

:

Toeval en/of determinisme in de natuurwetenschap (Deel II)

Hans Maassen

28 januari 2010

HOVO-cursus

Dramatis personae

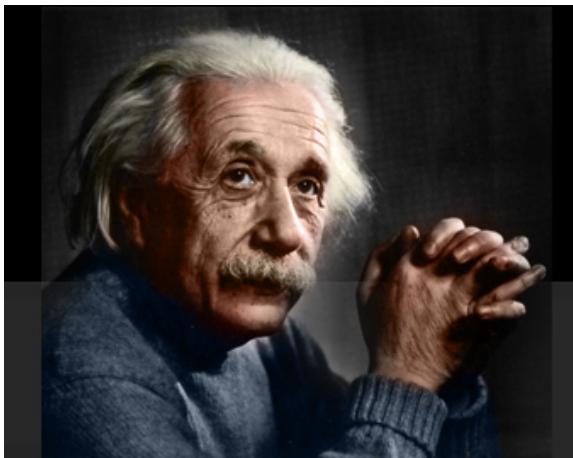


Pierre Siméon de Laplace

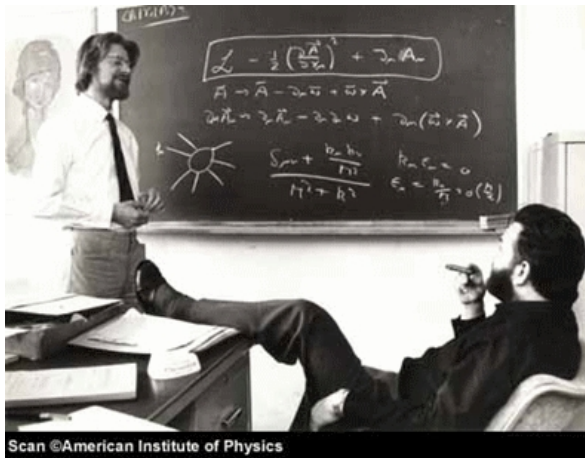
“Wij kunnen de huidige toestand van het universum beschouwen als het gevolg van zijn verleden, en de oorzaak van zijn toekomst.

“Wij kunnen de huidige toestand van het universum beschouwen als het gevolg van zijn verleden, en de oorzaak van zijn toekomst. Een intelligentie die op zeker ogenblik alle krachten zou kennen die de natuur in beweging brengen, en alle posities van alle objecten waaruit de natuur is samengesteld, als deze intelligentie ook uitgestrekt genoeg zou zijn om deze gegevens aan analyse te onderwerpen, dan zou zij in een enkele formule de bewegingen omvatten van de grootste lichamen in het heelal tot die van het kleinste atoom; voor zo'n intelligentie zou niets onzeker zijn, en toekomst en verleden zouden aanwezig zijn voor haar ogen.”

(Pierre Siméon de Laplace, essai philosophique sur les probabilités, 1774.)



Ontdekker van verstrengeling (Einstein-Podolsky-Rosen-correlatie)



Ontdekker van ongelijkheid, gevioleerd door EPR-correlaties

“Als iemand er ooit in slaagt, hiermee signalen te sturen, sneller dan het licht, dan hoop ik dat hij dat de 'Bell-Telegraaf' noemt!”



Experimentator

Bell: "Hebt U een vaste baan?"

De quantummechanica is een zeer succesvolle theorie, die gebruik maakt van toeval. Toch is de vraag of we uiteindelijk uitkomen op een **deterministische** theorie nog steeds controversieel.

De quantummechanica is een zeer succesvolle theorie, die gebruik maakt van toeval. Toch is de vraag of we uiteindelijk uitkomen op een **deterministische** theorie nog steeds controversieel.

Nobelprijswinnaar Gerard 't Hooft is op zoek naar zo'n theorie op de Planckschaal ($\approx 10^{-35} m$).

De quantummechanica is een zeer succesvolle theorie, die gebruik maakt van toeval. Toch is de vraag of we uiteindelijk uitkomen op een **deterministische** theorie nog steeds controversieel.

Nobelprijswinnaar Gerard 't Hooft is op zoek naar zo'n theorie op de Planckschaal ($\approx 10^{-35} m$).

Hij is niet van plan daarbij Einstein's **principe van localiteit** op te geven, het principe dat geen enkel signaal sneller kan reizen dan het licht.

De quantummechanica is een zeer succesvolle theorie, die gebruik maakt van toeval. Toch is de vraag of we uiteindelijk uitkomen op een **deterministische** theorie nog steeds controversieel.

Nobelprijswinnaar Gerard 't Hooft is op zoek naar zo'n theorie op de Planckschaal ($\approx 10^{-35} m$).

Hij is niet van plan daarbij Einstein's **principe van localiteit** op te geven, het principe dat geen enkel signaal sneller kan reizen dan het licht.

De heersende mening onder natuurkundigen is echter dat zo'n theorie niet langer mogelijk is. Ik zal proberen U hiervan te overtuigen.

Het argument: Zulke theorieën kunnen nooit Aspect's experiment uit 1982 verklaren, waarin de ongelijkheid van Bell werd gebroken.

Het argument: Zulke theorieën kunnen nooit Aspect's experiment uit 1982 verklaren, waarin de ongelijkheid van Bell werd gebroken.

Het schenden van deze ongelijkheden wordt wel quantum-correlatie genoemd, of verstrengeling. Het is een soort

TOEVAL-PLUS

Het argument: Zulke theorieën kunnen nooit Aspect's experiment uit 1982 verklaren, waarin de ongelijkheid van Bell werd gebroken.

Het schenden van deze ongelijkheden wordt wel quantum-correlatie genoemd, of verstrengeling. Het is een soort

TOEVAL-PLUS

Toeval dat op geen enkele random-generator gesimuleerd kan worden.

Een crash-course in quantummechanica

Een crash-course in quantummechanica

Licht bestaat uit kleine deeltjes (**fotonen**), die zich met grote snelheid bewegen.

Een crash-course in quantummechanica

Licht bestaat uit kleine deeltjes (**fotonen**), die zich met grote snelheid bewegen.

Elk foton heeft een **polarisatierichting**, die loodrecht staat op zijn bewegingsrichting

Een crash-course in quantummechanica

Licht bestaat uit kleine deeltjes (**fotonen**), die zich met grote snelheid bewegen.

Elk foton heeft een **polarisatierichting**, die loodrecht staat op zijn bewegingsrichting

Als je een foton naar zijn polarisatierichting vraagt, antwoordt het altijd uitsluitend " **Ja**, mijn polarisatie staat in de aangegeven richting" of " **Nee**, hij staat er loodrecht op".

de \cos^2 -regel

de \cos^2 -regel

Als een foton polarisatierichting α heeft, komt het ongeschonden door een filter heen dat ook in die richting staat.

de \cos^2 -regel

Als een foton polarisatierichting α heeft, komt het ongeschonden door een filter heen dat ook in die richting staat.

Door een filter loodrecht op de richting α wordt het geabsorbeerd.

de \cos^2 -regel

Als een foton polarisatierichting α heeft, komt het ongeschonden door een filter heen dat ook in die richting staat.

Door een filter loodrecht op de richting α wordt het geabsorbeerd.

(Het foton geeft "antwoord" 'ja' of 'nee' op de "vraag" van het filter.)

de \cos^2 -regel

Als een foton polarisatierichting α heeft, komt het ongeschonden door een filter heen dat ook in die richting staat.

Door een filter loodrecht op de richting α wordt het geabsorbeerd.

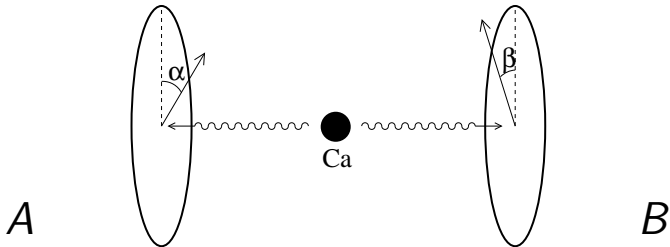
(Het foton geeft "antwoord" 'ja' of 'nee' op de "vraag" van het filter.)

Voor elke andere filterrichting ("vraag") β hangt het antwoord van het toeval af: de kans op 'ja' wordt gegeven door de \cos^2 -wet uit de optica:

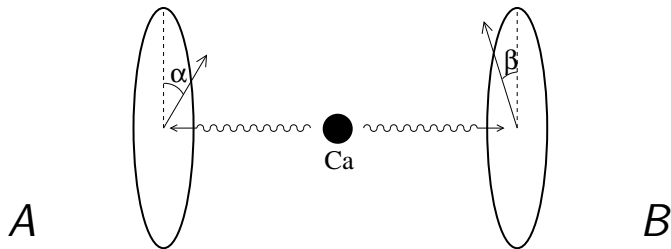
$$\text{Kans} = \cos^2(\alpha - \beta) .$$

Verstrengelde fotonen

Verstrengelde fotonen

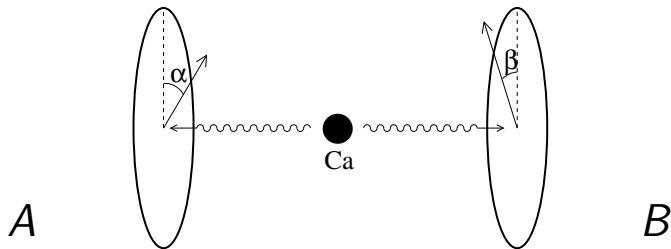


Verstrengelde fotonen



Het Calcium-atoom zendt twee fotonen uit in tegengestelde richtingen: één naar de linkervleugel A en één naar de rechtervleugel B van het experiment.

Verstrengelde fotonen



Het Calcium-atoom zendt twee fotonen uit in tegengestelde richtingen: één naar de linkervleugel A en één naar de rechtervleugel B van het experiment.

De twee fotonen hebben onderling loodrechte polarisaties.

De \sin^2 -wet

De \sin^2 -wet

Als je de fotonen links en rechts allebei vraagt naar hun polarisatie in één bepaalde richting, geven ze met zekerheid **twee verschillende** antwoorden. (Als de één "ja" zegt, zegt de ander "nee".)

De \sin^2 -wet

Als je de fotonen links en rechts allebei vraagt naar hun polarisatie in één bepaalde richting, geven ze met zekerheid **twee verschillende** antwoorden. (Als de één "ja" zegt, zegt de ander "nee".)

Als A haar foton vraagt naar diens polarisatie in de richting α , en B zijn foton vraagt naar diens polarisatie in de richting β , dan is de kans op twee gelijke antwoorden gegeven door de **\sin^2 -wet**:

$$\text{Kans op ja-ja of nee-nee} = \sin^2(\alpha - \beta) .$$

De clou

De clou

Deze \sin^2 -wet kan door geen enkele **lokale realistische** theorie worden verklaard.

De clou

Deze \sin^2 -wet kan door geen enkele **lokale realistische** theorie worden verklaard.

"Lokaal" houdt hier in: het foton links weet niet wat er rechts gevraagd wordt: de fotonen "kijken elkaar niet in de kaart".

De clou

Deze \sin^2 -wet kan door geen enkele **lokale realistische** theorie worden verklaard.

"**Lokaal**" houdt hier in: het foton links weet niet wat er rechts gevraagd wordt: de fotonen "kijken elkaar niet in de kaart".

"**Realistisch**" betekent hier: de theorie heeft ook een antwoord paraat op vragen die niet gesteld worden.

De clou

Deze \sin^2 -wet kan door geen enkele **lokale realistische** theorie worden verklaard.

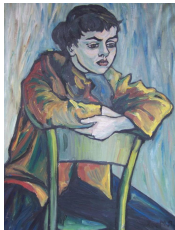
"**Lokaal**" houdt hier in: het foton links weet niet wat er rechts gevraagd wordt: de fotonen "kijken elkaar niet in de kaart".

"**Realistisch**" betekent hier: de theorie heeft ook een antwoord paraat op vragen die niet gesteld worden.

Een **deterministische** theorie is automatisch realistisch.

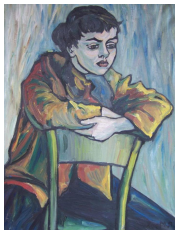
Het Bell-Spel

Het Bell-Spel



Alice

Het Bell-Spel

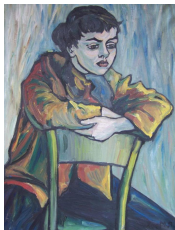


Alice



Bob

Het Bell-Spel



Alice



Bob



Het Bell-Spel



Alice



Bob



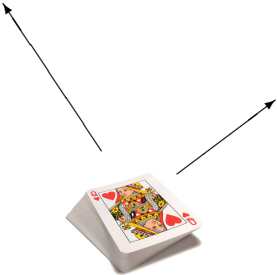
Het Bell-Spel



Alice



Bob



Het Bell-Spel



Alice

ja



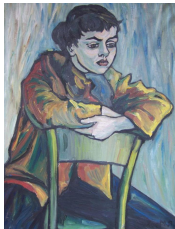
nee



Bob



Het Bell-Spel



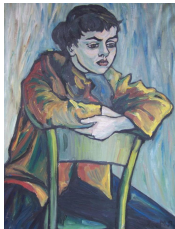
Alice



Bob



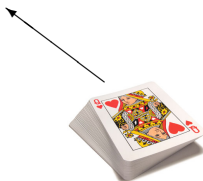
Het Bell-Spel



Alice



Bob



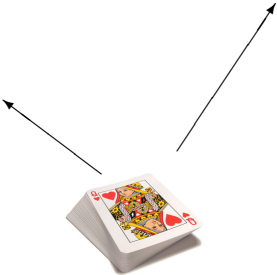
Het Bell-Spel



Alice



Bob



Het Bell-Spel



Alice



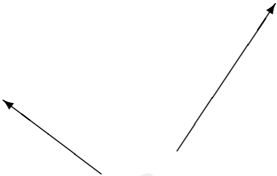
nee



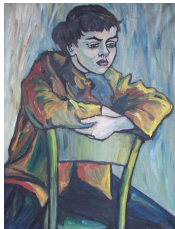
nee



Bob



Het Bell-Spel



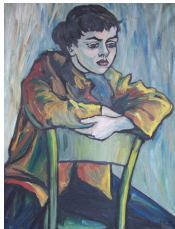
Alice



Bob



Het Bell-Spel



Alice



Bob



Het Bell-Spel



Alice



Bob



Het Bell-Spel



Alice

nee



ja



Bob



Regels:

Bij elke beurt gebeurt het volgende:

- ▶ Alice en Bob krijgen allebei een kaart (rood of zwart). In elkaars kaarten kijken of praten is verboden.
- ▶ De dobbelsteen wordt geworpen.
- ▶ Alice en Bob zeggen tegelijkertijd “ja” of “nee”.
- ▶ De kaarten komen open op tafel.

Puntentelling:

ja-nee of nee-ja :	0	punten
ja-ja of nee-nee :	{	■ — ■ : 1 punt
		■ — ■ : 1 strafpunt
		■ — ■ : 1 strafpunt
		■ — ■ : 1 strafpunt

Doel van het spel: systematisch steeds meer punten halen.

De ongelijkheid van Bell

De ongelijkheid van Bell

Alice en Bob kunnen dit spel niet winnen “met klassieke middelen”.

De ongelijkheid van Bell

Alice en Bob kunnen dit spel niet winnen “met klassieke middelen”.

Bewijs. Het enige wat de spelers kunnen doen, is van tevoren een strategie afspreken. Deze mag eventueel van het aantal ogen op de dobbelsteen afhangen.

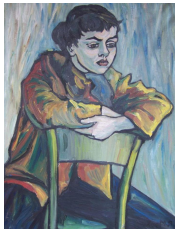
Een strategie is een specificatie van wat elk van hen zal zeggen als hij/zij een **rode**/zwarte kaart krijgt.

Echter, geen van deze strategieën wint het spel.

Ook de dobbelsteen helpt niet.

De Mislukking

De Mislukking



Alice



Bob



De Mislukking



Alice



Bob



De Mislukking



ja



Alice



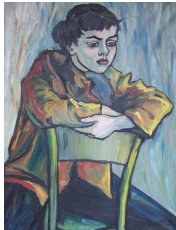
ja



Bob



De Mislukking



Alice

ja



1

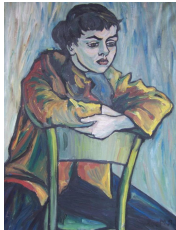
ja



Bob



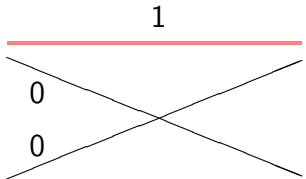
De Mislukking



Alice

ja

nee



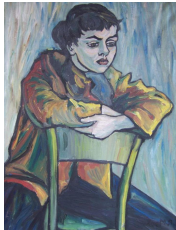
Bob

ja

nee



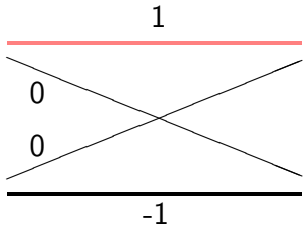
De Mislukking



Alice

ja

nee



Bob

ja

nee



De Mislukking



ja



Alice



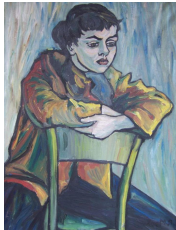
ja



Bob



De Mislukking



Alice

ja

nee

1

0

ja

ja



Bob



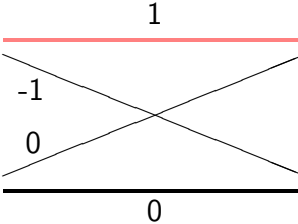
De Mislukking



Alice

ja

nee



Bob

ja

ja



De Mislukking



ja



Alice



ja



Bob



De Mislukking



ja

ja

Alice



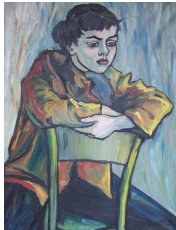
ja

ja

Bob



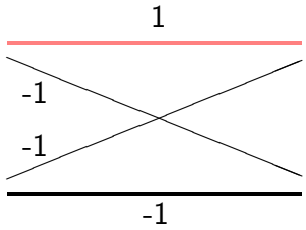
De Mislukking



Alice

ja

ja



Bob

ja

ja



De Mislukking



Alice



Bob



Maar

Als Alice en Bob een stel polarisatiefilters kopen,
en de dobbelstenen vervangen door calcium-atomen,
die ze in elke ronde van het spel een fotonenpaar laten
uitzenden,
als ze dan hun polarisatiefilters instellen volgens de kleuren van
kaarten,
en antwoord geven op de vraag: “komt mijn foton erdoor?”,
DAN WINNEN ZE!

Het succes

Het succes



Alice



Bob



Het succes



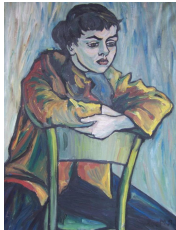
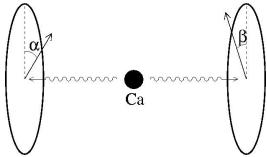
Alice



Bob



Het succes



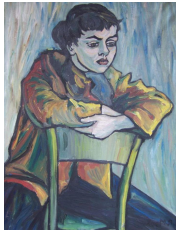
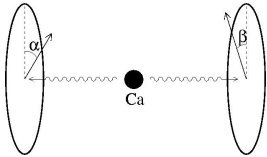
Alice



Bob



Het succes



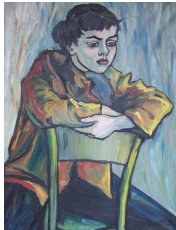
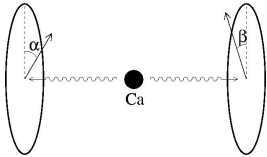
Alice



Bob



Het succes



Alice

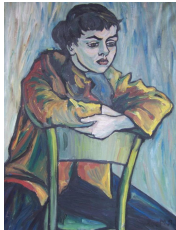
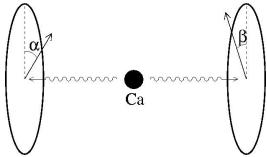
0°



Bob



Het succes



0°

1

90°

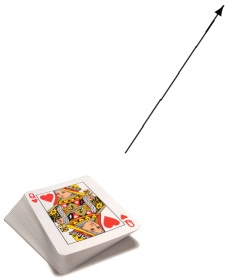


Alice

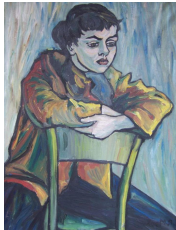
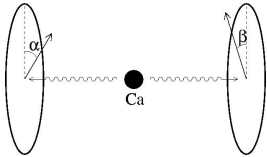


Bob

$$\sin^2(90^\circ) = 1$$



Het succes



Alice

0°



$$\sin^2(90^\circ) = 1$$

1



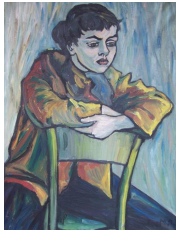
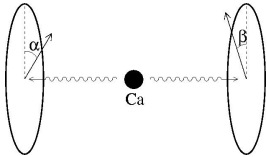
Bob

90°

30°



Het succes



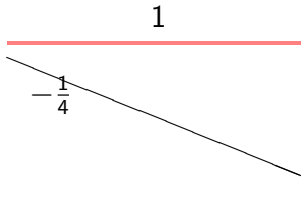
Alice

0°



$$\sin^2(90^\circ) = 1$$

$$\sin^2(30^\circ) = \frac{1}{4}$$

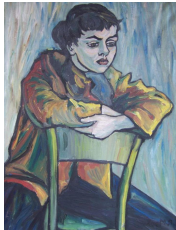
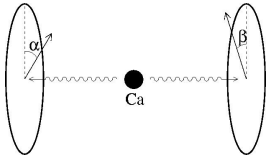


Bob

90°

30°

Het succes



Alice

0°

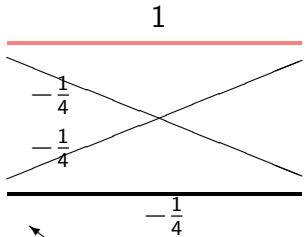
60°



Bob

90°

30°

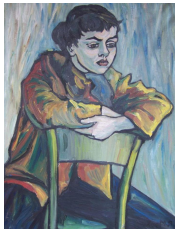
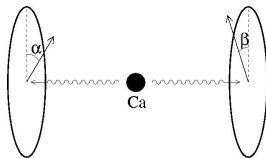


$$\sin^2(90^\circ) = 1$$

$$\sin^2(30^\circ) = \frac{1}{4}$$



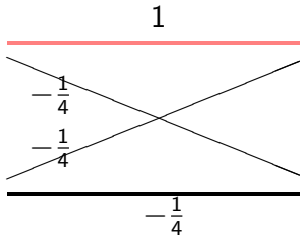
Het succes



Alice

0°

60°



90°

30°



Bob

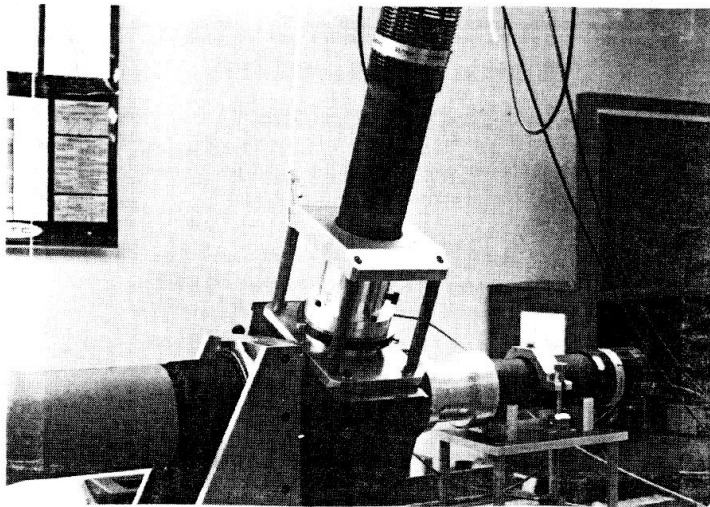
Punten per ronde: $\frac{1}{4} \left(1 - \frac{1}{4} - \frac{1}{4} - \frac{1}{4} \right) = \frac{1}{16} = 6,25\%$

Aannamen

De volgende aannamen zijn voldoende om de Bell-ongelijkheid voor het spel af te leiden.

- ▶ Lokaliteit: Alice en Bob kijken elkaar niet in de kaart.
- ▶ Onafhankelijkheid: Er bestaat een pak kaarten, statistisch onafhankelijk van elkaar en van het gebeuren aan de speltafel.
- ▶ Realisme: Alice en Bob hebben een antwoord klaar voor elke mogelijke kaartencombinatie.

Het Experiment van Orsay



Het experiment van Orsay

Vanuit een calciumbron werden paren fotonen uitgezonden. Fotonen in de linker- en de rechtervleugel van de opstelling werden geïdentificeerd als leden van hetzelfde paar door hun gelijktijdige aankomst vast te stellen.

In het experiment van 1982 werden de richtingen van de polarisatiefilters door loting gekozen *gedurende* de zeer korte tijd dat de fotonen onderweg waren, om beïnvloeding van een polarisatie-meetuitslag door het filter in de andere vleugel uit te sluiten.

Vier mogelijke posities

Naar Bell, *speakable and unspeakable in quantum mechanics*:

Vier mogelijke posities

Naar Bell, *speakable and unspeakable in quantum mechanics*:

- ▶ Het experiment is niet naar behoren gedaan.

Het spel is niet echt gewonnen.

Vier mogelijke posities

Naar Bell, *speakable and unspeakable in quantum mechanics*:

- ▶ Het experiment is niet naar behoren gedaan.

Het spel is niet echt gewonnen.

- ▶ Informatie reist WEL sneller dan het licht.

De natuur spiekt in de kaarten.

Vier mogelijke posities

Naar Bell, *speakable and unspeakable in quantum mechanics*:

- ▶ Het experiment is niet naar behoren gedaan.

Het spel is niet echt gewonnen.

- ▶ Informatie reist WEL sneller dan het licht.

De natuur spiekt in de kaarten.

- ▶ Wij zijn niet vrij om de meetinstellingen te kiezen.

De natuur wint het spel door de kaarten te manipuleren.

Alles hang met alles samen; TOEVAL BESTAAT NIET!

Vier mogelijke posities

Naar Bell, *speakable and unspeakable in quantum mechanics*:

- ▶ Het experiment is niet naar behoren gedaan.

Het spel is niet echt gewonnen.

- ▶ Informatie reist WEL sneller dan het licht.

De natuur spiekt in de kaarten.

- ▶ Wij zijn niet vrij om de meetinstellingen te kiezen.

De natuur wint het spel door de kaarten te manipuleren.

Alles hang met alles samen; TOEVAL BESTAAT NIET!

- ▶ Niet-gemeten grootheden hebben geen waarden.

Er is geen definitieve realiteit achter de schermen.