für unplausibel, die *zusätzliche unbeobachtbare Mechanismen* postulieren, nur um eine für Menschen intuitive Erklärung zu konstruieren.

Keine Welt, oder viele Welten?

Persönliche Entscheidung: ich halte Interpretationen für unplausibel, die *zusätzliche unbeobachtbare Mechanismen* postulieren, nur um eine für Menschen intuitive Erklärung zu konstruieren.

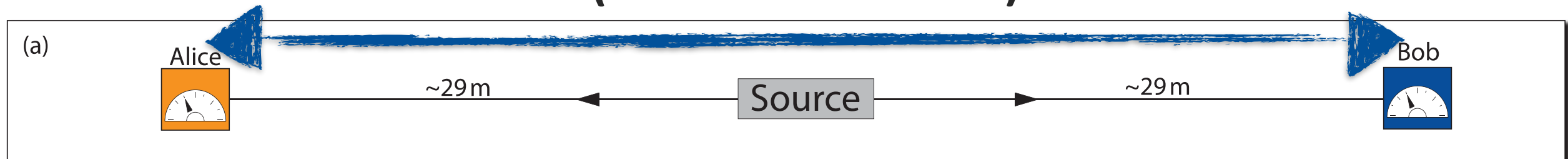
Kein versteckter (überlichtschneller) Informationsfluss.



Keine Welt, oder viele Welten?

Persönliche Entscheidung: ich halte Interpretationen für unplausibel, die *zusätzliche unbeobachtbare Mechanismen* postulieren, nur um eine für Menschen intuitive Erklärung zu konstruieren.

Kein versteckter (überlichtschneller) Informationsfluss.

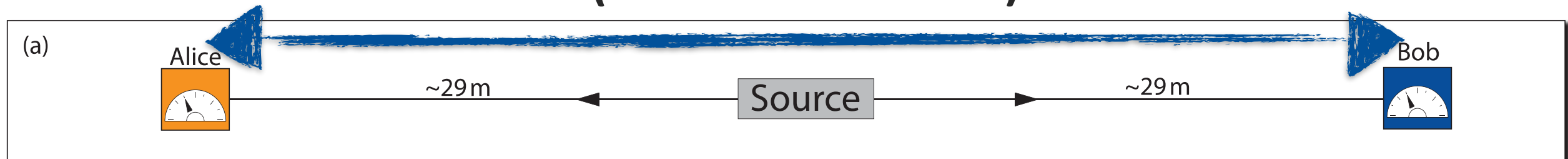


Damit verbleiben 2 Möglichkeiten, die Verletzung von lokalem Realismus zu verstehen:

Keine Welt, oder viele Welten?

Persönliche Entscheidung: ich halte Interpretationen für unplausibel, die *zusätzliche unbeobachtbare Mechanismen* postulieren, nur um eine für Menschen intuitive Erklärung zu konstruieren.

Kein versteckter (überlichtschneller) Informationsfluss.



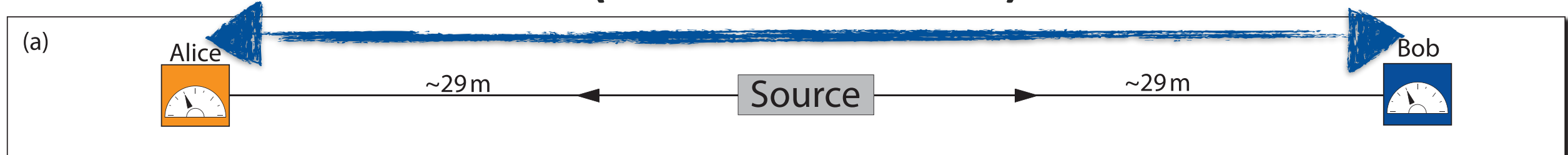
Damit verbleiben 2 Möglichkeiten, die Verletzung von lokalem Realismus zu verstehen:

- **Realismus ist verletzt.** In gewissem Sinn ist **keine Welt** “da draußen”, die aus Objekten mit Eigenschaften besteht, die objektiv der Fall sind, unabhängig davon ob jemand oder etwas sie beobachtet.

Keine Welt, oder viele Welten?

Persönliche Entscheidung: ich halte Interpretationen für unplausibel, die *zusätzliche unbeobachtbare Mechanismen* postulieren, nur um eine für Menschen intuitive Erklärung zu konstruieren.

Kein versteckter (überlichtschneller) Informationsfluss.



Damit verbleiben 2 Möglichkeiten, die Verletzung von lokalem Realismus zu verstehen:

- **Realismus ist verletzt.** In gewissem Sinn ist **keine Welt** “da draußen”, die aus Objekten mit Eigenschaften besteht, die objektiv der Fall sind, unabhängig davon ob jemand oder etwas sie beobachtet.
- **Die Grundannahmen des Formalismus treffen nicht zu.** Eine Version der **Viele-Welten**-Hypothese beschreibt, was wirklich der Fall ist.

“Keine Welt” (Kopenhagen-artige Interpretationen) vs. Viele Welten

“Keine Welt” (Kopenhagen-artige Interpretationen) vs. Viele Welten



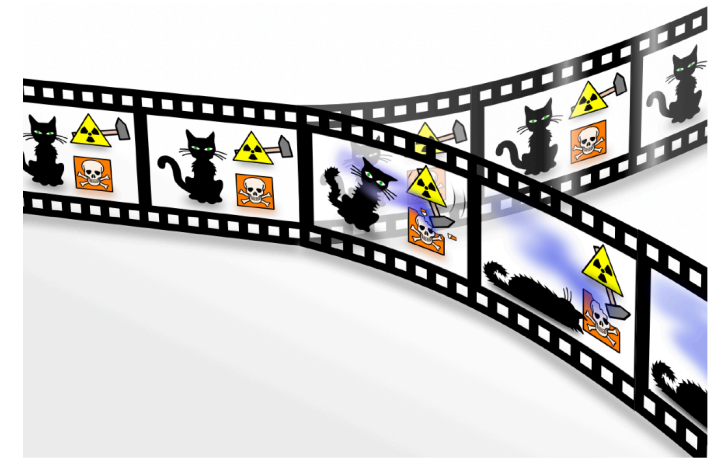
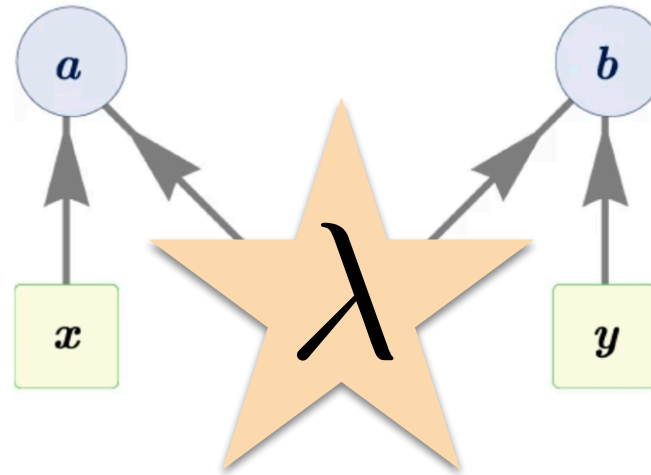
“*Will* das Wasser immer nach unten fließen?”
“Hat das Wasser Angst, weit oben zu sein?”



“Keine Welt” (Kopenhagen-artige Interpretationen) vs. Viele Welten



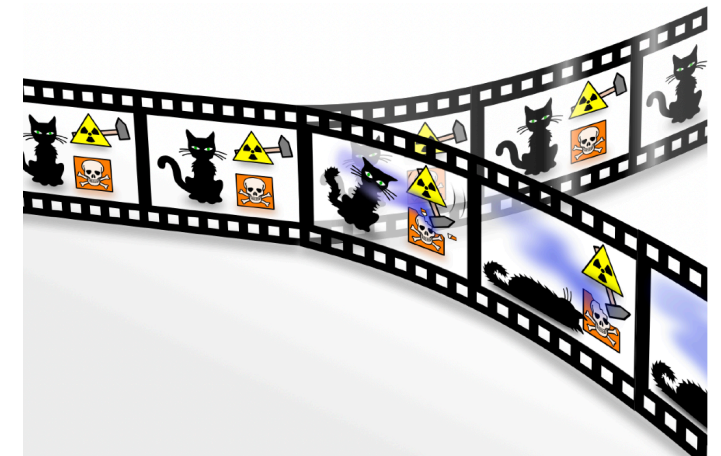
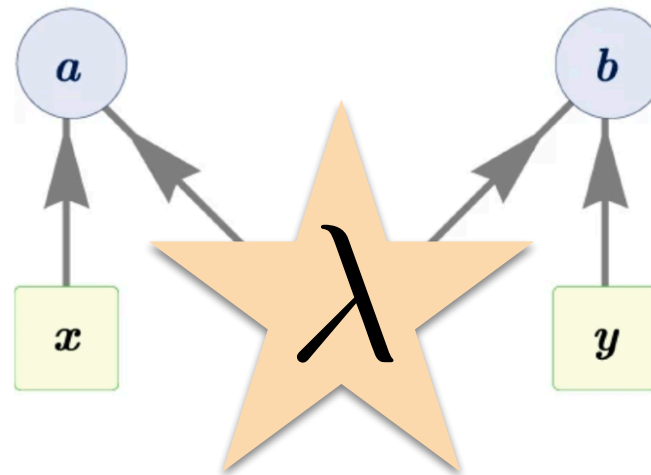
“Gibt es da draußen *keine Welt* (im üblichen Sinn), oder *viele Welten*?”



“Keine Welt” (Kopenhagen-artige Interpretationen) vs. Viele Welten



“Gibt es da draußen *keine Welt* (im üblichen Sinn), oder *viele Welten*?”

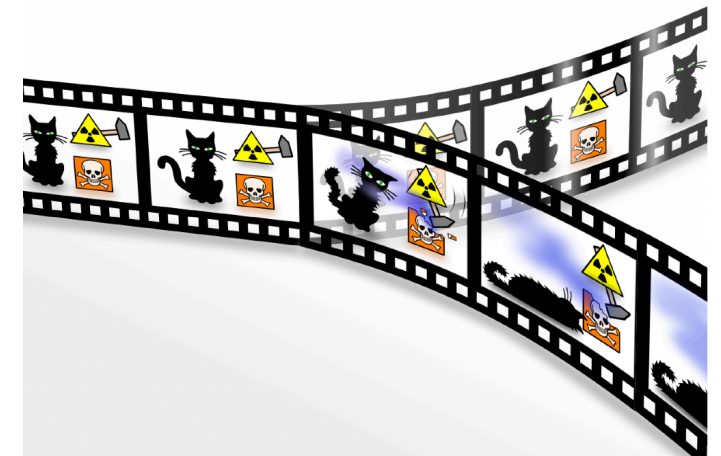
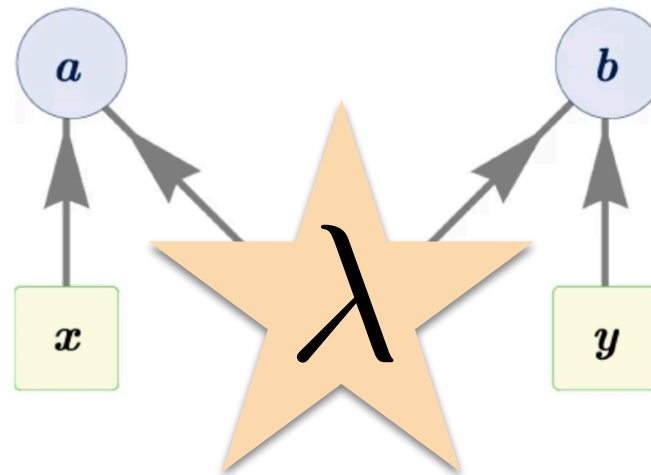


Meine Hypothese: die Frage macht keinen Sinn. Die Welt hat keine Antwort darauf parat! Beides sind nur verschiedene menschliche Sichtweisen auf den exakt gleichen Sachverhalt.

“Keine Welt” (Kopenhagen-artige Interpretationen) vs. Viele Welten



“Gibt es da draußen *keine Welt* (im üblichen Sinn), oder *viele Welten*?”



Meine Hypothese: die Frage macht keinen Sinn. Die Welt hat keine Antwort darauf parat! Beides sind nur verschiedene menschliche Sichtweisen auf den exakt gleichen Sachverhalt.

Informationstheoretisches

Analogon:

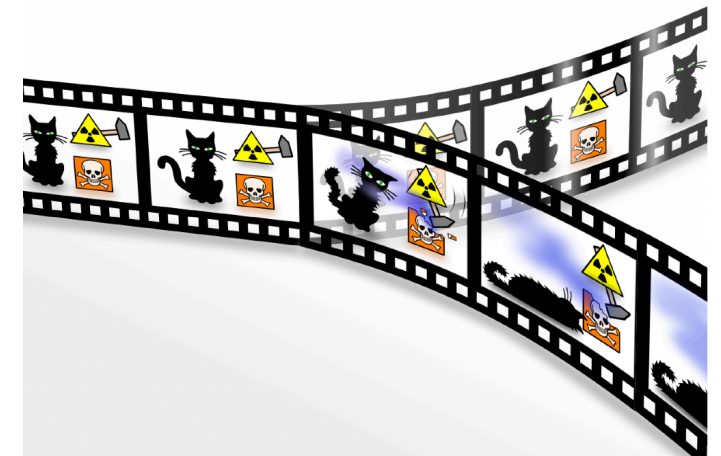
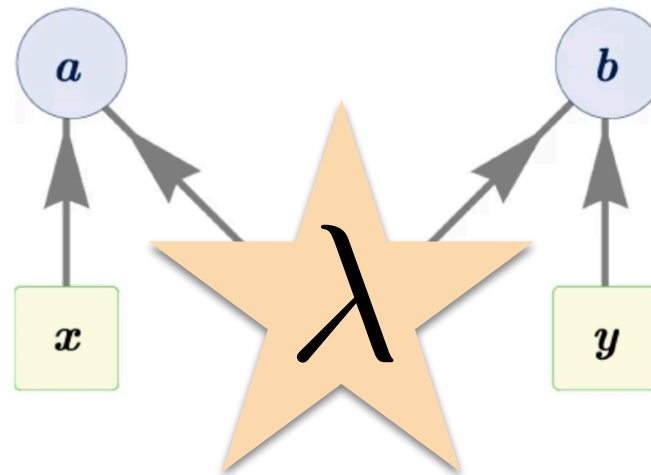
alle mögl. Nachrichten

\simeq keine Nachricht

“Keine Welt” (Kopenhagen-artige Interpretationen) vs. Viele Welten



“Gibt es da draußen *keine Welt* (im üblichen Sinn), oder *viele Welten*?”



Meine Hypothese: die Frage macht keinen Sinn. Die Welt hat keine Antwort darauf parat! Beides sind nur verschiedene menschliche Sichtweisen auf den exakt gleichen Sachverhalt.

Informationstheoretisches

Analogon:

alle mögl. Nachrichten

\simeq keine Nachricht



leere Bibliothek



Bibliothek aller logisch
möglichen Bücher

“Was werde ich wahrscheinlich beobachten?”

Die Quantenmechanik liefert **keine** direkte Antwort auf die Frage
“Was ist der Fall in der Welt?”

“Was werde ich wahrscheinlich beobachten?”

Die Quantenmechanik liefert **keine** direkte Antwort auf die Frage
“Was ist der Fall in der Welt?”

Meine Sichtweise: Wir sollten diese Frage auch gar nicht (auf naive Weise) stellen — die Lektion der QM ist, dass diese Frage nicht immer eine Antwort haben *kann*.

“Was werde ich wahrscheinlich beobachten?”

Die Quantenmechanik liefert **keine** direkte Antwort auf die Frage “Was ist der Fall in der Welt?”

Meine Sichtweise: Wir sollten diese Frage auch gar nicht (auf naive Weise) stellen — die Lektion der QM ist, dass diese Frage nicht immer eine Antwort haben *kann*.

Die Frage, die die QM aber immer beantwortet, ist die folgende:

Gegeben was ich jetzt sehe, was sehe ich wohl als nächstes?

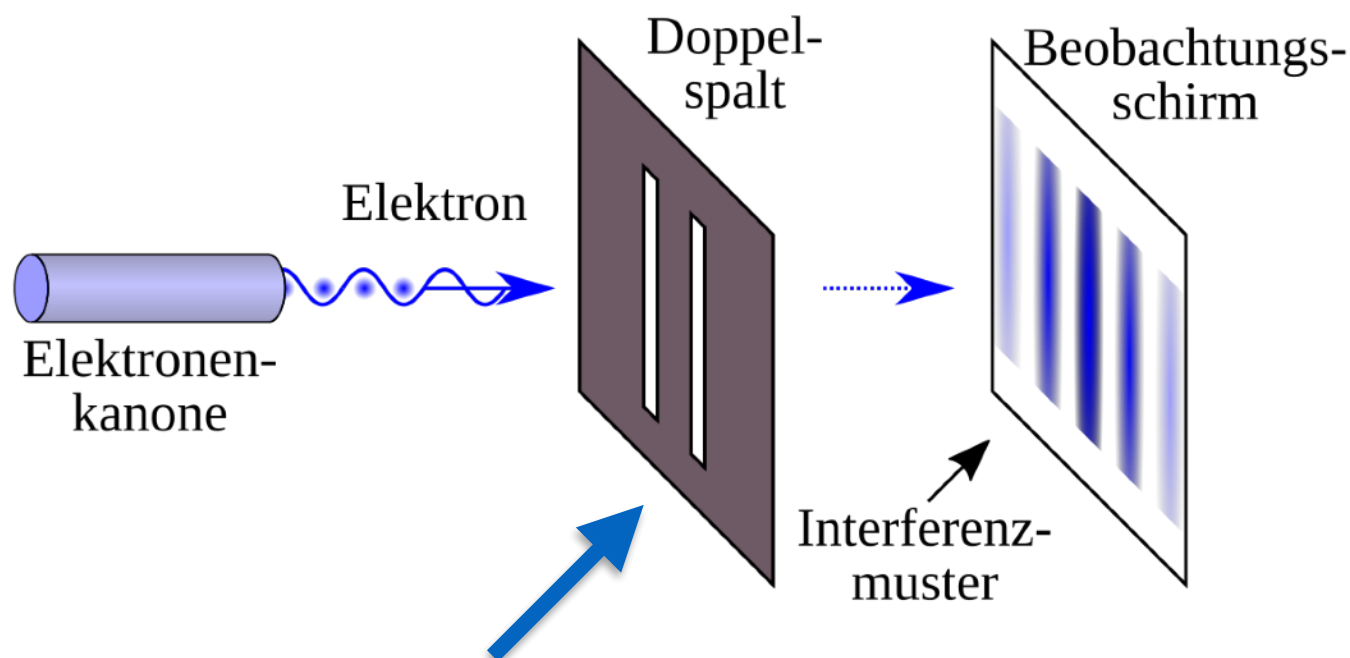
“Was werde ich wahrscheinlich beobachten?”

Die Quantenmechanik liefert **keine** direkte Antwort auf die Frage “Was ist der Fall in der Welt?”

Meine Sichtweise: Wir sollten diese Frage auch gar nicht (auf naive Weise) stellen — die Lektion der QM ist, dass diese Frage nicht immer eine Antwort haben *kann*.

Die Frage, die die QM aber immer beantwortet, ist die folgende:

Gegeben was ich jetzt sehe, was sehe ich wohl als nächstes?

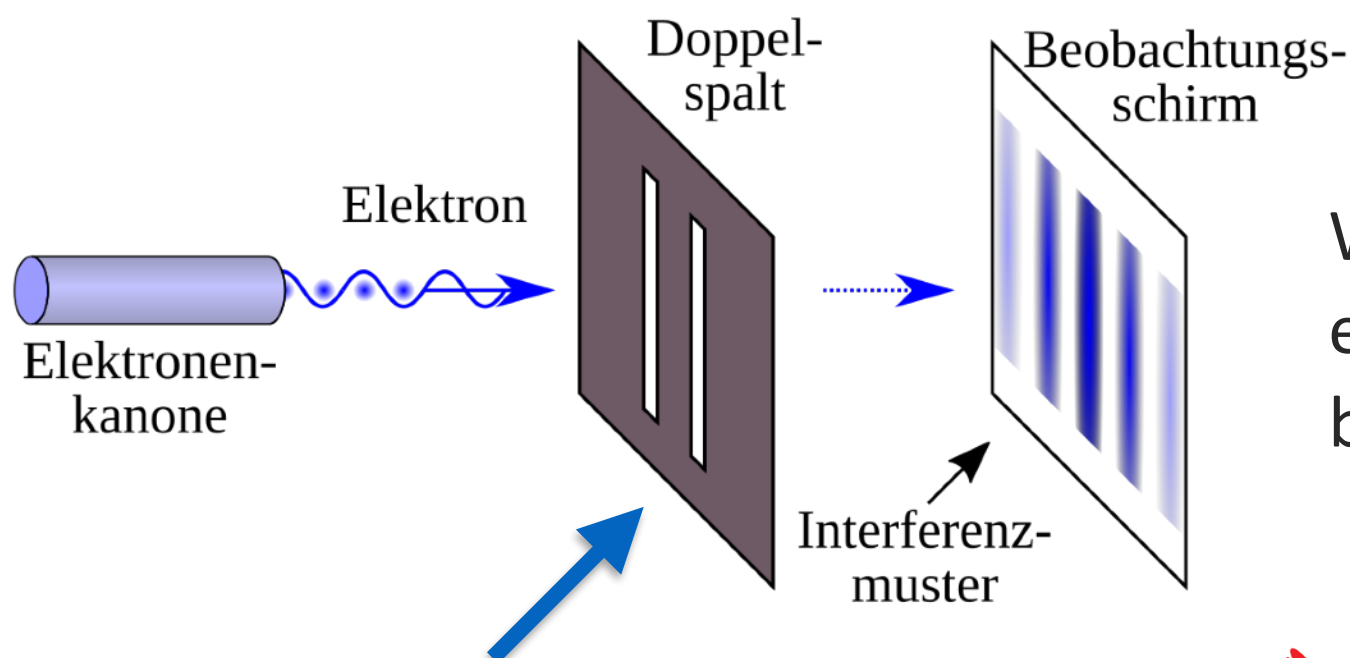


“Was werde ich wahrscheinlich beobachten?”

Die Quantenmechanik liefert **keine** direkte Antwort auf die Frage “Was ist der Fall in der Welt?”

Meine Sichtweise: Wir sollten diese Frage auch gar nicht (auf naive Weise) stellen — die Lektion der QM ist, dass diese Frage nicht immer eine Antwort haben *kann*.

Die Frage, die die QM aber immer beantwortet, ist die folgende:
Gegeben was ich jetzt sehe, was sehe ich wohl als nächstes?



Wo werde ich wahrscheinlich eine Schwärzung am Schirm beobachten? ✓

Ist das Elektron am linken oder rechten Spalt? ✗

Philipp Berghofer (Graz): "DEJI"

Philipp Berghofer (Graz): "DEJI"

Eine Interpretation der Quantenmechanik: Quantum Probabilities as "Objective Degrees of Epistemic Justification".

Quantum Probabilities Are Objective Degrees of Epistemic Justification

Philipp Berghofer

University of Graz

philipp.berghofer@uni-graz.at

Abstract

QBism is currently one of the most widely discussed "subjective" interpretations of quantum mechanics. Its key move is to say that quantum probabilities are personalist Bayesian probabilities and that the quantum state represents *subjective degrees of belief*. Even probability-one predictions are considered subjective assignments expressing the agent's highest possible degree of certainty about what they will experience next. For most philosophers and physicists this means that QBism is simply too subjective. Even those who agree with QBism that the wave function should not be reified and that we should look for alternatives to standard *ψ -ontic* interpretations often argue that QBism must be abandoned because it detaches science from objectivity. The problem is that from the QBist perspective it is hard to see how objectivity could enter science. In this paper, I introduce and motivate an interpretation of quantum mechanics that takes QBism as a starting point, is consistent with all its virtues, but allows objectivity to enter from the get-go. This is the view that quantum probabilities should be understood as objective degrees of epistemic justification.

Philipp Berghofer (Graz): "DEJI"

Eine Interpretation der Quantenmechanik: Quantum Probabilities as "Objective Degrees of Epistemic Justification".

Quantum Probabilities Are Objective Degrees of Epistemic Justification

Philipp Berghofer

University of Graz

philipp.berghofer@uni-graz.at

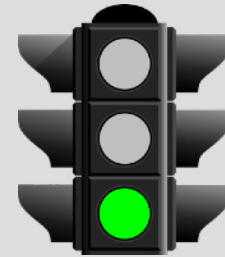
Abstract

QBism is currently one of the most widely discussed "subjective" interpretations of quantum mechanics. Its key move is to say that quantum probabilities are personalist Bayesian probabilities and that the quantum state represents *subjective degrees of belief*. Even probability-one predictions are considered subjective assignments expressing the agent's highest possible degree of certainty about what they will experience next. For most philosophers and physicists this means that QBism is simply too subjective. Even those who agree with QBism that the wave function should not be reified and that we should look for alternatives to standard *ψ -ontic* interpretations often argue that QBism must be abandoned because it detaches science from objectivity. The problem is that from the QBist perspective it is hard to see how objectivity could enter science. In this paper, I introduce and motivate an interpretation of quantum mechanics that takes QBism as a starting point, is consistent with all its virtues, but allows objectivity to enter from the get-go. This is the view that quantum probabilities should be understood as objective degrees of epistemic justification.

"[...] the quantum probabilities tell the agent **what she should believe to experience next** [...]."

0. Kurze Vorstellung

1. Was wir wissen und vermuten



1a. Experimente mit Münzen

1b. Die Quantenwelt ist **nicht lokal-realistisch**

1c. Was tun damit? -> Erzeugung sicherer Zufallszahlen

1d. In was für einer verrückten Welt leben wir, die das ermöglicht?

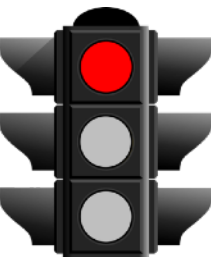
2. Worüber wir uns wundern — und was mich antreibt



2a. Vielleicht stellen wir die falschen Fragen

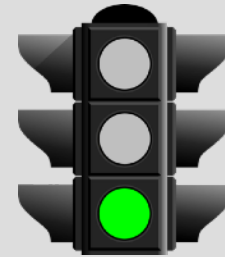
2b. Der **Blick von innen**: “*was passiert mit mir als nächstes?*”

2c. Die Suche nach einer modernen Version des Idealismus



0. Kurze Vorstellung

1. Was wir wissen und vermuten



1a. Experimente mit Münzen

1b. Die Quantenwelt ist **nicht lokal-realistisch**

1c. Was tun damit? -> Erzeugung sicherer Zufallszahlen

1d. In was für einer verrückten Welt leben wir, die das ermöglicht?

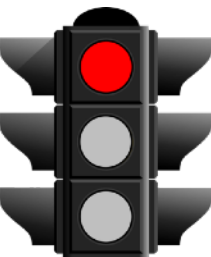
2. Worüber wir uns wundern — und was mich antreibt



2a. Vielleicht stellen wir die falschen Fragen

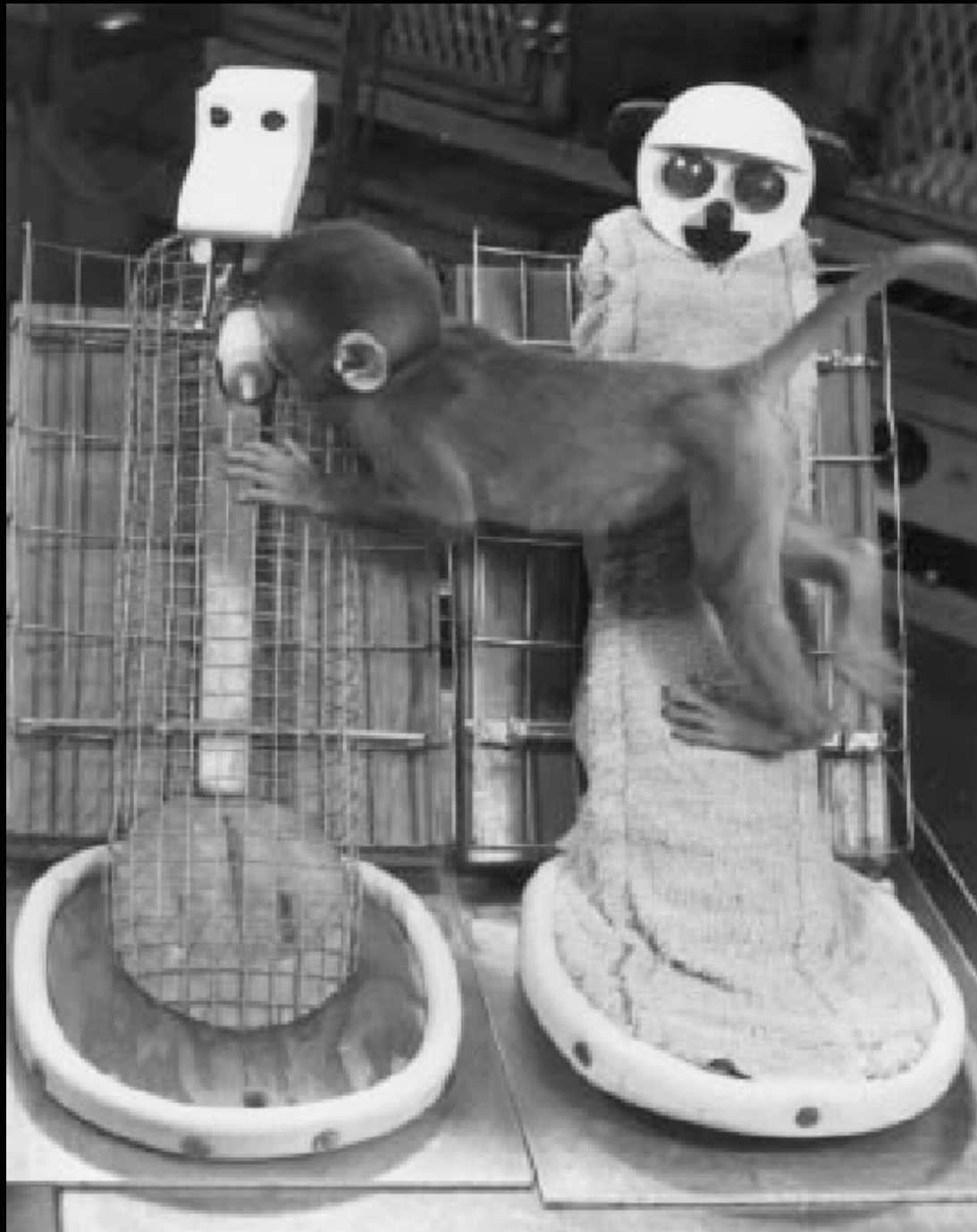
2b. Der Blick von innen: “*was passiert mit mir als nächstes?*”

2c. Die Suche nach einer modernen Version des Idealismus



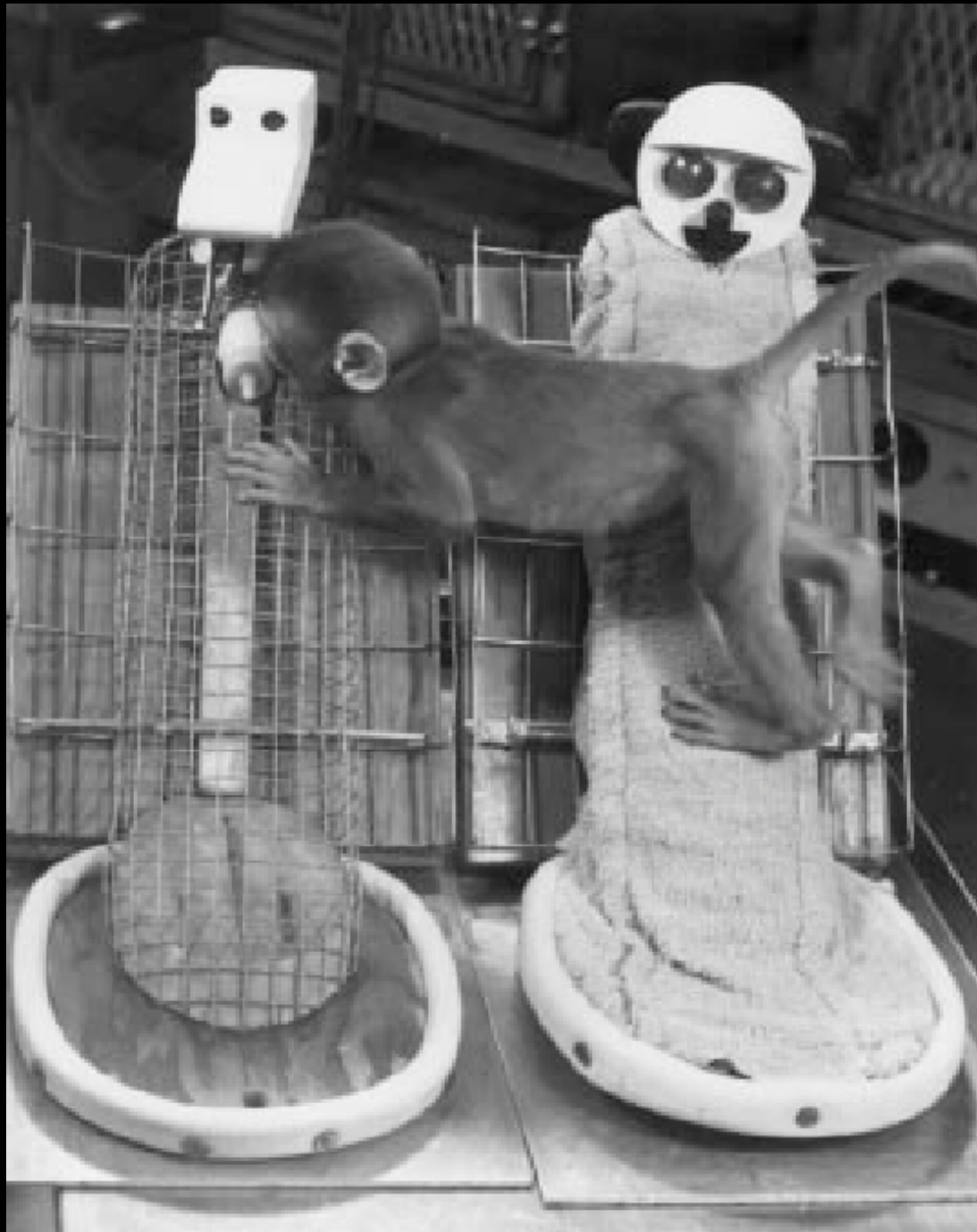
Dem Behaviorismus fehlt die Vorhersagekraft

Harry Harlow, 1957: Experimente mit Rhesusaffen-Kindern



Dem Behaviorismus fehlt die Vorhersagekraft

Harry Harlow, 1957: Experimente mit Rhesusaffen-Kindern

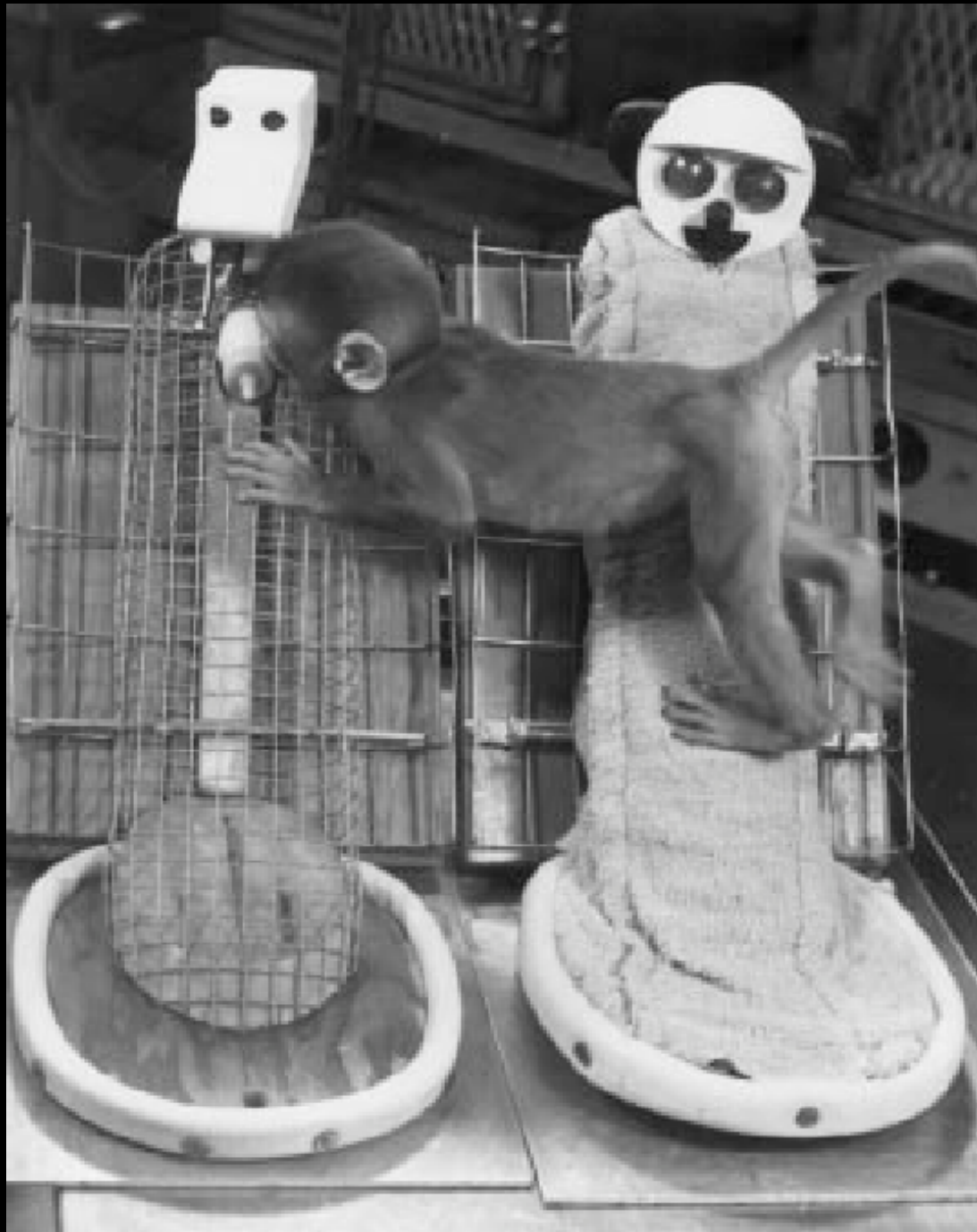


“Die Affen wählten mit überwältigender Mehrheit die Stoffmutter, ob mit oder ohne Futter, und suchten nur die Drahtmutter mit Futter auf, wenn sie Nahrung brauchten.”

Der Blick “von außen” ist nicht immer der richtige!

Dem Behaviorismus fehlt die Vorhersagekraft

Harry Harlow, 1957: Experimente mit Rhesusaffen-Kindern



“Die Affen wählten mit überwältigender Mehrheit die Stoffmutter, ob mit oder ohne Futter, und suchten nur die Drahtmutter mit Futter auf, wenn sie Nahrung brauchten.”

„Der Behaviorismus ist ein systematischer Ansatz, um das Verhalten von Menschen und anderen Tieren zu verstehen. Er geht davon aus, dass das Verhalten entweder ein Reflex ist, der durch das Zusammentreffen bestimmter vorhergehender Reize in der Umwelt ausgelöst wird, oder eine Folge der Geschichte des Individuums, insbesondere von Belohnung und Bestrafung.“

„Die kognitive Revolution des späten 20. Jahrhunderts ersetzte den Behaviorismus als Erklärungstheorie weitgehend durch die kognitive Psychologie, die im Gegensatz zum Behaviorismus interne mentale Zustände als Erklärung für beobachtbares Verhalten ansieht.“

Harlow „beschrieb seine Experimente als eine Studie über die Liebe“.

Der Blick “von außen” ist nicht immer der richtige!

Der Blick “von außen” ist nicht immer der richtige!

- **QM:** “*Was sehe ich wahrscheinlich als nächstes?*” als fundamentale Frage. (Beobachter muss nicht unbedingt ein Mensch oder bewusst sein.)

Der Blick “von außen” ist nicht immer der richtige!

- **QM:** *“Was sehe ich wahrscheinlich als nächstes?”* als fundamentale Frage. (Beobachter muss nicht unbedingt ein Mensch oder bewusst sein.)
- **“Wigner’s Freund”**-Szenarien: die Antwort auf diese Frage “von innen” ist oftmals nicht aus einer Perspektive “von außen” ableitbar.

Der Blick “von außen” ist nicht immer der richtige!

Der Blick “von innen” ist fundamentaler

- **QM:** “*Was sehe ich wahrscheinlich als nächstes?*” als fundamentale Frage. (Beobachter muss nicht unbedingt ein Mensch oder bewusst sein.)
- “**Wigner’s Freund**”-Szenarien: die Antwort auf diese Frage “von innen” ist oftmals nicht aus einer Perspektive “von außen” ableitbar.

nature
physics

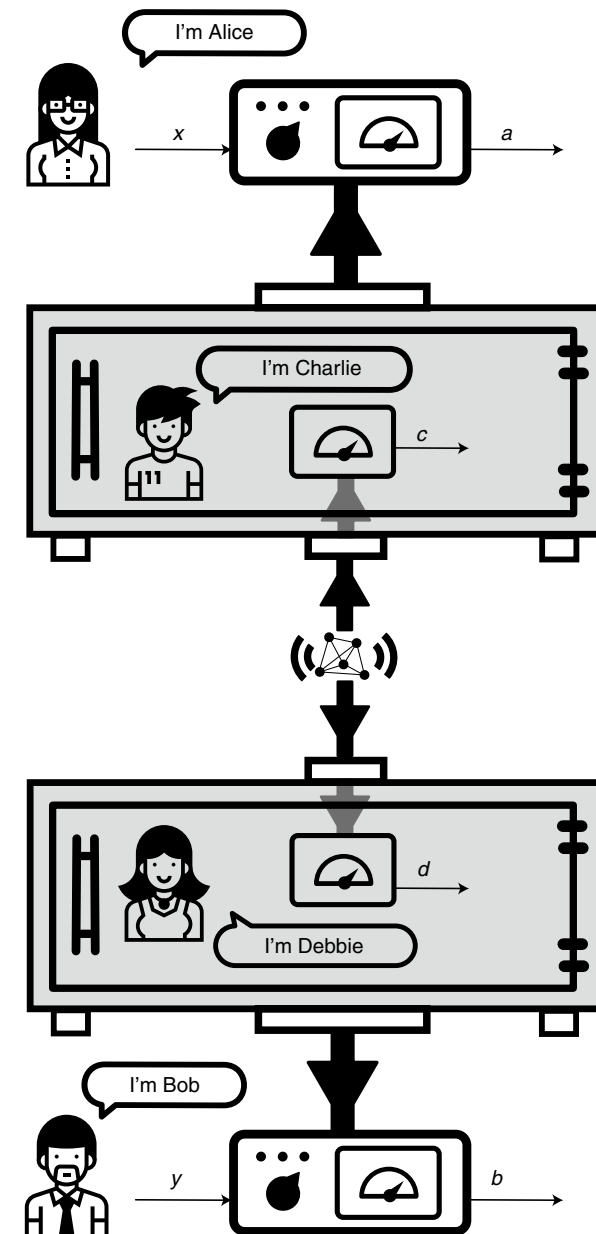
ARTICLES

<https://doi.org/10.1038/s41567-020-0990-x>

Check for updates

A strong no-go theorem on the Wigner’s friend paradox

Kok-Wei Bong^{1,4}, Aníbal Utreras-Alarcón^{1,4}, Farzad Ghafari¹, Yeong-Cherng Liang²,
Nora Tischler¹, Eric G. Cavalcanti³, Geoff J. Pryde¹ and Howard M. Wiseman¹



Der Blick “von innen” ist fundamentaler

- **QM:** “*Was sehe ich wahrscheinlich als nächstes?*” als fundamentale Frage. (Beobachter muss nicht unbedingt ein Mensch oder bewusst sein.)
- “**Wigner’s Freund**”-Szenarien: die Antwort auf diese Frage “von innen” ist oftmals nicht aus einer Perspektive “von außen” ableitbar.

nature
physics

ARTICLES

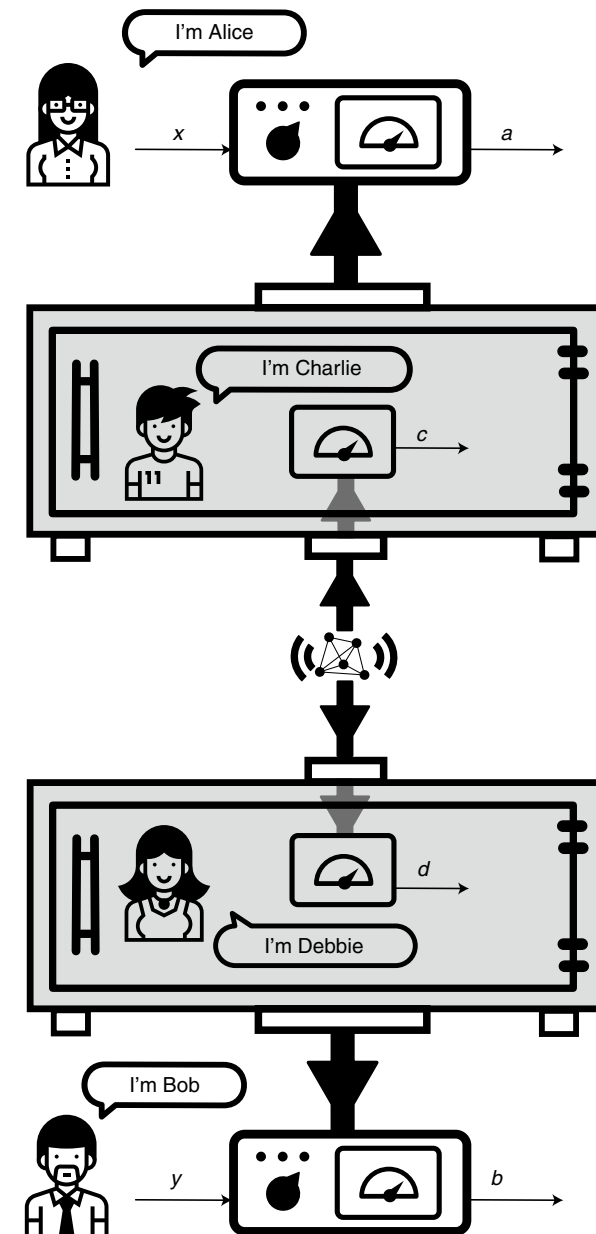
<https://doi.org/10.1038/s41567-020-0990-x>

Check for updates

A strong no-go theorem on the Wigner’s friend paradox

Kok-Wei Bong^{1,4}, Aníbal Utreras-Alarcón^{1,4}, Farzad Ghafari¹, Yeong-Cherng Liang²,
Nora Tischler¹, Eric G. Cavalcanti³, Geoff J. Pryde¹ and Howard M. Wiseman¹

Wenn die Statistik eine sog. “local-friendliness”-Ungleichung verletzt, dann gibt es **keine gemeinsame Verteilung** der Beobachtungen a (von Alice), b (Bob), c (Charlie) und d (Debbie).



“Was sehe ich wahrscheinlich als nächstes?”

- Die **QM** identifiziert dies als die wesentliche, fundamentale Frage.

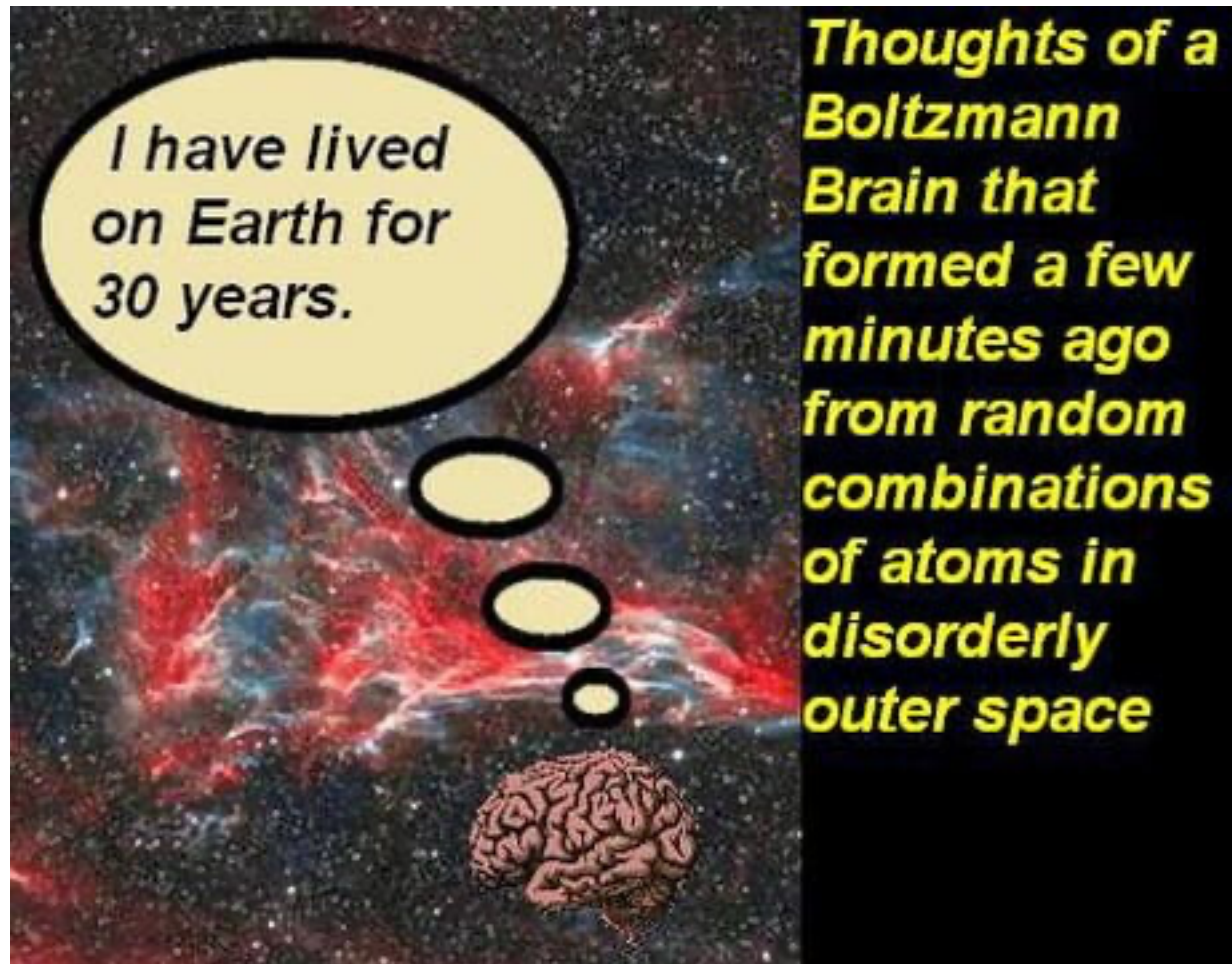
“Was sehe ich wahrscheinlich als nächstes?”

- Die **QM** identifiziert dies als die wesentliche, fundamentale Frage.
- Mein Argument: das ist die **wesentliche Frage bei einer Vielzahl anderer Rätsel** in den Grundlagen der Physik und Philosophie.

“Was sehe ich wahrscheinlich als nächstes?”

- Die **QM** identifiziert dies als die wesentliche, fundamentale Frage.
- Mein Argument: das ist die **wesentliche Frage bei einer Vielzahl anderer Rätsel** in den Grundlagen der Physik und Philosophie.

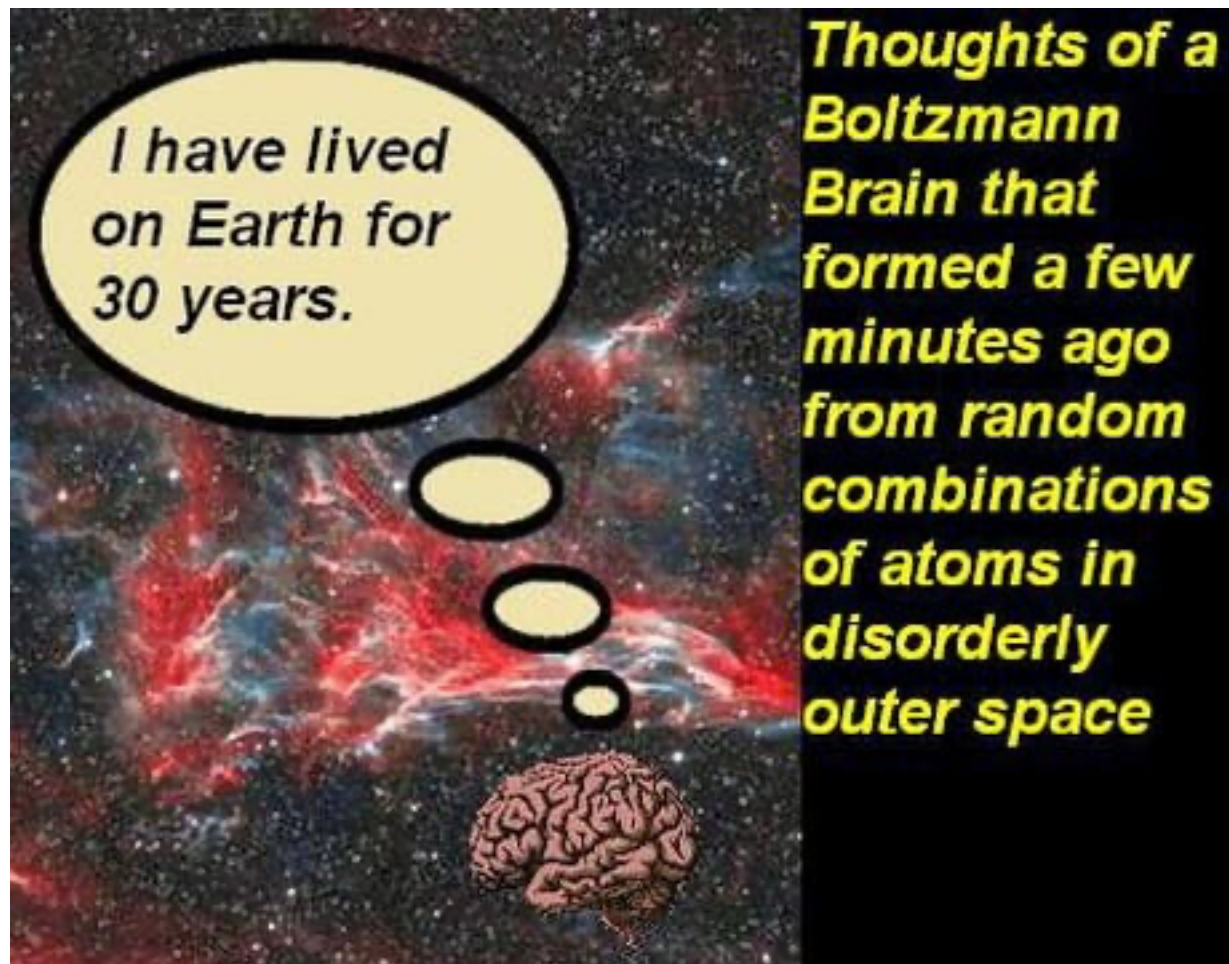
S. M. Carroll, *Why Boltzmann brains are bad*, 2020.



“Was sehe ich wahrscheinlich als nächstes?”

- Die **QM** identifiziert dies als die wesentliche, fundamentale Frage.
- Mein Argument: das ist die **wesentliche Frage bei einer Vielzahl anderer Rätsel** in den Grundlagen der Physik und Philosophie.

S. M. Carroll, *Why Boltzmann brains are bad*, 2020.



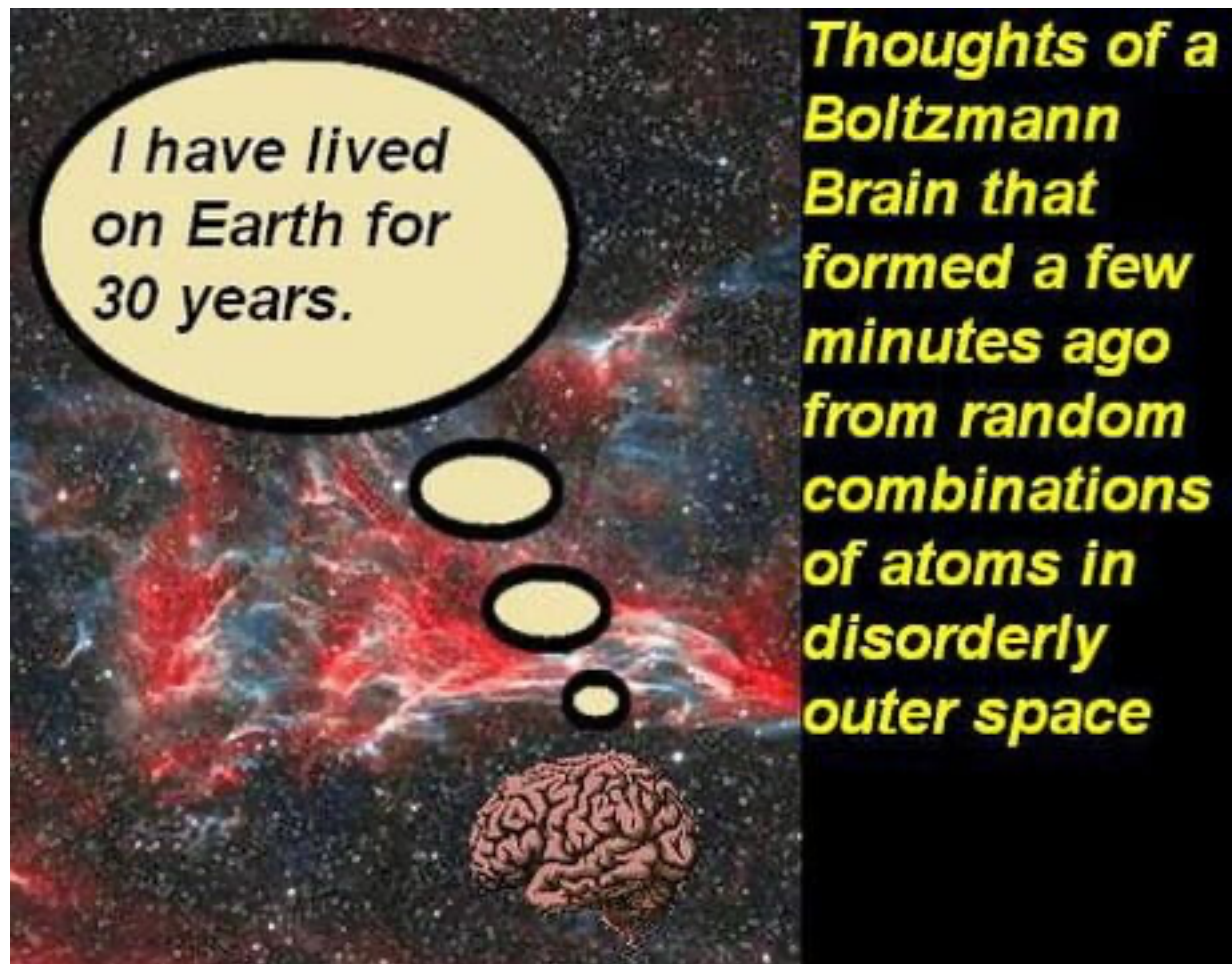
Das “Boltzmann-Gehirn”-Problem

Manche kosmologische Modelle sagen viel mehr Boltzmann-Gehirne voraus als “normale” Gehirne.

“Was sehe ich wahrscheinlich als nächstes?”

- Die **QM** identifiziert dies als die wesentliche, fundamentale Frage.
- Mein Argument: das ist die **wesentliche Frage bei einer Vielzahl anderer Rätsel** in den Grundlagen der Physik und Philosophie.

S. M. Carroll, *Why Boltzmann brains are bad*, 2020.



Das “Boltzmann-Gehirn”-Problem

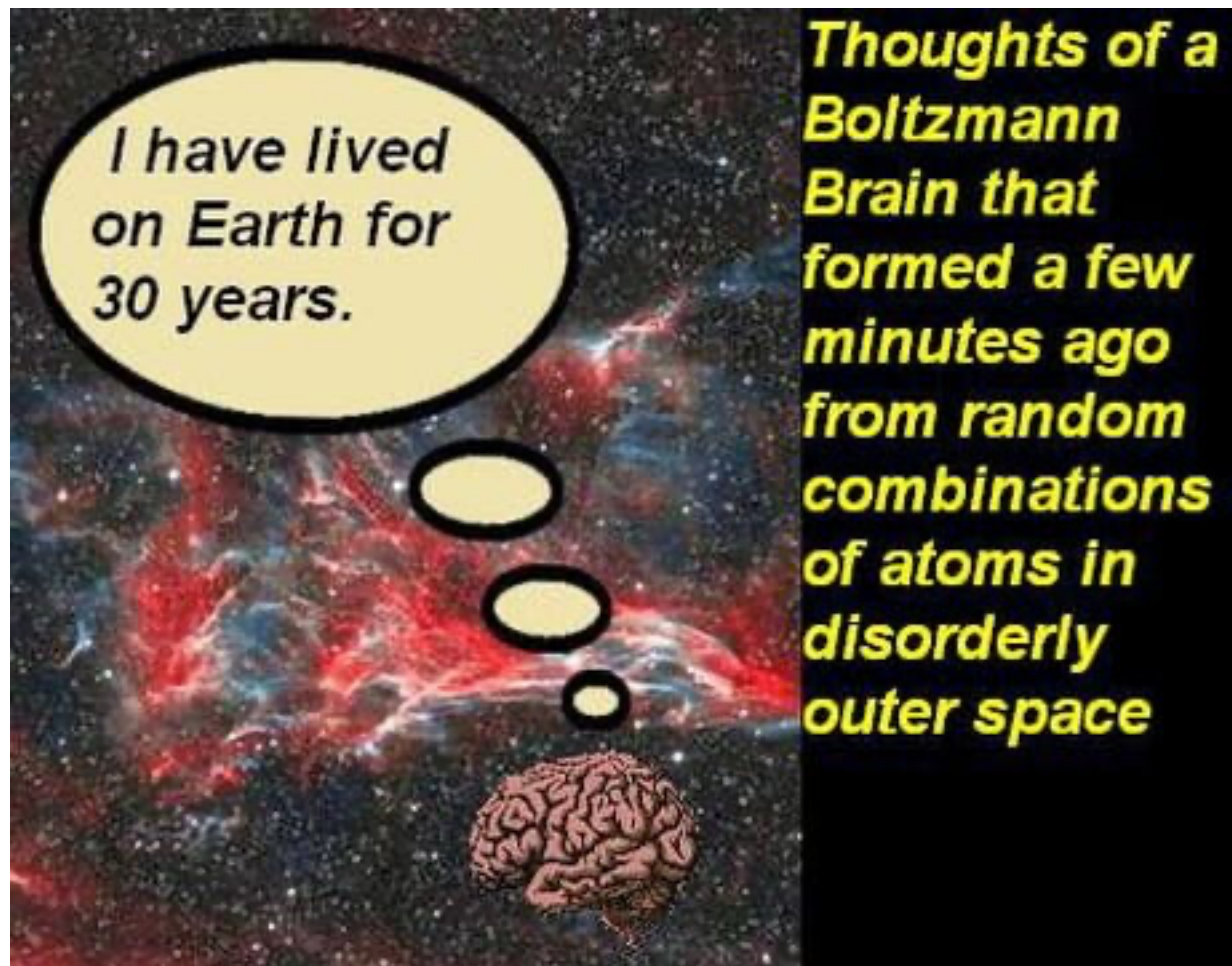
Manche kosmologische Modelle sagen viel mehr Boltzmann-Gehirne voraus als “normale” Gehirne.

“Frage von innen”: sollte ich dann erwarten, im nächsten Moment eine ganz ungewöhnliche Beobachtung (à la BG) zu machen?

“Was sehe ich wahrscheinlich als nächstes?”

- Die **QM** identifiziert dies als die wesentliche, fundamentale Frage.
- Mein Argument: das ist die **wesentliche Frage bei einer Vielzahl anderer Rätsel** in den Grundlagen der Physik und Philosophie.

S. M. Carroll, *Why Boltzmann brains are bad*, 2020.



Das “Boltzmann-Gehirn”-Problem

Manche kosmologische Modelle sagen viel mehr Boltzmann-Gehirne voraus als “normale” Gehirne.

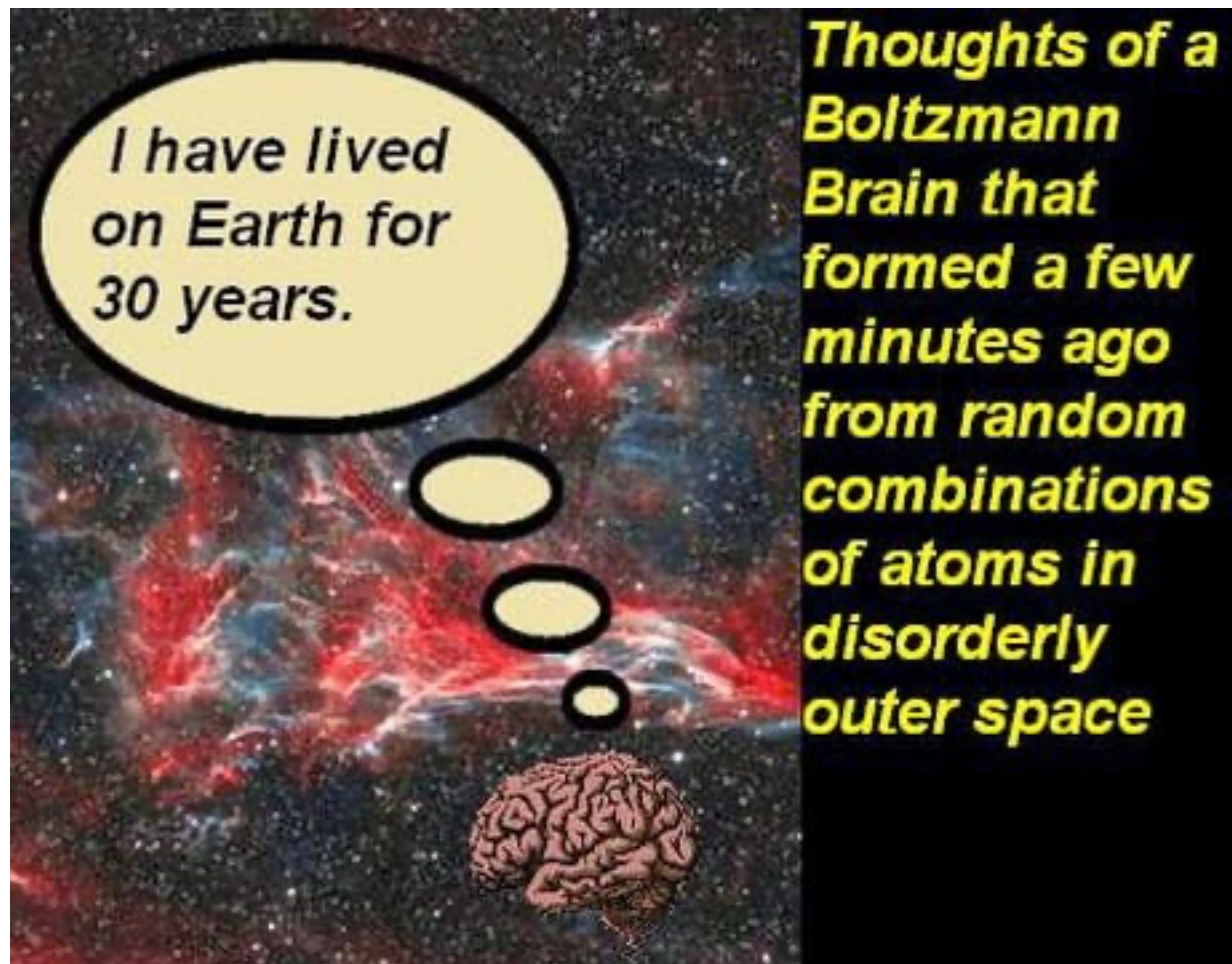
“Frage von innen”: sollte ich dann erwarten, im nächsten Moment eine ganz ungewöhnliche Beobachtung (à la BG) zu machen?

Falls “ja:” super! Kosmologen könnten dann solche Modelle ausschließen.

“Was sehe ich wahrscheinlich als nächstes?”

- Die **QM** identifiziert dies als die wesentliche, fundamentale Frage.
- Mein Argument: das ist die **wesentliche Frage bei einer Vielzahl anderer Rätsel** in den Grundlagen der Physik und Philosophie.

S. M. Carroll, *Why Boltzmann brains are bad*, 2020.



Das “Boltzmann-Gehirn”-Problem

Manche kosmologische Modelle sagen viel mehr Boltzmann-Gehirne voraus als “normale” Gehirne.

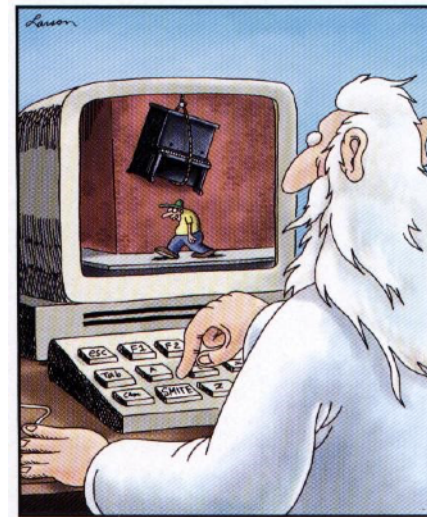
“Frage von innen”: sollte ich dann erwarten, im nächsten Moment eine ganz ungewöhnliche Beobachtung (à la BG) zu machen?

Falls “ja:” super! Kosmologen könnten dann solche Modelle ausschließen.
Die Standard-Physik “von außen” liefert aber keine Antwort auf die Frage!

Standard-Blick von außen: naiver Physikalismus

Standard-Blick von außen: naiver Physikalismus

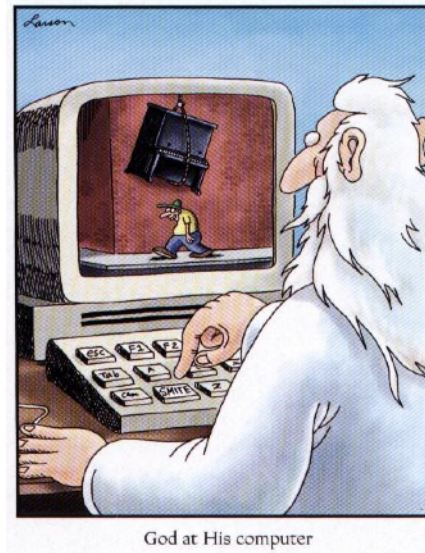
In 2048 sind Sie unheilbar krank, aber der Arzt verspricht, Sie auf einem Computer zu simulieren, wenn Sie das nächste Mal einschlafen (wobei das Original beseitigt wird).



God at His computer

Standard-Blick von außen: naiver Physikalismus

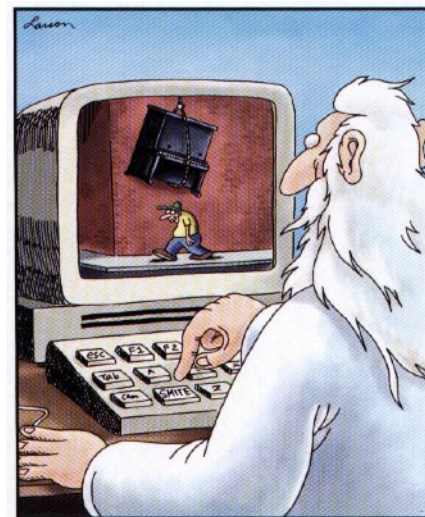
In 2048 sind Sie unheilbar krank, aber der Arzt verspricht, Sie auf einem Computer zu simulieren, wenn Sie das nächste Mal einschlafen (wobei das Original beseitigt wird).



Sie: Toll, aber werde ich wirklich in der Simulation aufwachen? Verdammt, das will ich wirklich wissen! Ich habe solche Angst! Was soll ich glauben, was mit mir passieren wird?

Standard-Blick von außen: naiver Physikalismus

In 2048 sind Sie unheilbar krank, aber der Arzt verspricht, Sie auf einem Computer zu simulieren, wenn Sie das nächste Mal einschlafen (wobei das Original beseitigt wird).



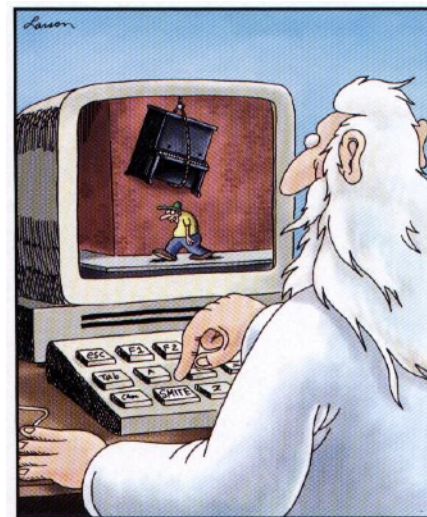
God at His computer

Sie: Toll, aber werde ich wirklich in der Simulation aufwachen? Verdammt, das will ich wirklich wissen! Ich habe solche Angst! Was soll ich glauben, was mit mir passieren wird?

Dr. Phys.: Hahaha, Sie Narr! Sie stellen eine Nicht-Frage! Alles, was es zu sagen gibt, ist, dass es hier und jetzt einen Menschen gibt (Sie), und einen Computer, der später eine Simulation von ihm ausführt. Das ist alles, was es über die Fakten der Welt zu wissen gibt. Definieren Sie doch die Aussage, über deren Wahrheitswert Sie sich unsicher sind!

Standard-Blick von außen: naiver Physikalismus

In 2048 sind Sie unheilbar krank, aber der Arzt verspricht, Sie auf einem Computer zu simulieren, wenn Sie das nächste Mal einschlafen (wobei das Original beseitigt wird).



God at His computer

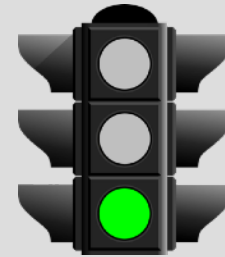
Sie: Toll, aber werde ich wirklich in der Simulation aufwachen? Verdammt, das will ich wirklich wissen! Was soll ich glauben, was mit mir passieren wird?

Dr. Phys.: Naanaha, Sie Narr! Sie stellen eine Nicht-Frage! Alles, was es zu sagen gibt, ist, wie jenseits der Maschine, und einen Computer, der später eine Simulation von ihm ausführt. Das ist alles, was es über die Fakten der Welt zu wissen gibt. Definieren Sie doch die Aussage, über die Wahrheit, die sich nicht ändern kann.

Ich lehne diese Sichtweise ab.
In allen Fällen sollte es eine Antwort auf die Frage geben "was sehe ich als nächstes?", denn diese ist fundamentaler als die Frage nach der Beschaffenheit der Welt.

0. Kurze Vorstellung

1. Was wir wissen und vermuten



1a. Experimente mit Münzen

1b. Die Quantenwelt ist **nicht lokal-realistisch**

1c. Was tun damit? -> Erzeugung sicherer Zufallszahlen

1d. In was für einer verrückten Welt leben wir, die das ermöglicht?

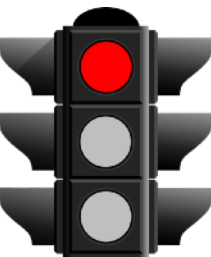
2. Worüber wir uns wundern — und was mich antreibt



2a. Vielleicht stellen wir die falschen Fragen

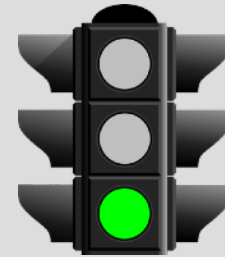
2b. Der **Blick von innen**: *“was passiert mit mir als nächstes?”*

2c. Die Suche nach einer modernen Version des Idealismus



0. Kurze Vorstellung

1. Was wir wissen und vermuten



1a. Experimente mit Münzen

1b. Die Quantenwelt ist **nicht lokal-realistisch**

1c. Was tun damit? -> Erzeugung sicherer Zufallszahlen

1d. In was für einer verrückten Welt leben wir, die das ermöglicht?

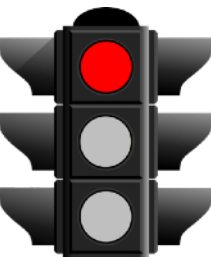
2. Worüber wir uns wundern — und was mich antreibt



2a. Vielleicht stellen wir die falschen Fragen

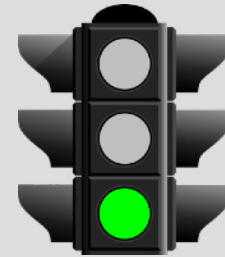
2b. Der Blick von innen: “*was passiert mit mir als nächstes?*”

2c. Die Suche nach einer modernen Version des Idealismus



0. Kurze Vorstellung

1. Was wir wissen und vermuten



1a. Experimente mit Münzen

1b. Die Quantenwelt ist **nicht lokal-realistisch**

1c. Was tun damit? -> Erzeugung sicherer Zufallszahlen

1d. In was für einer verrückten Welt leben wir, die das ermöglicht?

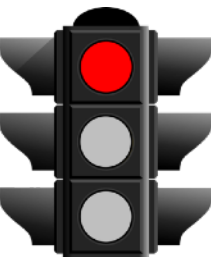
2. Worüber wir uns wundern — und was mich antreibt



2a. Vielleicht stellen wir die falschen Fragen

2b. Der **Blick von innen**: “*was passiert mit mir als nächstes?*”

2c. Die Suche nach einer modernen Version des Idealismus



2c. Die Suche nach einer modernen Version des Idealismus

2c. Die Suche nach einer modernen Version des Idealismus

Gesucht: einheitlicher Ansatz, der im Prinzip in **allen** Situationen die Frage
“Was sehe ich wahrscheinlich als nächstes?”
beantwortet, und sich in Standard-Situationen auf die QM reduziert.

2c. Die Suche nach einer modernen Version des Idealismus

Gesucht: einheitlicher Ansatz, der im Prinzip in **allen** Situationen die Frage
“Was sehe ich wahrscheinlich als nächstes?”
beantwortet, und sich in Standard-Situationen auf die QM reduziert.

Idealismus [idea'lismus]

Philosophische Positionen, in denen der Geist, die Vernunft oder das Bewusstsein primär das eigentlich Wirkliche sind, die Materie ist sekundär und eine Erscheinungsform derselben.

2c. Die Suche nach einer modernen Version des Idealismus

Gesucht: einheitlicher Ansatz, der im Prinzip in **allen** Situationen die Frage
“Was sehe ich wahrscheinlich als nächstes?”
beantwortet, und sich in Standard-Situationen auf die QM reduziert.

Idealismus [idea'lismus]

Philosophische Positionen, in denen der Geist, die Vernunft oder das Bewusstsein primär das eigentlich Wirkliche sind, die Materie ist sekundär und eine Erscheinungsform derselben.



Hier: “Geist” ersetzt durch **rigorose** mathematische,
informationstheoretische Definitionen.

Irrelevant: Qualia, Bewusstsein, was wir glauben oder wollen.

2c. Die Suche nach einer modernen Version des Idealismus

Gesucht: einheitlicher Ansatz, der im Prinzip in **allen** Situationen die Frage
“*Was sehe ich wahrscheinlich als nächstes?*”
beantwortet, und sich in Standard-Situationen auf die QM reduziert.

Idealismus [idea'lismus]

Philosophische Positionen, in denen der Geist, die Vernunft oder das Bewusstsein primär das eigentlich Wirkliche sind, die Materie ist sekundär und eine Erscheinungsform derselben.



Hier: “Geist” ersetzt durch **rigorose** mathematische,
informationstheoretische Definitionen.

Irrelevant: Qualia, Bewusstsein, was wir glauben oder wollen.

Ziel: indirekte Ableitung der QM; Beantwortung der obigen Frage auch in Situationen wie Wigner’s Freund, Boltzmann-Gehirne, Computer-Simulation von Beobachtern, Duplikation (wie in “Star Trek”), Tod.

Algorithmischer Idealismus

Algorithmischer Idealismus

...in Arbeit als Teil meiner aktuellen Forschung. Gewagtes Neuland!
Bei Interesse siehe hier (und neues Paper im Dezember 2024):

mpmueller.net/ai

Algorithmischer Idealismus

...in Arbeit als Teil meiner aktuellen Forschung. Gewagtes Neuland!
Bei Interesse siehe hier (und neues Paper im Dezember 2024):

mpmueller.net/ai

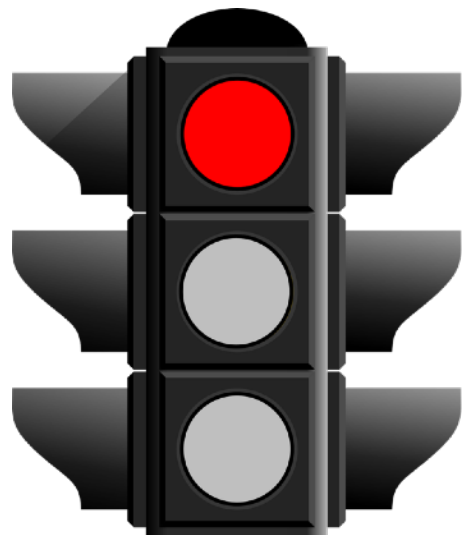
Für mich als Forscher unheimlich spannend (siehe Ziele).
Aber auch äußerst kontraintuitiv, ungewohnt und mathematisch abstrakt,
daher recht schwer zu vermitteln. Das macht es schwierig für mich.

Algorithmischer Idealismus

...in Arbeit als Teil meiner aktuellen Forschung. Gewagtes Neuland!
Bei Interesse siehe hier (und neues Paper im Dezember 2024):

mpmueller.net/ai

Für mich als Forscher unheimlich spannend (siehe Ziele).
Aber auch äußerst kontraintuitiv, ungewohnt und mathematisch abstrakt,
daher recht schwer zu vermitteln. Das macht es schwierig für mich.



Glauben Sie mir (ab jetzt) nichts einfach so:
vielleicht stelle ich, genau wie meine Kinder, eine fruchtlose
Frage ohne Antwort (*“was sehe ich wohl als nächstes?”*) —
möglicherweise aber auch nicht, und dann ist die
Antwort höchst relevant!

“Was sehe ich wahrscheinlich als nächstes?”

- Parfit's Teletransporter-Paradoxon
- Wigners Freund
- Das Boltzmann-Gehirn-Problem



“Was sehe ich wahrscheinlich als nächstes?”

- **Computersimulation von Beobachtern**
- **Parfit's Teletransporter-Paradoxon**
- **Wigners Freund**
- **Das Boltzmann-Gehirn-Problem**

“Was sehe ich wahrscheinlich als nächstes?”

- **Computersimulation von Beobachtern**
- **Parfit's Teletransporter-Paradoxon**
- **Wigners Freund**
- **Das Boltzmann-Gehirn-Problem**

**exotisches
Regime**

“Was sehe ich wahrscheinlich als nächstes?”

- **Computersimulation von Beobachtern**
- **Parfit's Teletransporter-Paradoxon**
- **Wigners Freund**
- **Das Boltzmann-Gehirn-Problem**

exotisches
Regime

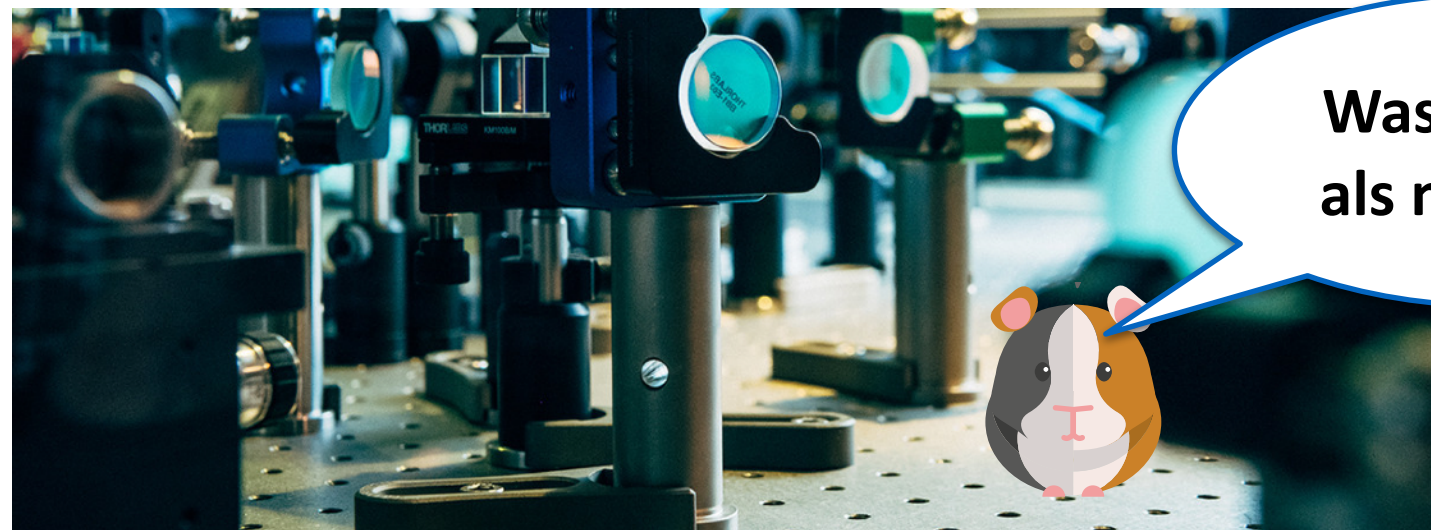
- **Experimente im Labor**

“Was sehe ich wahrscheinlich als nächstes?”

- **Computersimulation von Beobachtern**
- **Parfit's Teletransporter-Paradoxon**
- **Wigners Freund**
- **Das Boltzmann-Gehirn-Problem**

exotisches
Regime

- **Experimente im Labor**



“Was sehe ich wahrscheinlich als nächstes?”

- **Computersimulation von Beobachtern**
- **Parfit's Teletransporter-Paradoxon**
- **Wigners Freund**
- **Das Boltzmann-Gehirn-Problem**

exotisches
Regime

- **Experimente im Labor**

“Was sehe ich wahrscheinlich als nächstes?”

- **Computersimulation von Beobachtern**
- **Parfit's Teletransporter-Paradoxon**
- **Wigners Freund**
- **Das Boltzmann-Gehirn-Problem**

exotisches
Regime

- **Experimente im Labor**
- **Astronomische Beobachtungen**

“Was sehe ich wahrscheinlich als nächstes?”

- **Computersimulation von Beobachtern**
- **Parfit's Teletransporter-Paradoxon**
- **Wigners Freund**
- **Das Boltzmann-Gehirn-Problem**

**exotisches
Regime**

- **Experimente im Labor**
- **Astronomische Beobachtungen**
- **...**

**empirisches
Regime**

“Was sehe ich wahrscheinlich als nächstes?”

- **Computersimulation von Beobachtern**
- **Parfit's Teletransporter-Paradoxon**
- **Wigners Freund**
- **Das Boltzmann-Gehirn-Problem**

exotisches
Regime

- **Experimente im Labor**
- **Astronomische Beobachtungen**
- **...**

**Physik
anwendbar!**

empirisches
Regime

“Was sehe ich wahrscheinlich als nächstes?”

- **Computersimulation von Beobachtern**
- **Parfit's Teletransporter-Paradoxon**
- **Wigners Freund**
- **Das Boltzmann-Gehirn-Problem**

**Philosophie
des Geistes?**

**exotisches
Regime**

- **Experimente im Labor**
- **Astronomische Beobachtungen**
- **...**

**Physik
anwendbar!**

**empirisches
Regime**

“Was sehe ich wahrscheinlich als nächstes?”

- **Computersimulation von Beobachtern**
- **Parfit's Teletransporter-Paradoxon**
- **Wigners Freund**
- **Das Boltzmann-Gehirn-Problem**

**Philosophie
des Geistes?**

exotisches
Regime

Aber diese tauchten in der Physik auf!

- **Experimente im Labor**
- **Astronomische Beobachtungen**
- ...

**Physik
anwendbar!**

empirisches
Regime

“Was sehe ich wahrscheinlich als nächstes?”

- **Computersimulation von Beobachtern**
- **Parfit's Teletransporter-Paradoxon**
- **Wigners Freund**
- **Das Boltzmann-Gehirn-Problem**

**Philosophie
des Geistes?**

**exotisches
Regime**

- **Experimente im Labor**
- **Astronomische Beobachtungen**
- **...**

**Physik
anwendbar!**

**empirisches
Regime**

“Was sehe ich wahrscheinlich als nächstes?”

- **Computersimulation von Beobachtern**
- **Parfit's Teletransporter-Paradoxon**
- **Wigners Freund**
- **Das Boltzmann-Gehirn-Problem**

**Philosophie
des Geistes?**

exotisches
Regime

- **Experimente im Labor**
- **Astronomische Beobachtungen**
- **...**

**Physik
anwendbar!**

empirisches
Regime

Ziel: ein vereinheitlichter Ansatz

- **Computersimulation von Beobachtern**
- **Parfit's Teletransporter-Paradoxon**
- **Wigners Freund**
- **Das Boltzmann-Gehirn-Problem**
- **Experimente im Labor**
- **Astronomische Beobachtungen**
- **...**

**Vereinheitlichter
Ansatz**

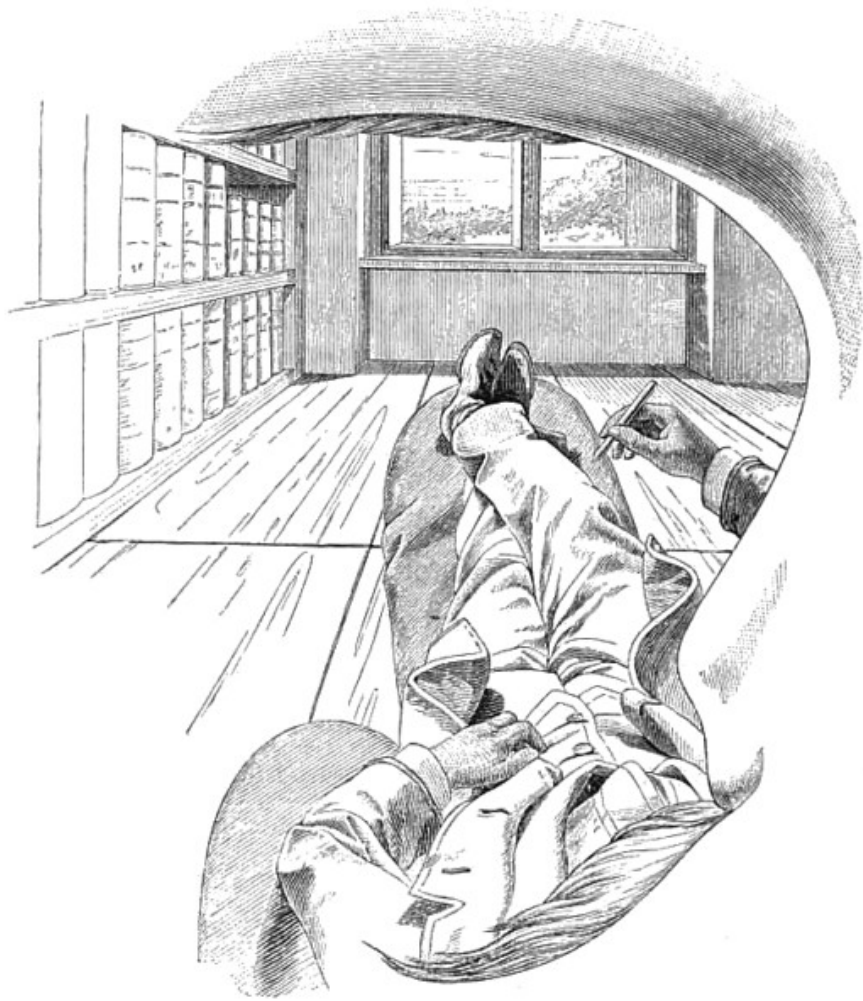
exotisches
Regime

empirisches
Regime

Algorithmischer Idealismus

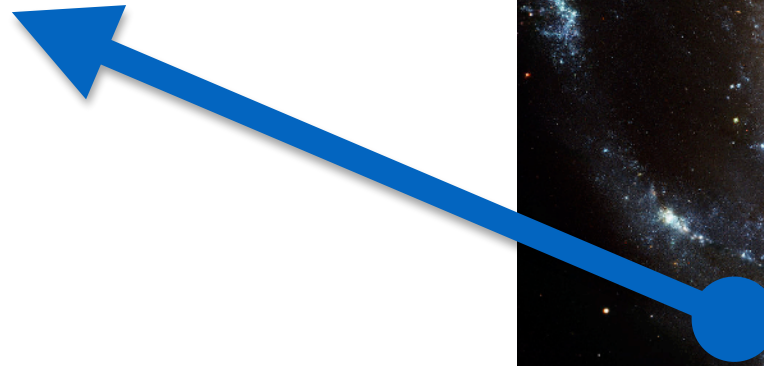
Algorithmischer Idealismus

Übliche Weltsicht:



Figur 1.

Gesetze
der Physik wirken
hier!



Algorithmischer Idealismus

Übliche Weltsicht:



Figur 1.

Gesetze
der Physik wirken
hier!



“**Selbstzustand**” (alles was ich
jetzt wahrnehme und erinnere,
bewusst oder nicht)

folgt aus

Fakten (und Zeitentwicklung)
der physikalischen Welt

Algorithmischer Idealismus

Übliche Weltsicht:



Figur 1.



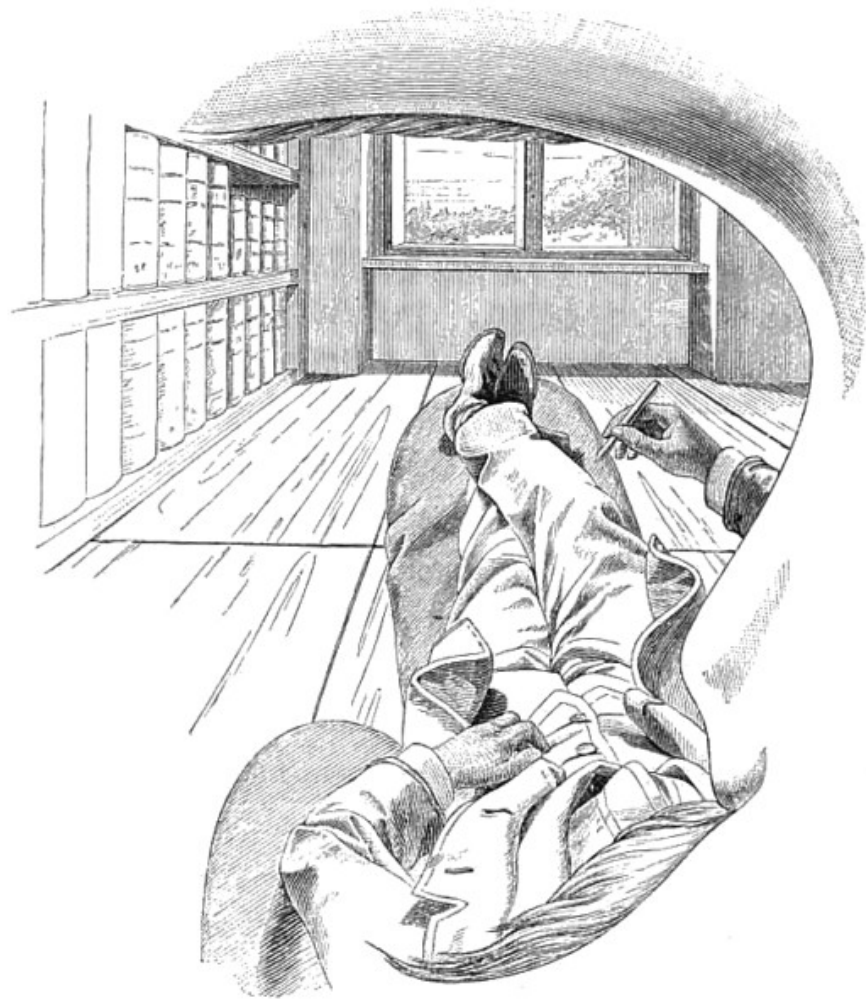
Gesetze
der Physik wirken
hier!

“**Selbstzustand**” (alles was ich
jetzt wahrnehme und erinnere,
bewusst oder nicht) **folgt aus**

Fakten (und Zeitentwicklung)
der physikalischen Welt

Problem: nur eingeschränkt anwendbar (siehe exotische Rätsel) und
schwer mit der Quantentheorie in Einklang zu bringen.

Umkehrung der üblichen Sichtweise

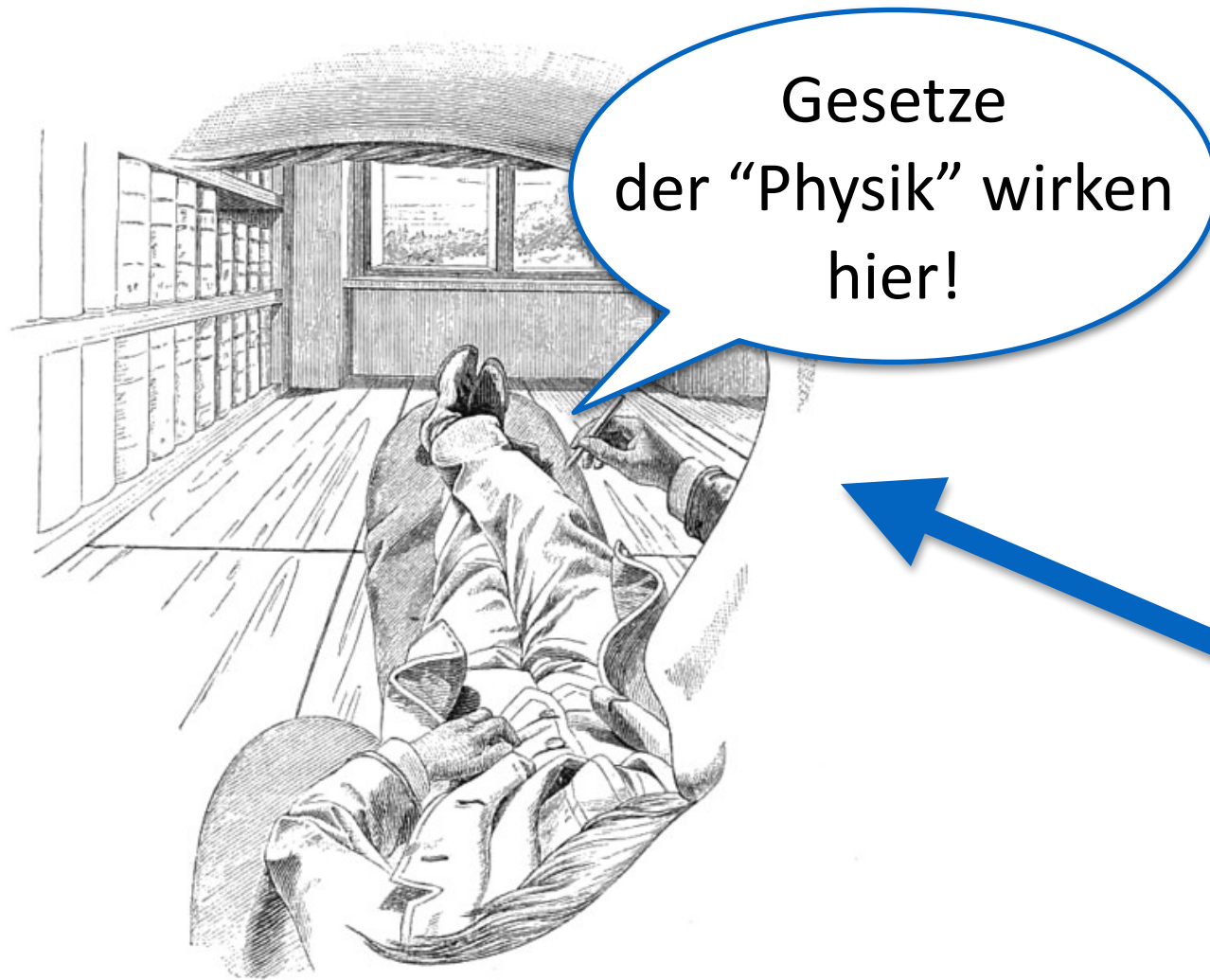


Figur 1.



Gesetze
der Physik wirken
hier!

Umkehrung der üblichen Sichtweise



Figur 1.



Umkehrung der üblichen Sichtweise



Figur 1.



Umkehrung der üblichen Sichtweise



Figur 1.



$$\mathbf{P}(y|x)$$

x : Selbstzustand jetzt

y : Selbstzustand danach

Algorithmische Wahrscheinlichkeit

Umkehrung der üblichen Sichtweise



Figur 1.

$$\mathbf{P}(y|x)$$

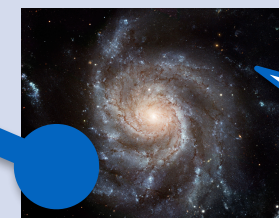
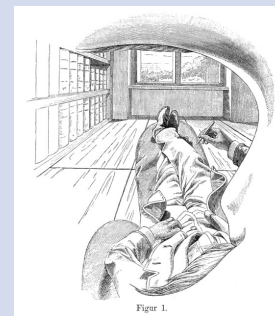
x : Selbstzustand jetzt

y : Selbstzustand danach

Algorithmische Wahrscheinlichkeit

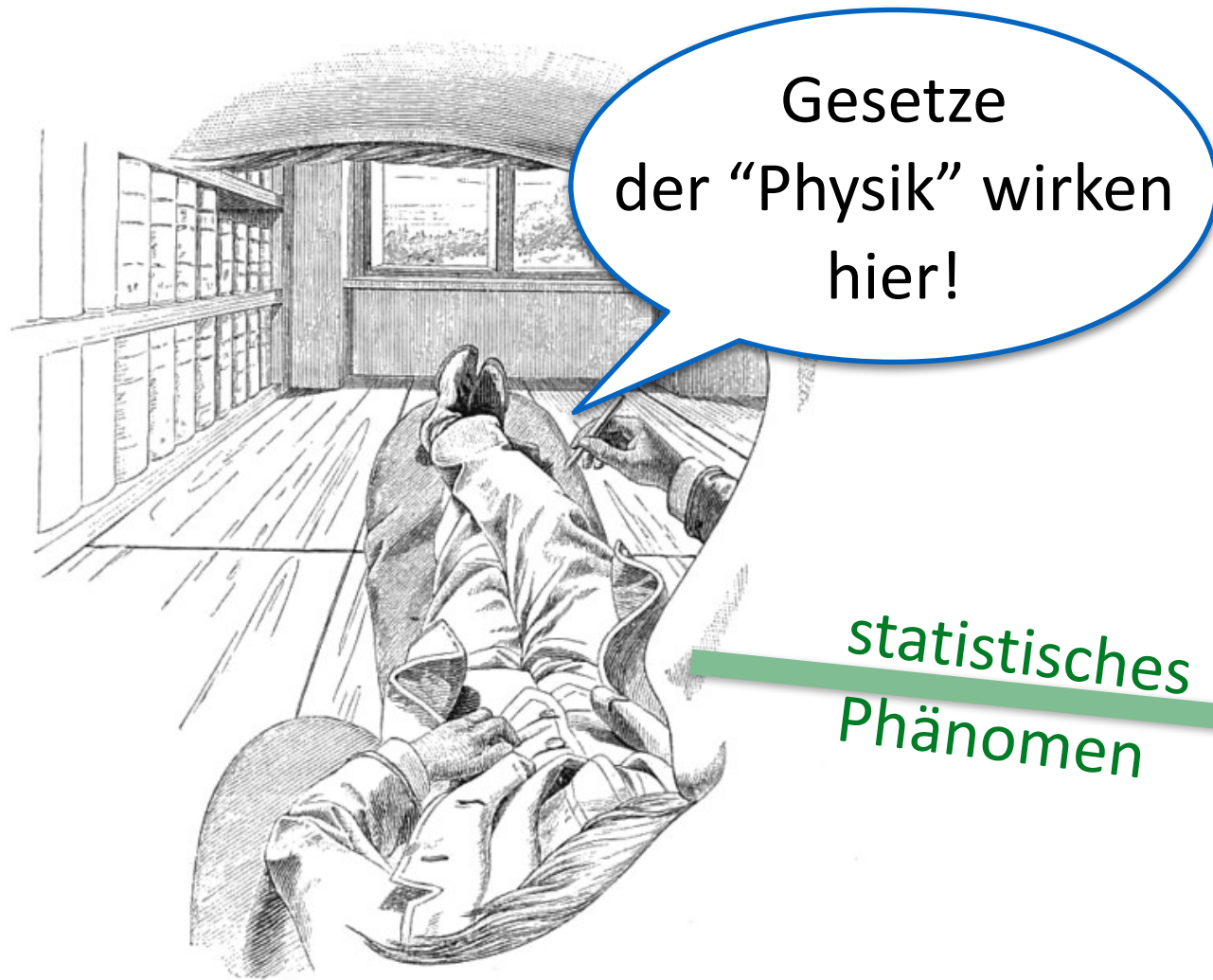


Übliche Sicht als gute Näherung:
Langfristig ist die Statistik so ähnlich wie



einfache
Gesetze

Umkehrung der üblichen Sichtweise



Figur 1.

statistisches
Phänomen



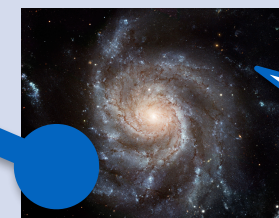
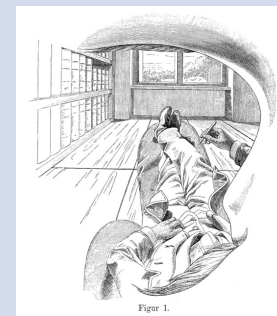
$$\mathbf{P}(y|x)$$

x : Selbstzustand jetzt

y : Selbstzustand danach

Algorithmische Wahrscheinlichkeit

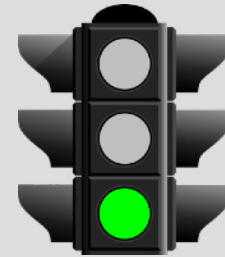
Übliche Sicht als gute Näherung:
Langfristig ist die Statistik so ähnlich wie



einfache
Gesetze

0. Kurze Vorstellung

1. Was wir wissen und vermuten



1a. Experimente mit Münzen

1b. Die Quantenwelt ist **nicht lokal-realistisch**

1c. Was tun damit? -> Erzeugung sicherer Zufallszahlen

1d. In was für einer verrückten Welt leben wir, die das ermöglicht?

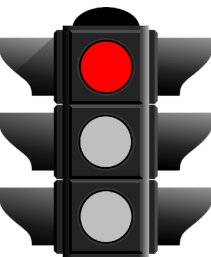
2. Worüber wir uns wundern — und was mich antreibt



2a. Vielleicht stellen wir die falschen Fragen

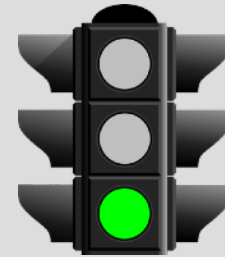
2b. Der **Blick von innen**: “*was passiert mit mir als nächstes?*”

2c. Die Suche nach einer modernen Version des Idealismus



0. Kurze Vorstellung

1. Was wir wissen und vermuten



1a. Experimente mit Münzen

1b. Die Quantenwelt ist **nicht lokal-realistisch**

1c. Was tun damit? -> Erzeugung sicherer Zufallszahlen

1d. In was für einer verrückten Welt leben wir, die das ermöglicht?

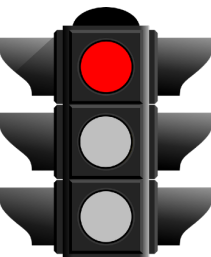
2. Worüber wir uns wundern — und was mich antreibt



2a. Vielleicht stellen wir die falschen Fragen

2b. Der **Blick von innen**: “*was passiert mit mir als nächstes?*”

2c. Die Suche nach einer modernen Version des Idealismus



Zusammenfassung

- **Unsere (Quanten)-Welt ist nicht lokal-realistisch.**
Mit Quantenmechanik können Sie Münzspiele mit höherer Wahrscheinlichkeit gewinnen als mit allen Mitteln der Alltagswelt.
- Konsequenz: absolut sichere Zufallszahlen und Verschlüsselung.
- Wir wissen **nicht**, wie unsere Welt das macht. Viele Welten?
Überlichtschnelle Informationsübertragung?
Aber vielleicht stellen wir die falschen Fragen.
- In gewisser Weise sagt uns die QM, dass der “**Blick von innen**” (der Beobachter) wesentlich ist. Kein Konsens darüber, inwiefern genau!
- Mein eigener Ansatz: “was sehe ich als nächstes?” als fundamentale Frage, um mehrere Rätsel der Physik und Philosophie anzugehen.

Zusammenfassung

- **Unsere (Quanten)-Welt ist nicht lokal-realistisch.**
Mit Quantenmechanik können Sie Münzspiele mit höherer Wahrscheinlichkeit gewinnen als mit allen Mitteln der Alltagswelt.
- Konsequenz: absolut sichere Zufallszahlen und Verschlüsselung.
- Wir wissen **nicht**, wie unsere Welt das macht. Viele Welten?
Überlichtschnelle Informationsübertragung?
Aber vielleicht stellen wir die falschen Fragen.
- In gewisser Weise sagt uns die QM, dass der “**Blick von innen**” (der Beobachter) wesentlich ist. Kein Konsens darüber, inwiefern genau!
- Mein eigener Ansatz: “was sehe ich als nächstes?” als fundamentale Frage, um mehrere Rätsel der Physik und Philosophie anzugehen.

Vielen Dank für Ihr Interesse!

mpmueller.net