

2005
Światowy Rok
FIZYKI



EINSTEINOWSKA SESJA NAUKOWA

25–26 LISTOPADA 2005

POZNAŃ

Paradoks EPR dzisiaj

Ryszard Tanaś

Uniwersytet im. Adama Mickiewicza

Instytut Fizyki

Zakład Optyki Nieliniowej

<http://zon8.physd.amu.edu.pl/~tanas>

Plan wykładu

- 1 Słynna praca Einsteina, Podolskiego i Rosena 4
- 2 Na czym polega „paradoks” EPR 5
- 3 Implikacje 14
- 4 Korelacje klasyczne — zmienne ukryte 15
- 5 Korelacje kwantowe — nierówności Bella 21
- 6 Eksperymentalne testy 38
- 7 Technologia kwantowa 39
- 8 Kilka uwag na koniec 41

1 Słynna praca Einsteina, Podolskiego i Rosena

of lanthanum is $7/2$, hence the nuclear magnetic moment as determined by this analysis is 2.5 nuclear magnetons. This is in fair agreement with the value 2.8 nuclear magnetons determined from La III hyperfine structures by the writer and N. S. Grace.⁹

⁹ M. F. Crawford and N. S. Grace, Phys. Rev. 47, 536 (1935).

This investigation was carried out under the supervision of Professor G. Breit, and I wish to thank him for the invaluable advice and assistance so freely given. I also take this opportunity to acknowledge the award of a Fellowship by the Royal Society of Canada, and to thank the University of Wisconsin and the Department of Physics for the privilege of working here.

Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?

A. EINSTEIN, B. PODOLSKY AND N. ROSEN, *Institute for Advanced Study, Princeton, New Jersey*

(Received March 25, 1935)

In a complete theory there is an element corresponding to each element of reality. A sufficient condition for the reality of a physical quantity is the possibility of predicting it with certainty, without disturbing the system. In quantum mechanics in the case of two physical quantities described by non-commuting operators, the knowledge of one precludes the knowledge of the other. Then either (1) the description of reality given by the wave function in

quantum mechanics is not complete or (2) these two quantities cannot have simultaneous reality. Consideration of the problem of making predictions concerning a system on the basis of measurements made on another system that had previously interacted with it leads to the result that if (1) is false then (2) is also false. One is thus led to conclude that the description of reality as given by a wave function is not complete.

1.

ANY serious consideration of a physical theory must take into account the distinction between the objective reality, which is independent of any theory, and the physical concepts with which the theory operates. These concepts are intended to correspond with the objective reality, and by means of these concepts we picture this reality to ourselves.

In attempting to judge the success of a physical theory, we may ask ourselves two questions: (1) "Is the theory correct?" and (2) "Is the description given by the theory complete?" It is only in the case in which positive answers may be given to both of these questions, that the concepts of the theory may be said to be satisfactory. The correctness of the theory is judged by the degree of agreement between the conclusions of the theory and human experience. This experience, which alone enables us to make inferences about reality, in physics takes the form of experiment and measurement. It is the second question that we wish to consider here, as applied to quantum mechanics.

Whatever the meaning assigned to the term *complete*, the following requirement for a complete theory seems to be a necessary one: *every element of the physical reality must have a counterpart in the physical theory*. We shall call this the condition of completeness. The second question is thus easily answered, as soon as we are able to decide what are the elements of the physical reality.

The elements of the physical reality cannot be determined by *a priori* philosophical considerations, but must be found by an appeal to results of experiments and measurements. A comprehensive definition of reality is, however, unnecessary for our purpose. We shall be satisfied with the following criterion, which we regard as reasonable. *If, without in any way disturbing a system, we can predict with certainty (i.e., with probability equal to unity) the value of a physical quantity, then there exists an element of physical reality corresponding to this physical quantity*. It seems to us that this criterion, while far from exhausting all possible ways of recognizing a physical reality, at least provides us with one

1 Słynna praca Einsteina, Podolskiego i Rosena

of lanthanum is $7/2$, hence the nuclear magnetic moment as determined by this analysis is 2.5 nuclear magnetons. This is in fair agreement with the value 2.8 nuclear magnetons determined from La III hyperfine structures by the writer and N. S. Grace.⁹

⁹ M. F. Crawford and N. S. Grace, Phys. Rev. 47, 536 (1935)

This investigation was carried out under the supervision of Professor G. Breit, and I wish to thank him for the invaluable advice and assistance so freely given. I also take this opportunity to acknowledge the award of a Fellowship by the Royal Society of Canada, and to thank the University of Wisconsin and the Department of Physics for the privilege of working here.

Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?

MAY 15, 1935

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 47

Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?

A. EINSTEIN, B. PODOLSKY AND N. ROSEN, *Institute for Advanced Study, Princeton, New Jersey*

(Received March 25, 1935)

In a complete theory there is an element corresponding to each element of reality. A sufficient condition for the reality of a physical quantity is the possibility of predicting it with certainty, without disturbing the system. In quantum mechanics in the case of two physical quantities described by non-commuting operators, the knowledge of one precludes the knowledge of the other. Then either (1) the description of reality given by the wave function in

quantum mechanics is not complete or (2) these two quantities cannot have simultaneous reality. Consideration of the problem of making predictions concerning a system on the basis of measurements made on another system that had previously interacted with it leads to the result that if (1) is false then (2) is also false. One is thus led to conclude that the description of reality as given by a wave function is not complete.

1.

ANY serious consideration of a physical theory must take into account the distinction between the objective reality, which is independent of any theory, and the physical concepts with which the theory operates. These concepts are intended to correspond with the objective reality, and by means of these concepts we picture this reality to ourselves.

In attempting to judge the success of a physical theory, we may ask ourselves two questions: (1) "Is the theory correct?" and (2) "Is the description given by the theory complete?" It is only in the case in which positive answers may be given to both of these questions, that the concepts of the theory may be said to be satisfactory. The correctness of the theory is judged by the degree of agreement between the conclusions of the theory and human experience. This experience, which alone enables us to make inferences about reality, in physics takes the form of experiment and measurement. It is the second question that we wish to consider here, as applied to quantum mechanics.

Whatever the meaning assigned to the term *complete*, the following requirement for a complete theory seems to be a necessary one: *every element of the physical reality must have a counterpart in the physical theory*. We shall call this the condition of completeness. The second question is thus easily answered, as soon as we are able to decide what are the elements of the physical reality.

The elements of the physical reality cannot be determined by *a priori* philosophical considerations, but must be found by an appeal to results of experiments and measurements. A comprehensive definition of reality is, however, unnecessary for our purpose. We shall be satisfied with the following criterion, which we regard as reasonable. *If, without in any way disturbing a system, we can predict with certainty (i.e., with probability equal to unity) the value of a physical quantity, then there exists an element of physical reality corresponding to this physical quantity*. It seems to us that this criterion, while far from exhausting all possible ways of recognizing a physical reality, at least provides us with one

1 Słynna praca Einsteina, Podolskiego i Rosena

of lanthanum is $7/2$, hence the nuclear magnetic moment as determined by this analysis is 2.5 nuclear magnetons. This is in fair agreement with the value 2.8 nuclear magnetons determined from La III hyperfine structures by the writer and N. S. Grace.⁹

⁹ M. F. Crawford and N. S. Grace, Phys. Rev. 47, 536 (1935)

This investigation was carried out under the supervision of Professor G. Breit, and I wish to thank him for the invaluable advice and assistance so freely given. I also take this opportunity to acknowledge the award of a Fellowship by the Royal Society of Canada, and to thank the University of Wisconsin and the Department of Physics for the privilege of working here.

Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?

MAY 15, 1935

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 47

Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?

A. EINSTEIN, B. PODOLSKY AND N. ROSEN, *Institute for Advanced Study, Princeton, New Jersey*

(Received March 25, 1935)

In a complete theory there is an element corresponding to each element of reality. A sufficient condition for the reality of a physical quantity is the possibility of predicting it with certainty, without disturbing the system. In quantum mechanics in the case of two physical quantities described by non-commuting operators, the knowledge of one precludes the knowledge of the other. Then either (1) the description of reality given by the wave function in

quantum mechanics is not complete or (2) these two quantities cannot have simultaneous reality. Consideration of the problem of making predictions concerning a system on the basis of measurements made on another system that had previously interacted with it leads to the result that if (1) is false then (2) is also false. One is thus led to conclude that the description of reality as given by a wave function is not complete.

1.

ANY serious consideration of a physical theory must take into account the distinction between the objective reality, which is independent of any theory, and the physical concepts with which the theory operates. These concepts are intended to correspond with the objective reality, and by means of these concepts we picture this reality to ourselves.

In attempting to judge the success of a physical theory, we may ask ourselves two questions: (1) "Is the theory correct?" and (2) "Is the description given by the theory complete?" It is only in the case in which positive answers may be given to both of these questions, that the concepts of the theory may be said to be satisfactory. The correctness of the theory is judged by the degree of agreement between the conclusions of the theory and human experience. This experience, which alone enables us to make inferences about reality, in physics takes the form of experiment and measurement. It is the second question that we wish to consider here, as applied to quantum mechanics.

Whatever the meaning assigned to the term *complete*, the following requirement for a complete theory seems to be a necessary one: *every element of the physical reality must have a counterpart in the physical theory*. We shall call this the *condition of completeness*. The second question is thus easily answered, as soon as we are able to decide what are the elements of the physical reality.

The elements of the physical reality cannot be determined by *a priori* philosophical considerations, but must be found by an appeal to results of experiments and measurements. A comprehensive definition of reality is, however, unnecessary for our purpose. We shall be satisfied with the following criterion, which we regard as reasonable. *If, without in any way disturbing a system, we can predict with certainty (i.e., with probability equal to unity) the value of a physical quantity, then there exists an element of physical reality corresponding to this physical quantity*. It seems to us that this criterion, while far from exhausting all possible ways of recognizing a physical reality, at least provides us with one

... every element of the physical reality must have a counterpart in the physical theory.

We shall call this **the condition of completeness**

1 Słynna praca Einsteina, Podolskiego i Rosena

of lanthanum is $7/2$, hence the nuclear magnetic moment as determined by this analysis is 2.5 nuclear magnetons. This is in fair agreement with the value 2.8 nuclear magnetons determined from La III hyperfine structures by the writer and N. S. Grace.⁹

⁹ M. F. Crawford and N. S. Grace, Phys. Rev. 47, 536 (1935)

This investigation was carried out under the supervision of Professor G. Breit, and I wish to thank him for the invaluable advice and assistance so freely given. I also take this opportunity to acknowledge the award of a Fellowship by the Royal Society of Canada, and to thank the University of Wisconsin and the Department of Physics for the privilege of working here.

Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?

MAY 15, 1935

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 47

Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?

A. EINSTEIN, B. PODOLSKY AND N. ROSEN, *Institute for Advanced Study, Princeton, New Jersey*

(Received March 25, 1935)

In a complete theory there is an element corresponding to each element of reality. A sufficient condition for the reality of a physical quantity is the possibility of predicting it with certainty, without disturbing the system. In quantum mechanics in the case of two physical quantities described by non-commuting operators, the knowledge of one precludes the knowledge of the other. Then either (1) the description of reality given by the wave function in

quantum mechanics is not complete or (2) these two quantities cannot have simultaneous reality. Consideration of the problem of making predictions concerning a system on the basis of measurements made on another system that had previously interacted with it leads to the result that if (1) is false then (2) is also false. One is thus led to conclude that the description of reality as given by a wave function is not complete.

1.

ANY serious consideration of a physical theory must take into account the distinction between the objective reality, which is independent of any theory, and the physical concepts with which the theory operates. These concepts are intended to correspond with the objective reality, and by means of these concepts we picture this reality to ourselves.

In attempting to judge the success of a physical theory, we may ask ourselves two questions: (1) "Is the theory correct?" and (2) "Is the description given by the theory complete?" It is only in the case in which positive answers may be given to both of these questions, that the concepts of the theory may be said to be satisfactory. The correctness of the theory is judged by the degree of agreement between the conclusions of the theory and human experience. This experience, which alone enables us to make inferences about reality, in physics takes the form of experiment and measurement. It is the second question that we wish to consider here, as applied to quantum mechanics.

Whatever the meaning assigned to the term *complete*, the following requirement for a complete theory seems to be a necessary one: *every element of the physical reality must have a counterpart in the physical theory*. We shall call this the *condition of completeness*. The second question is thus easily answered, as soon as we are able to decide what are the elements of the physical reality.

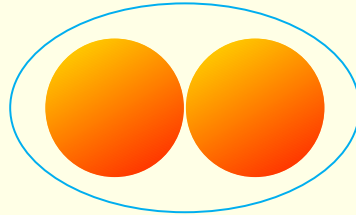
The elements of the physical reality cannot be determined by *a priori* philosophical considerations, but must be found by an appeal to results of experiments and measurements. A comprehensive definition of reality is, however, unnecessary for our purpose. We shall be satisfied with the following criterion, which we regard as reasonable. *If, without in any way disturbing a system, we can predict with certainty (i.e., with probability equal to unity) the value of a physical quantity, then there exists an element of physical reality corresponding to this physical quantity*. It seems to us that this criterion, while far from exhausting all possible ways of recognizing a physical reality, at least provides us with one

... every element of the physical reality must have a counterpart in the physical theory.

We shall call this **the condition of completeness**

If, without in any way disturbing a system, we can predict with certainty (i.e., with probability equal to unity) the values of a physical quantity, then there exists an element of physical reality corresponding to this physical quantity

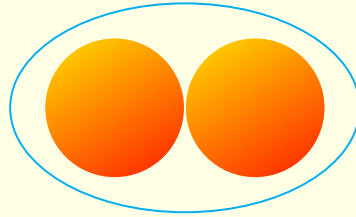
2 Na czym polega „paradoks” EPR



$$|\Psi_{AB}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\rangle_A |\downarrow\rangle_B - |\downarrow\rangle_A |\uparrow\rangle_B)$$

- EPR w wersji zaproponowanej przez Bohma (1951)
- Przygotowujemy parę cząstek o spinie połówkowym w stanie **singletowym** (całkowity spin jest równy zero)
- Obecnie taki stan nazywamy **stanem splątany** lub **stanem Bella**

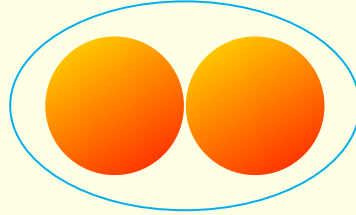
2 Na czym polega „paradoks” EPR



$$|\Psi_{AB}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\rangle_A |\downarrow\rangle_B - |\downarrow\rangle_A |\uparrow\rangle_B)$$

- EPR w wersji zaproponowanej przez Bohma (1951)
- Przygotowujemy parę cząstek o spinie połówkowym w stanie **singletowym** (całkowity spin jest równy zero)
- Obecnie taki stan nazywamy **stanem splątanym** lub **stanem Bella**

2 Na czym polega „paradoks” EPR



$$|\Psi_{AB}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\rangle_A |\downarrow\rangle_B - |\downarrow\rangle_A |\uparrow\rangle_B)$$

- EPR w wersji zaproponowanej przez Bohma (1951)
- Przygotowujemy parę cząstek o spinie połówkowym w stanie **singletowym** (całkowity spin jest równy zero)
- Obecnie taki stan nazywamy **stanem splątanym** lub **stanem Bella**



$$\left(\begin{array}{l} |\uparrow\rangle_A \dots\dots\dots |\downarrow\rangle_B \\ - |\downarrow\rangle_A \dots\dots\dots |\uparrow\rangle_B \end{array} \right)$$

- Rozdzielamy obydwie cząstki na dużą odległość
- Stan cząstek pozostaje singletowy (splątany)
- Odległość jest tak duża, że żaden sygnał nie jest w stanie pokonać jej w czasie potrzebnym na dokonanie pomiaru na jednej z cząstek



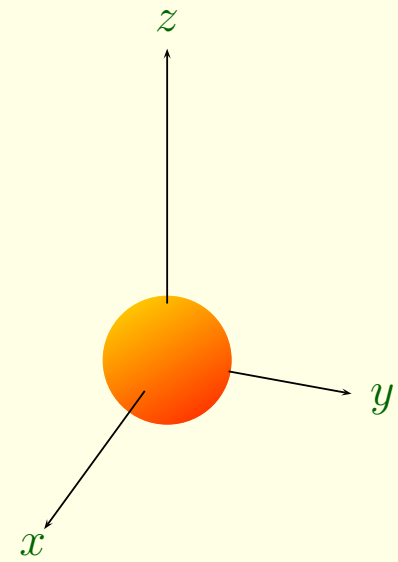
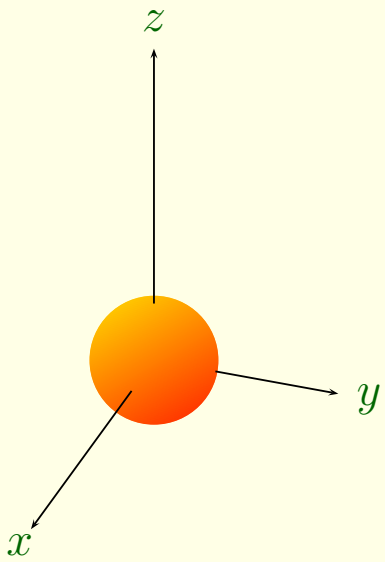
$$\begin{aligned} & (|\uparrow\rangle_A \dots\dots\dots |\downarrow\rangle_B \\ - & |\downarrow\rangle_A \dots\dots\dots |\uparrow\rangle_B) \end{aligned}$$

- Rozdzielamy obydwie cząstki na dużą odległość
- Stan cząstek pozostaje singletowy (splątany)
- Odległość jest tak duża, że żaden sygnał nie jest w stanie pokonać jej w czasie potrzebnym na dokonanie pomiaru na jednej z cząstek



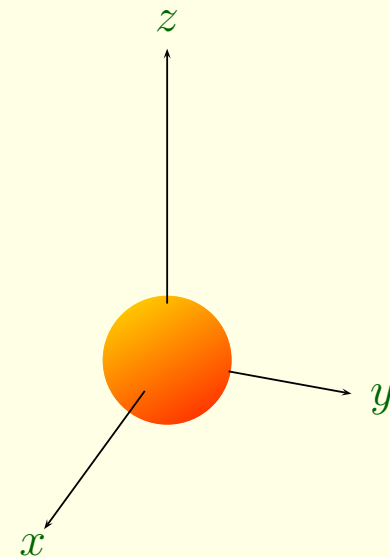
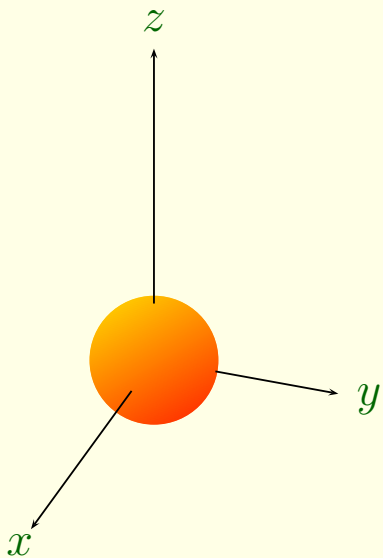
$$\begin{aligned} & (|\uparrow\rangle_A \dots\dots\dots |\downarrow\rangle_B \\ - & |\downarrow\rangle_A \dots\dots\dots |\uparrow\rangle_B) \end{aligned}$$

- Rozdzielamy obydwie cząstki na dużą odległość
- Stan cząstek pozostaje singletowy (splątany)
- Odległość jest tak duża, że żaden sygnał nie jest w stanie pokonać jej w czasie potrzebnym na dokonanie pomiaru na jednej z cząstek



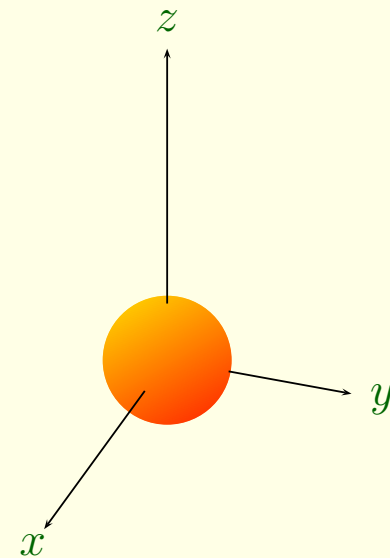
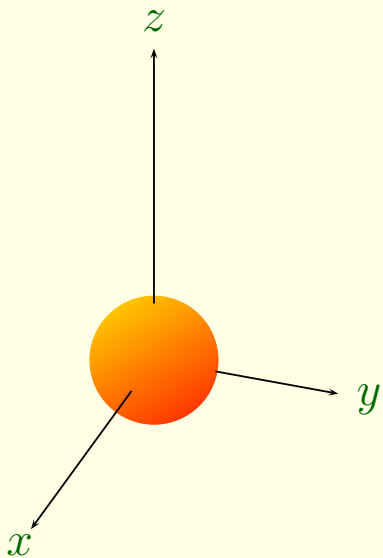
$$\left(\begin{array}{l} |\uparrow\rangle_A \dots\dots\dots |\downarrow\rangle_B \\ - |\downarrow\rangle_A \dots\dots\dots |\uparrow\rangle_B \end{array} \right)$$

- Chcemy zmierzyć spin cząstki A (lokalnie)
- Nie możemy zmierzyć spinu „w ogóle” lecz spin wzdłuż określonego kierunku, np. z lub x
- Ustawiamy przyrząd **Sterna-Gerlacha** do pomiaru np. wzdłuż osi z



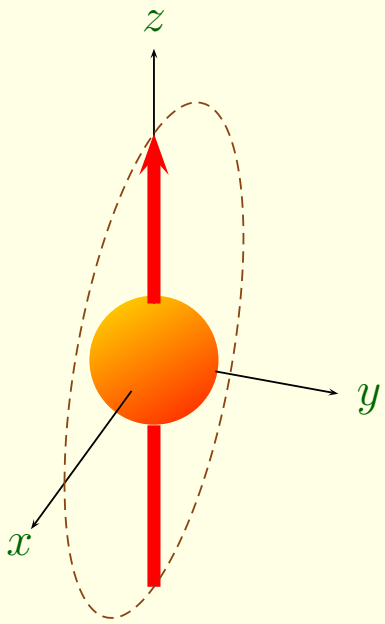
$$\left(\begin{array}{l} |\uparrow\rangle_A \dots\dots\dots |\downarrow\rangle_B \\ - |\downarrow\rangle_A \dots\dots\dots |\uparrow\rangle_B \end{array} \right)$$

- Chcemy zmierzyć spin cząstki A (lokalnie)
- Nie możemy zmierzyć spinu „w ogóle” lecz spin wzdłuż określonego kierunku, np. z lub x
- Ustawiamy przyrząd **Sterna-Gerlacha** do pomiaru np. wzdłuż osi z

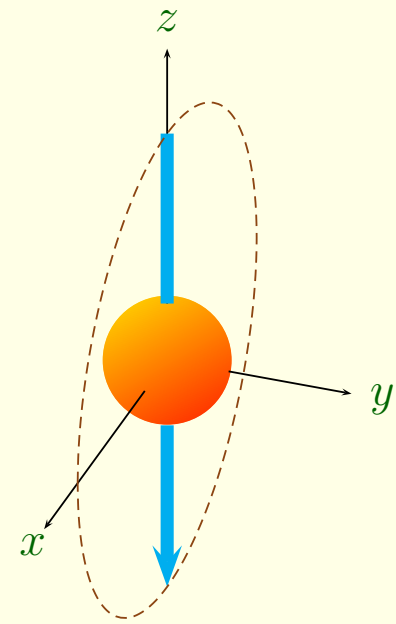


$$\left(\begin{array}{l} |\uparrow\rangle_A \dots\dots\dots |\downarrow\rangle_B \\ - |\downarrow\rangle_A \dots\dots\dots |\uparrow\rangle_B \end{array} \right)$$

- Chcemy zmierzyć spin cząstki A (lokalnie)
- Nie możemy zmierzyć spinu „w ogóle” lecz spin wzdłuż określonego kierunku, np. z lub x
- Ustawiamy przyrząd **Sterna-Gerlacha** do pomiaru np. wzdłuż osi z

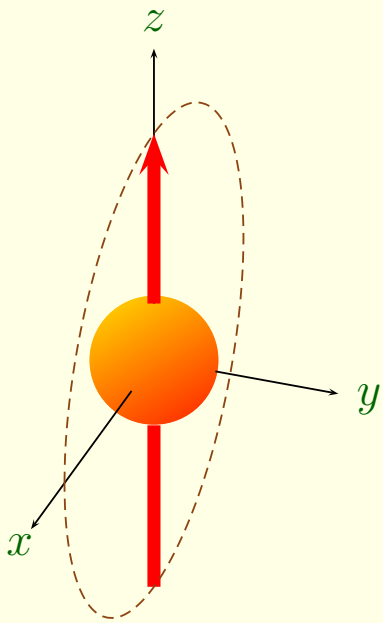


$|\uparrow\rangle_A$

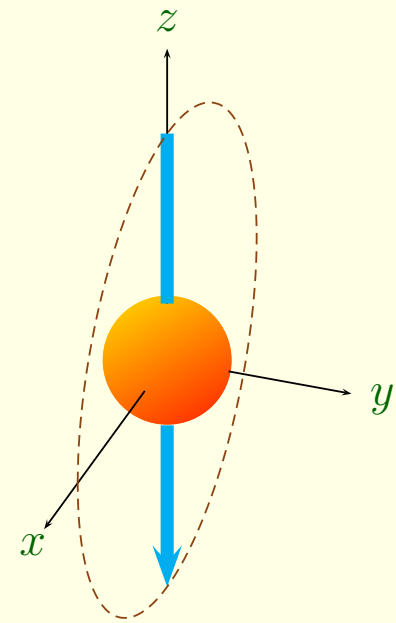


$|\downarrow\rangle_B$

- Pomiar wzdłuż z daje dla A np. wynik $+1$ oraz stan $|\uparrow\rangle_A$
- Następuje redukcja stanu i dla B otrzymujemy wynik -1 oraz stan $|\downarrow\rangle_B$
- W stanie splątanym istnieją silne korelacje kwantowe
- Spooky action at a distance

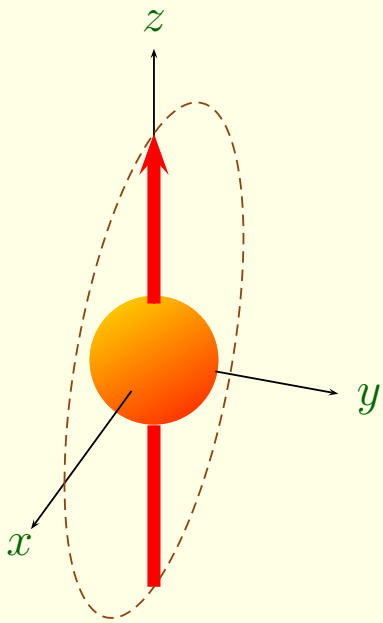


$|\uparrow\rangle_A$

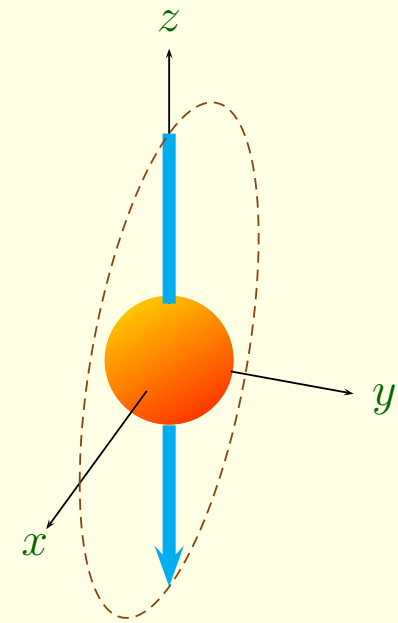


$|\downarrow\rangle_B$

- Pomiar wzdłuż z daje dla A np. wynik $+1$ oraz stan $|\uparrow\rangle_A$
- Następuje redukcja stanu i dla B otrzymujemy wynik -1 oraz stan $|\downarrow\rangle_B$
- W stanie splątanym istnieją silne korelacje kwantowe
- Spooky action at a distance

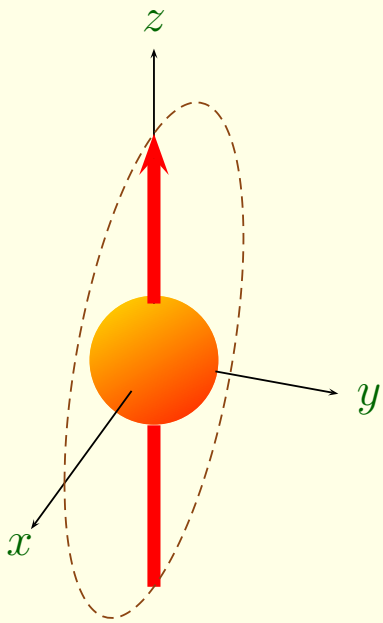


$|\uparrow\rangle_A$

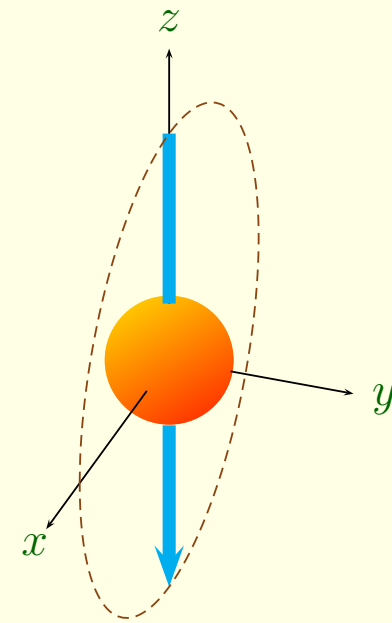


$|\downarrow\rangle_B$

- Pomiar wzdłuż z daje dla A np. wynik $+1$ oraz stan $|\uparrow\rangle_A$
- Następuje redukcja stanu i dla B otrzymujemy wynik -1 oraz stan $|\downarrow\rangle_B$
- W stanie splątanym istnieją silne korelacje kwantowe
- Spooky action at a distance

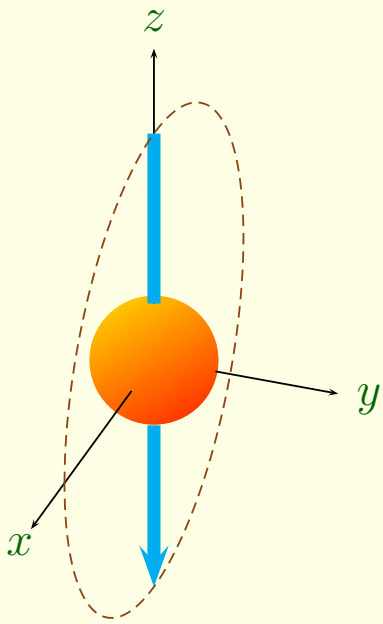


$|\uparrow\rangle_A$

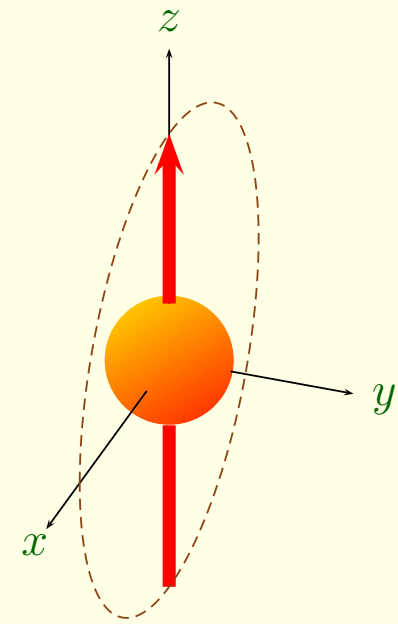


$|\downarrow\rangle_B$

- Pomiar wzdłuż z daje dla A np. wynik $+1$ oraz stan $|\uparrow\rangle_A$
- Następuje redukcja stanu i dla B otrzymujemy wynik -1 oraz stan $|\downarrow\rangle_B$
- W stanie splątanym istnieją silne korelacje kwantowe
- Spooky action at a distance

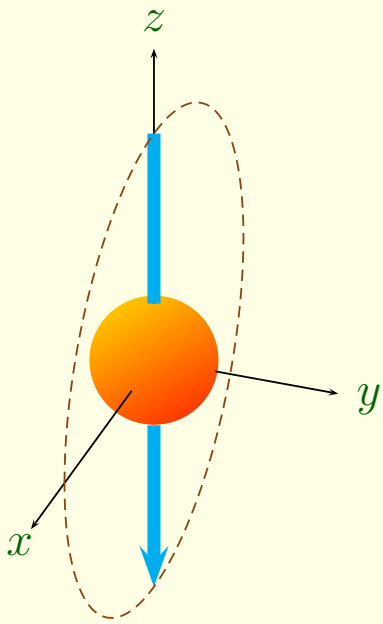


$|\downarrow\rangle_A$

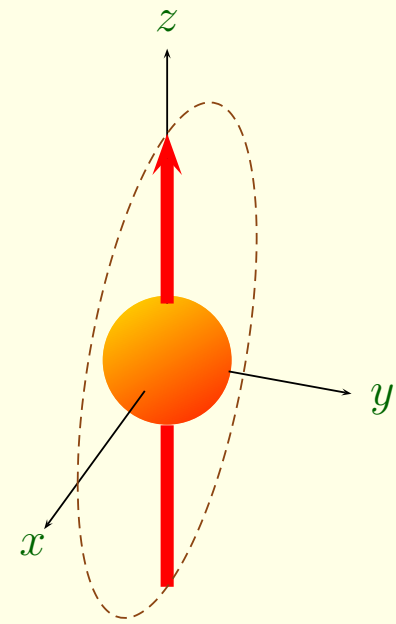


$|\uparrow\rangle_B$

- Jeśli pomiar wzdłuż z daje dla A wynik -1 oraz stan $|\downarrow\rangle_A$, to dla B otrzymujemy wynik $+1$ oraz stan $|\uparrow\rangle_B$
- Ponieważ możemy przewidzieć wynik pomiaru składowej z spinu B bez jakiegokolwiek oddziaływania na B , to składowa ta jest „elementem rzeczywistości fizycznej” (istnieje obiektywnie)

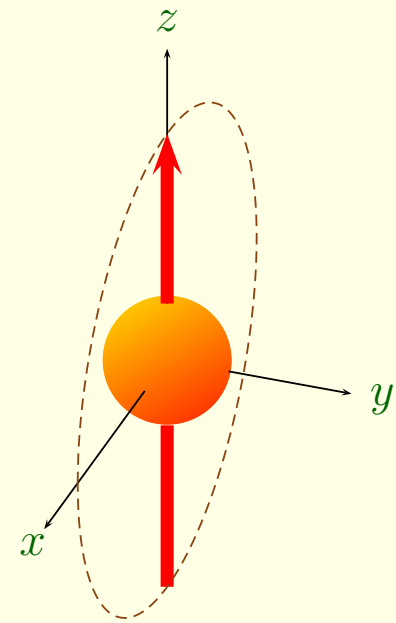
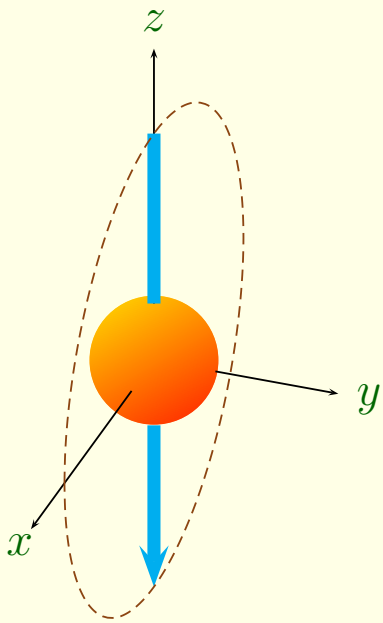


$|\downarrow\rangle_A$



$|\uparrow\rangle_B$

- Jeśli pomiar wzdłuż z daje dla A wynik -1 oraz stan $|\downarrow\rangle_A$, to dla B otrzymujemy wynik $+1$ oraz stan $|\uparrow\rangle_B$
- Ponieważ możemy przewidzieć wynik pomiaru składowej z spinu B bez jakiegokolwiek oddziaływania na B , to składowa ta jest „elementem rzeczywistości fizycznej” (istnieje obiektywnie)



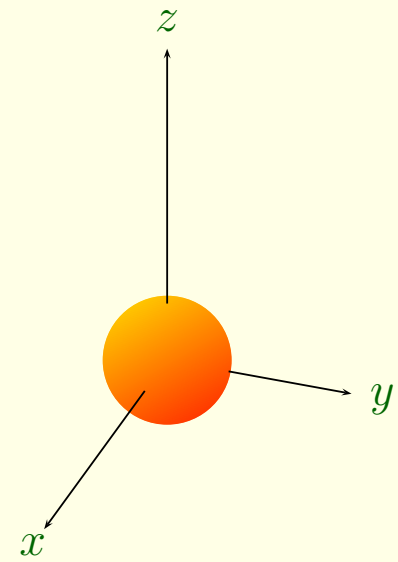
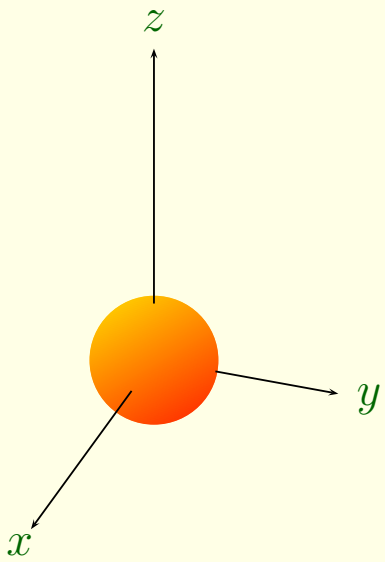
$|\downarrow\rangle_A$

If, without in any way disturbing a system, we can predict with certainty (i.e., with probability equal to unity) the values of a physical quantity, then there exists an element of physical reality corresponding to this physical quantity

$|\uparrow\rangle_B$

$|\downarrow\rangle_A$,

- Jeśli pomiar wzrostu dla B otrzymamy $|\downarrow\rangle_A$, to dla B otrzy...
- Ponieważ możemy przewidzieć wynik pomiaru składowej z spinu B bez jakiegokolwiek oddziaływania na B , to składowa ta jest „elementem rzeczywistości fizycznej” (istnieje obiektywnie)

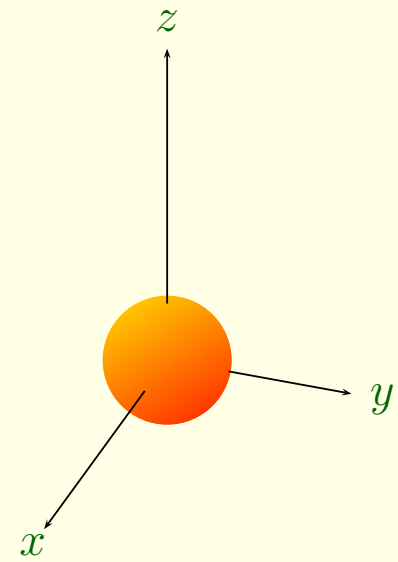
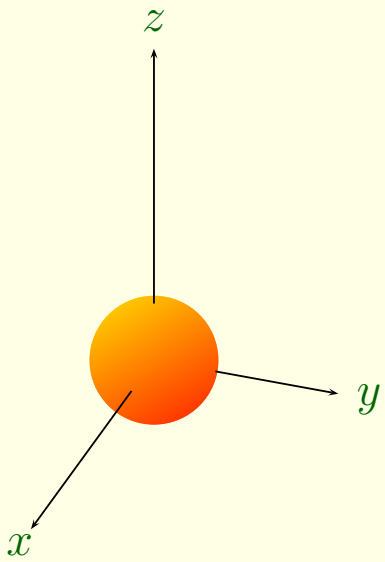


$$\left(\begin{array}{c} |\uparrow\rangle_A \dots\dots\dots |\downarrow\rangle_B \\ - |\downarrow\rangle_A \dots\dots\dots |\uparrow\rangle_B \end{array} \right)$$

=

$$\left(\begin{array}{c} |\rightarrow\rangle_A \dots\dots\dots |\leftarrow\rangle_B \\ - |\leftarrow\rangle_A \dots\dots\dots |\rightarrow\rangle_B \end{array} \right)$$

- Możemy jednak zdecydować się mierzyć spin A wzdłuż osi x
- Ustawiamy przyrząd **Sterna-Gerlacha** do pomiaru wzdłuż osi x

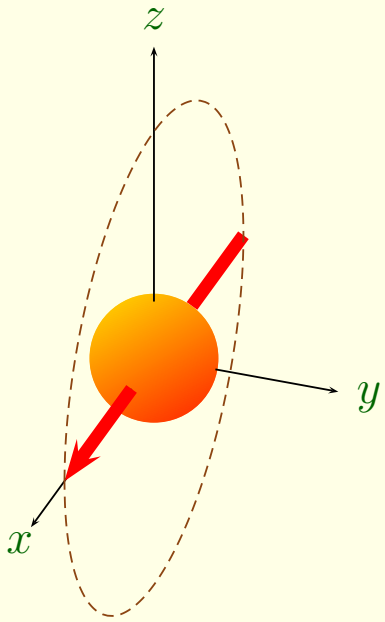


$$\left(\begin{array}{l} |\uparrow\rangle_A \dots\dots\dots |\downarrow\rangle_B \\ - |\downarrow\rangle_A \dots\dots\dots |\uparrow\rangle_B \end{array} \right)$$

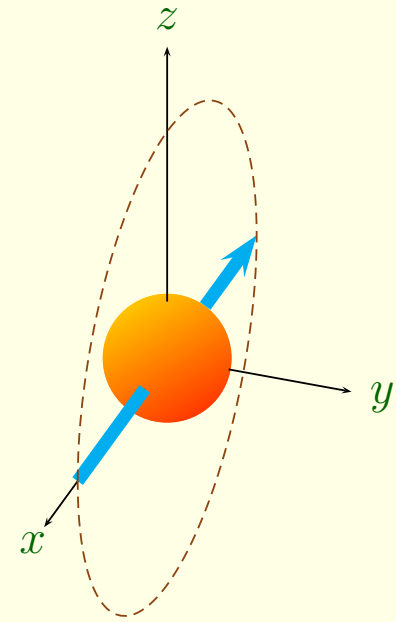
=

$$\left(\begin{array}{l} |\rightarrow\rangle_A \dots\dots\dots |\leftarrow\rangle_B \\ - |\leftarrow\rangle_A \dots\dots\dots |\rightarrow\rangle_B \end{array} \right)$$

- Możemy jednak zdecydować się mierzyć spin A wzdłuż osi x
- Ustawiamy przyrząd **Sterna-Gerlacha** do pomiaru wzdłuż osi x

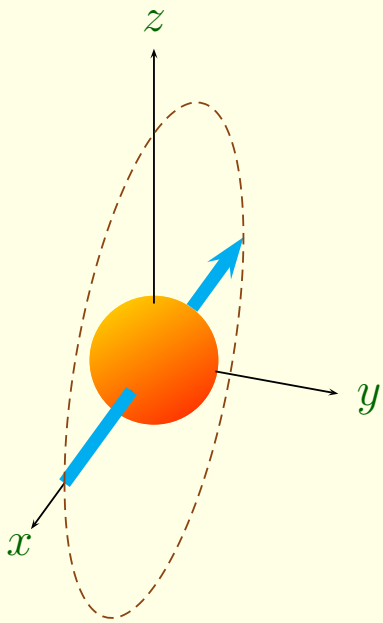


$$|\rightarrow\rangle_A$$

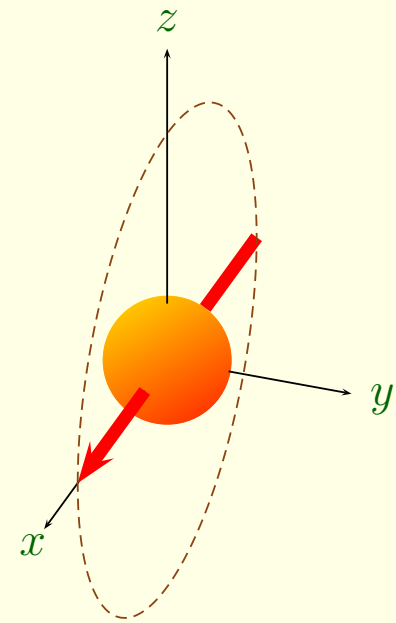


$$|\leftarrow\rangle_B$$

- Jeśli pomiar wzdłuż x daje dla A wynik $+1$ oraz stan $|\rightarrow\rangle_A$, to dla B otrzymujemy wynik -1 oraz stan $|\leftarrow\rangle_B$

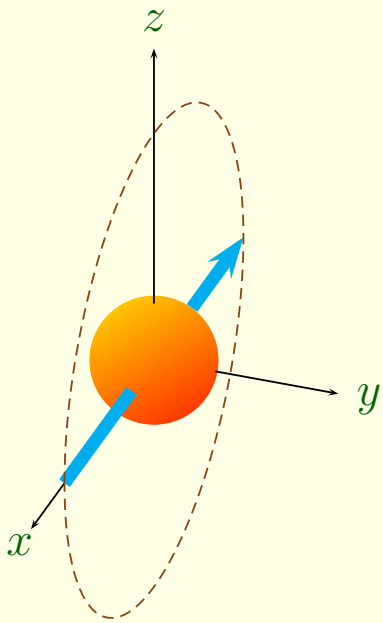


$$|\leftarrow\rangle_A$$

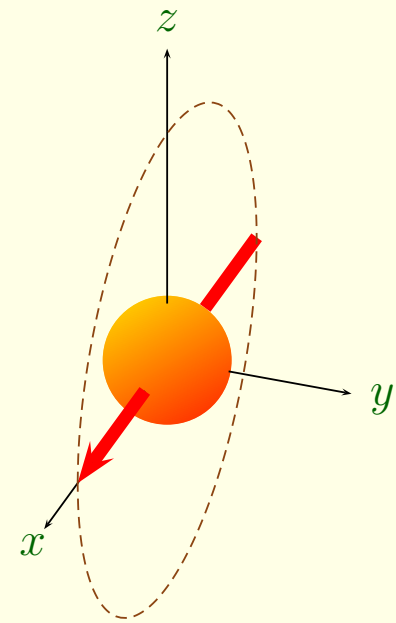


$$|\rightarrow\rangle_B$$

- Jeśli pomiar wzdłuż x daje dla A wynik -1 oraz stan $|\leftarrow\rangle_A$, to dla B otrzymujemy wynik $+1$ oraz stan $|\rightarrow\rangle_B$
- Ponieważ możemy przewidzieć wynik pomiaru składowej x spinu B bez jakiegokolwiek oddziaływania na B , to składowa ta jest „elementem rzeczywistości fizycznej” (istnieje obiektywnie)

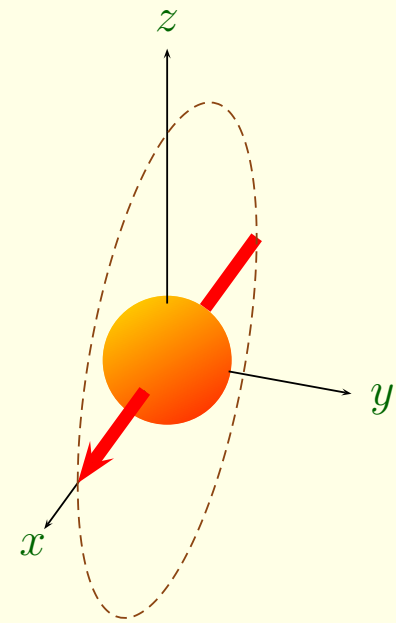
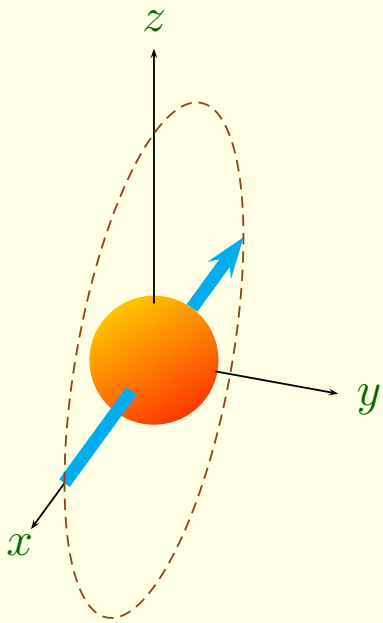


$$|\leftarrow\rangle_A$$



$$|\rightarrow\rangle_B$$

- Jeśli pomiar wzdłuż x daje dla A wynik -1 oraz stan $|\leftarrow\rangle_A$, to dla B otrzymujemy wynik $+1$ oraz stan $|\rightarrow\rangle_B$
- Ponieważ możemy przewidzieć wynik pomiaru składowej x spinu B bez jakiegokolwiek oddziaływania na B , to składowa ta jest „elementem rzeczywistości fizycznej” (istnieje obiektywnie)



$$|\leftarrow\rangle_A$$

If, without in any way disturbing a system, we can predict with certainty (i.e., with probability equal to unity) the values of a physical quantity, then there exists an element of physical reality corresponding to this physical quantity

$$|\rightarrow\rangle_B$$

- Jeśli pomiar wzrostu dla B otrzymamy $|\rightarrow\rangle_B$, to dla A otrzymamy $|\leftarrow\rangle_A$,
- Ponieważ możemy przewidzieć wynik pomiaru składowej x spinu B bez jakiegokolwiek oddziaływania na B , to składowa ta jest „elementem rzeczywistości fizycznej” (istnieje obiektywnie)

- Możemy zatem, bez jakiegokolwiek oddziaływania na B , wyznaczyć dwie składowe, z i x , spinu B , co nie jest zgodne z mechaniką kwantową!
- Mamy więc „paradoks”!

- Możemy zatem, bez jakiegokolwiek oddziaływania na B , wyznaczyć dwie składowe, z i x , spinu B , co nie jest zgodne z mechaniką kwantową!
- Mamy więc „paradoks”!

- Możemy zatem, bez jakieg
wyznaczyć dwie składowe,
mechaniką kwantową!

... if the operators corresponding to two physical quantities, say A and B , do not commute, that is, if $AB \neq BA$, then the precise knowledge of one of them precludes such a knowledge of the other.

- Mamy więc „paradoks”!

- Możemy zatem, bez jakieg wyznaczyć dwie składowe, mechaniką kwantową!

- Mamy więc „paradoks”!

... if the operators corresponding to two physical quantities, say A and B , do not commute, that is, if $AB \neq BA$, then the precise knowledge of one of them precludes such a knowledge of the other.

We see therefore that, as a consequence of two different measurements performed upon the first system, the second system may be left in states with two different wave functions. On the other hand, *since at the time of measurement the two systems no longer interact, no real change can take place in the second system in consequence of anything that may be done to the first system.* This is, of course, merely a statement of what is meant by the absence of an interaction between the two systems. Thus, *it is possible to assign two different wave functions* (in our example $|\uparrow\rangle_B$ and $|\rightarrow\rangle_B$) *to the same reality* (the second system after the interaction with the first).

- Możemy zatem, bez jakieg
wyznaczyć dwie składowe,
mechaniką kwantową!

... if the operators corresponding to two physical quantities, say A and B , do not commute, that is, if $AB \neq BA$, then the precise knowledge of one of them precludes such a knowledge of the other.

- Mamy więc „paradoks”!

We see therefore that, as a consequence of two different measurements performed upon the first system, the second system may be left in states with two different wave functions. On the other hand, *since at the time of measure-*

We are thus forced to conclude that the quantum-mechanical description of physical reality given by wave functions is not complete.

real in to of a of
an interaction between the two systems. Thus, *it is possible to assign two different wave functions* (in our example $|\uparrow\rangle_B$ and $|\rightarrow\rangle_B$) *to the same reality* (the second system after the interaction with the first).

3 Implikacje

- Albo mechanika kwantowa nie jest kompletna
- albo przynajmniej jedno z założeń EPR jest fałszywe:
 - lokalność (pomiar na jednej cząstce nie może mieć wpływu na stan drugiej cząstki)
 - istnienie obiektywnej rzeczywistości fizycznej (wielkości fizyczne mają określone wartości zanim dokonamy pomiaru)
- Ogromna dyskusja, która trwa do dzisiaj!

3 Implikacje

- Albo mechanika kwantowa nie jest kompletna
- albo przynajmniej jedno z założeń EPR jest fałszywe:
 - lokalność (pomiar na jednej cząstce nie może mieć wpływu na stan drugiej cząstki)
 - istnienie obiektywnej rzeczywistości fizycznej (wielkości fizyczne mają określone wartości zanim dokonamy pomiaru)
- Ogromna dyskusja, która trwa do dzisiaj!

3 Implikacje

- Albo mechanika kwantowa nie jest kompletna
- albo przynajmniej jedno z założeń EPR jest fałszywe:
 - **lokalność** (pomiar na jednej cząstce nie może mieć wpływu na stan drugiej cząstki)
 - istnienie obiektywnej rzeczywistości fizycznej (wielkości fizyczne mają określone wartości zanim dokonamy pomiaru)
- Ogromna dyskusja, która trwa do dzisiaj!

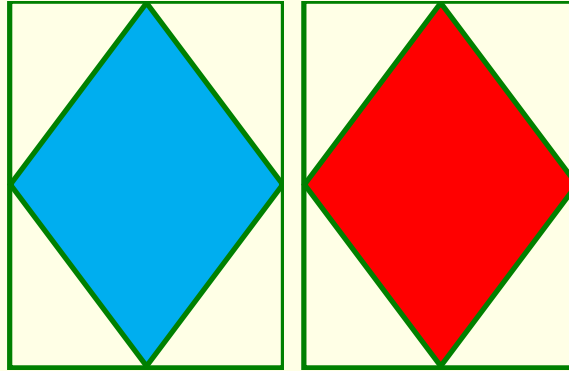
3 Implikacje

- Albo mechanika kwantowa nie jest kompletna
- albo przynajmniej jedno z założeń EPR jest fałszywe:
 - lokalność (pomiar na jednej cząstce nie może mieć wpływu na stan drugiej cząstki)
 - istnienie obiektywnej rzeczywistości fizycznej (wielkości fizyczne mają określone wartości zanim dokonamy pomiaru)
- Ogromna dyskusja, która trwa do dzisiaj!

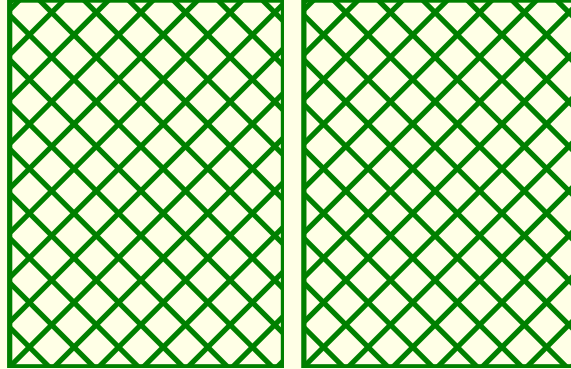
3 Implikacje

- Albo mechanika kwantowa nie jest kompletna
- albo przynajmniej jedno z założeń EPR jest fałszywe:
 - lokalność (pomiar na jednej cząstce nie może mieć wpływu na stan drugiej cząstki)
 - istnienie obiektywnej rzeczywistości fizycznej (wielkości fizyczne mają określone wartości zanim dokonamy pomiaru)
- Ogromna dyskusja, która trwa do dzisiaj!

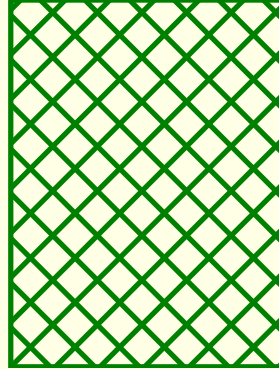
4 Korelacje klasyczne — zmienne ukryte



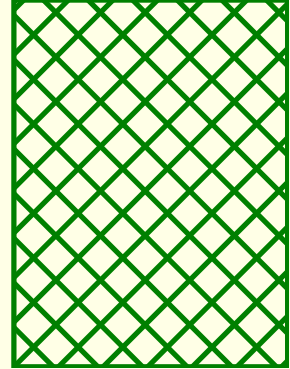
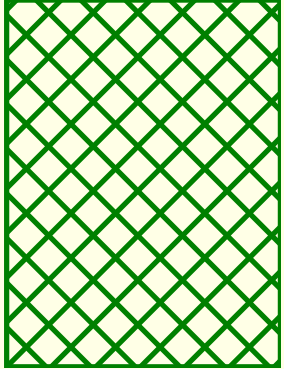
- Mamy dwie karty: niebieską i czerwoną



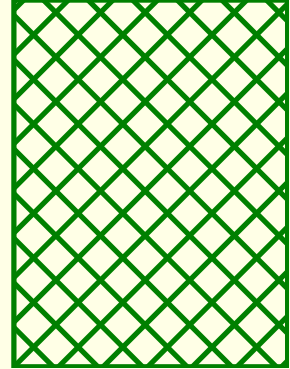
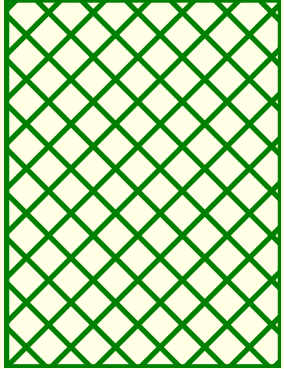
- Karty odwracamy i tasujemy



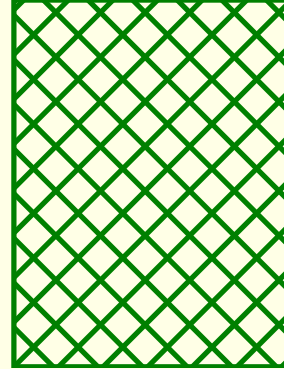
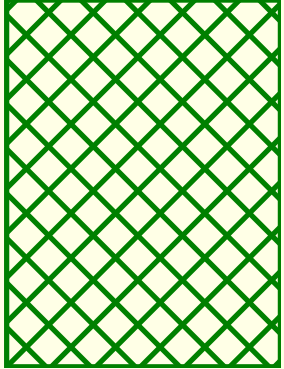
- Karty odwracamy i tasujemy



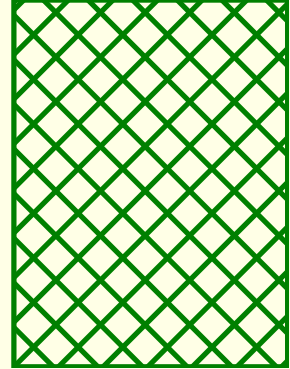
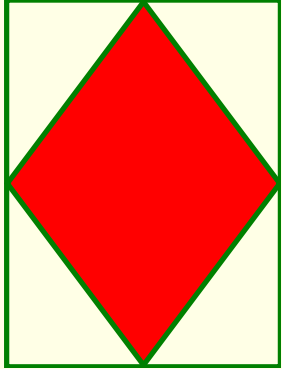
- Karty rozdzielamy na dużą odległość.
- Teraz **nie wiemy** jakiego koloru karta znajduje się po jednej a jakiego koloru po drugiej stronie, ale **wiemy**, że jedna jest czerwona a druga niebieska.
- Szanse są „pół na pół”



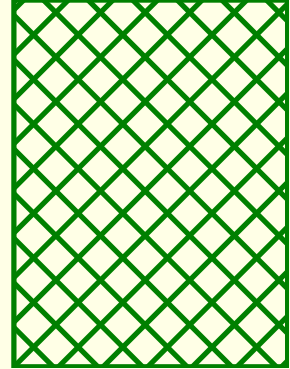
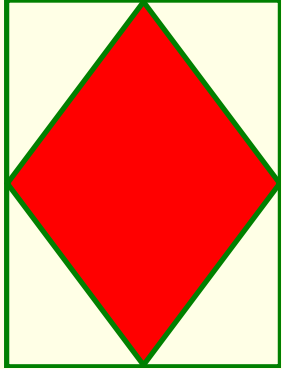
- Karty rozdzielamy na dużą odległość.
- Teraz **nie wiemy** jakiego koloru karta znajduje się po jednej a jakiego koloru po drugiej stronie, ale **wiemy**, że jedna jest czerwona a druga niebieska.
- Szanse są „pół na pół”



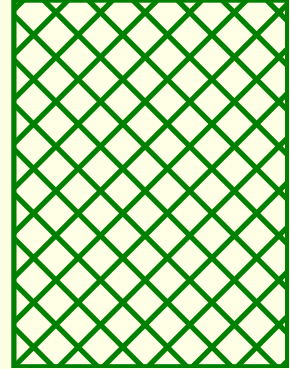
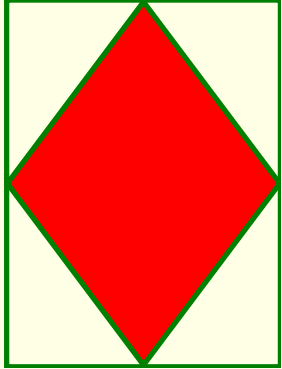
- Karty rozdzielamy na dużą odległość.
- Teraz **nie wiemy** jakiego koloru karta znajduje się po jednej a jakiego koloru po drugiej stronie, ale **wiemy**, że jedna jest czerwona a druga niebieska.
- Szanse są „pół na pół”



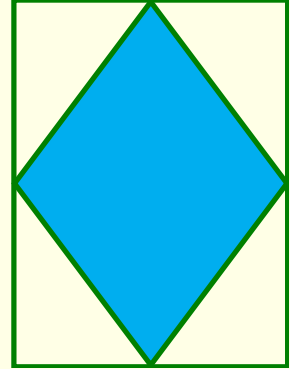
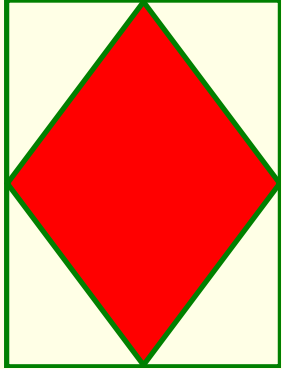
- Odkrywamy jedną z kart — **dokonyjemy lokalnie pomiaru**
- Okazało się, że odkryta karta ma kolor czerwony
- W tym momencie **wiemy**, że druga karta **musi być niebieska** — nie musimy jej odkrywać



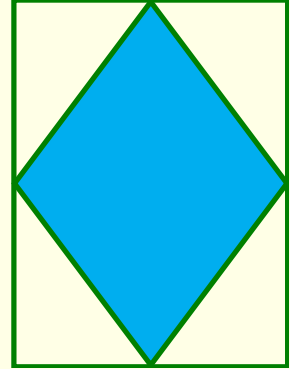
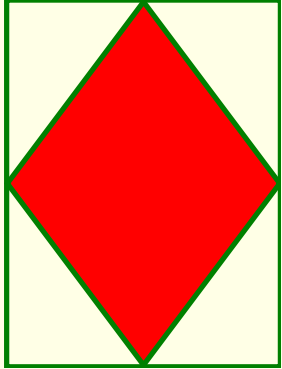
- Odkrywamy jedną z kart — dokonujemy lokalnie pomiaru
- Okazało się, że odkryta karta ma kolor czerwony
- W tym momencie *wiemy*, że druga karta *musi być niebieska* — nie musimy jej odkrywać



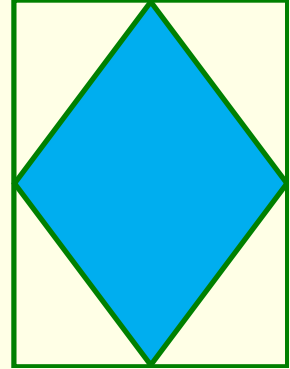
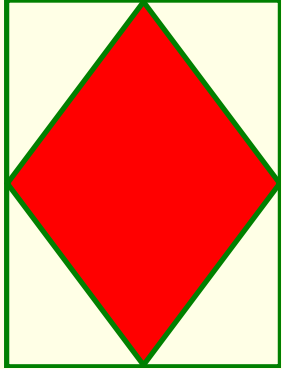
- Odkrywamy jedną z kart — dokonujemy lokalnie pomiaru
- Okazało się, że odkryta karta ma kolor czerwony
- W tym momencie **wiemy**, że druga karta **musi być niebieska** — nie musimy jej odkrywać



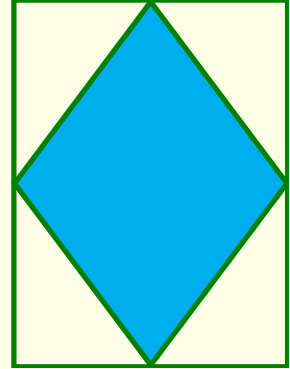
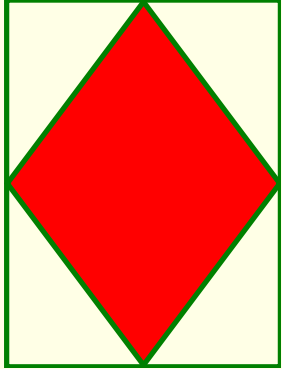
- I tak jest rzeczywiście!
- Karty cały czas miały własny kolor tylko myśmy stracili wiedzę o ich kolorze tasując je.
- Kolor jest ukrytą zmienną
- Czy takie klasyczne korelacje i istnienie ukrytych zmiennych mogą wyjaśnić to co obserwujemy w EPR?



- I tak jest rzeczywiście!
- Karty cały czas miały własny kolor tylko myśmy stracili wiedzę o ich kolorze tasując je.
- Kolor jest ukrytą zmienną
- Czy takie klasyczne korelacje i istnienie ukrytych zmiennych mogą wyjaśnić to co obserwujemy w EPR?

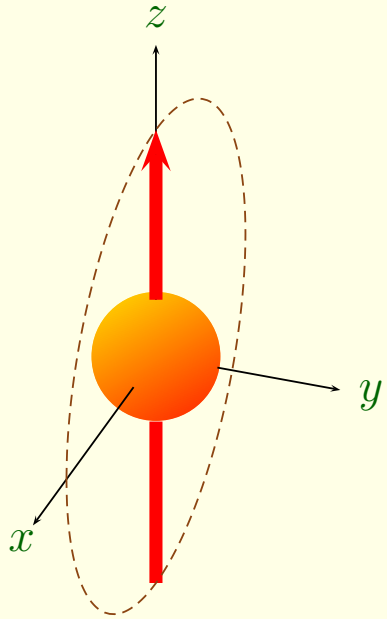


- I tak jest rzeczywiście!
- Karty cały czas miały własny kolor tylko myśmy stracili wiedzę o ich kolorze tasując je.
- Kolor jest ukrytą zmienną
- Czy takie klasyczne korelacje i istnienie ukrytych zmiennych mogą wyjaśnić to co obserwujemy w EPR?

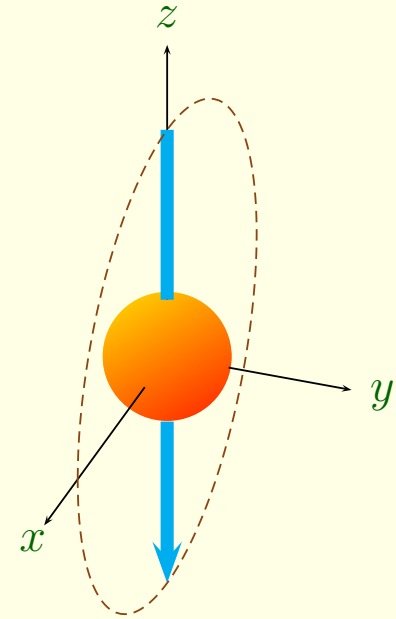


- I tak jest rzeczywiście!
- Karty cały czas miały własny kolor tylko myśmy stracili wiedzę o ich kolorze tasując je.
- Kolor jest ukrytą zmienną
- Czy takie klasyczne korelacje i istnienie ukrytych zmiennych mogą wyjaśnić to co obserwujemy w EPR?

5 Korelacje kwantowe — nierówności Bella

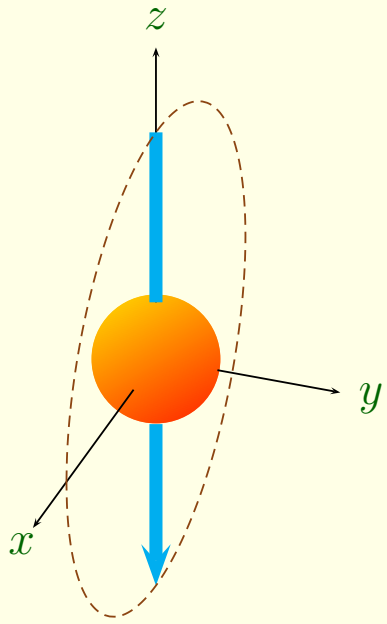


$$z = +1$$

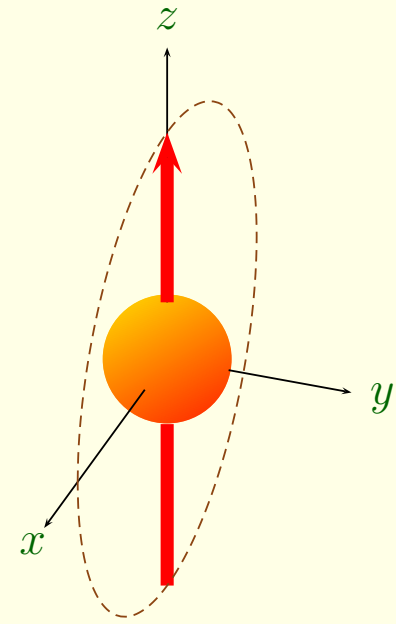


$$z = -1$$

Zagrajmy w kwantowe karty

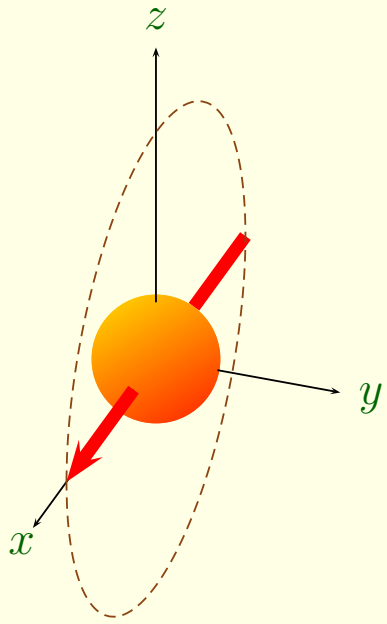


$$z = -1$$



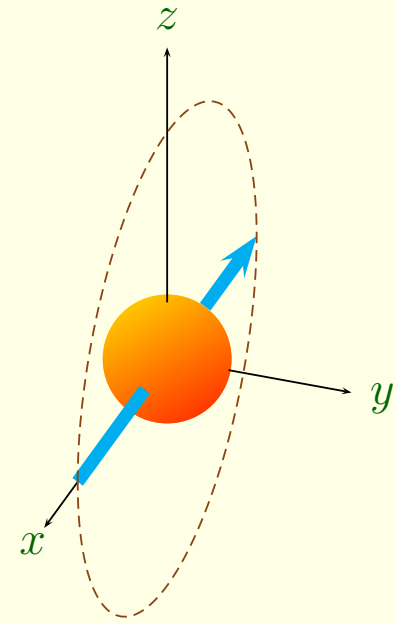
$$z = +1$$

Dla tych samych ustawień detektorów wyniki są zawsze przeciwne...

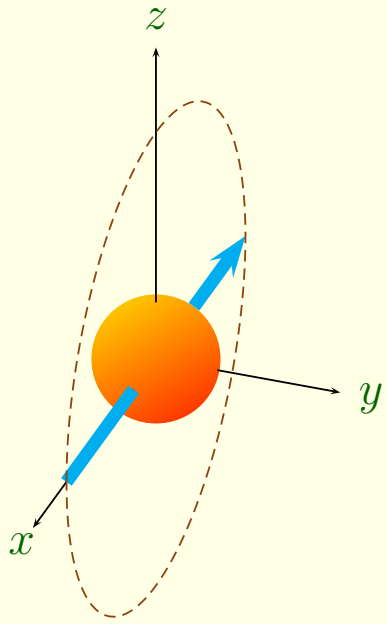


$$x = +1$$

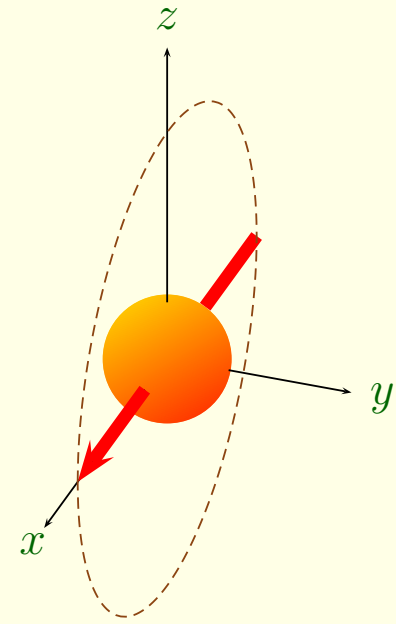
... podobnie jak w kartach



$$x = -1$$

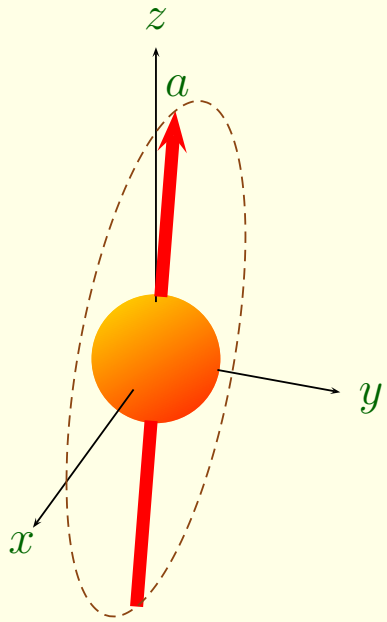


$$x = -1$$

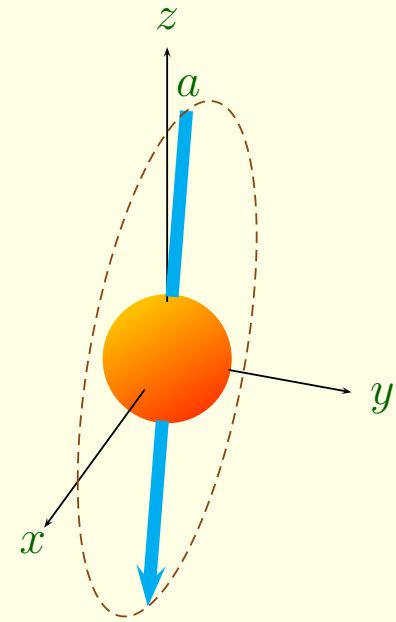


$$x = +1$$

Mamy pełną antykorelację

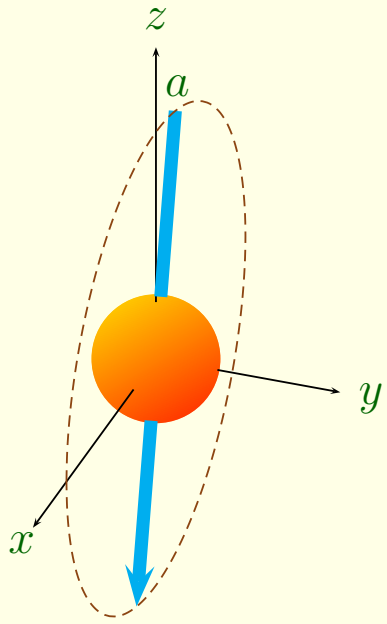


$$a = +1$$

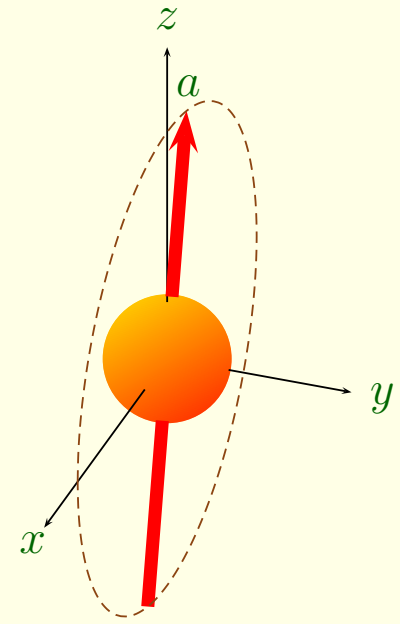


$$a = -1$$

dla dowolnego kierunku obydwu detektorów

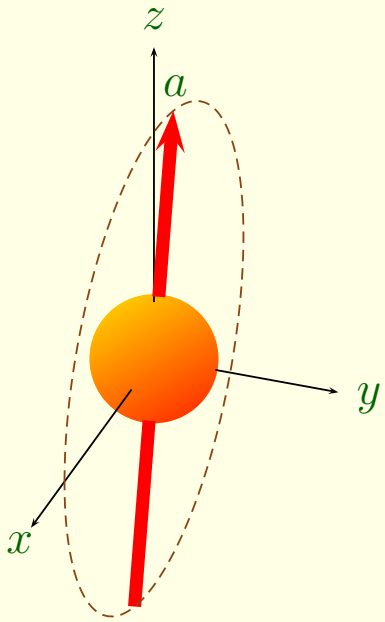


$$a = -1$$

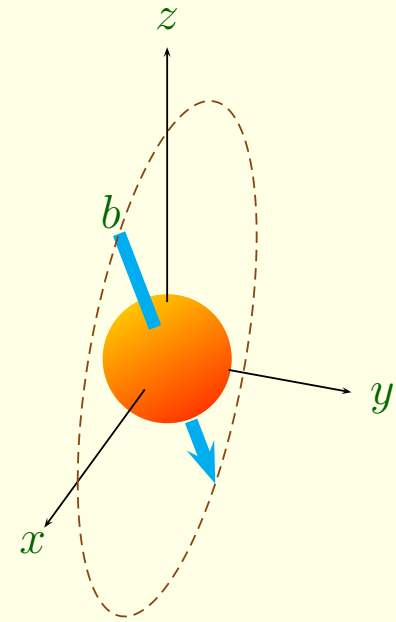


$$a = +1$$

o ile jest **taki sam** dla obu detektorów

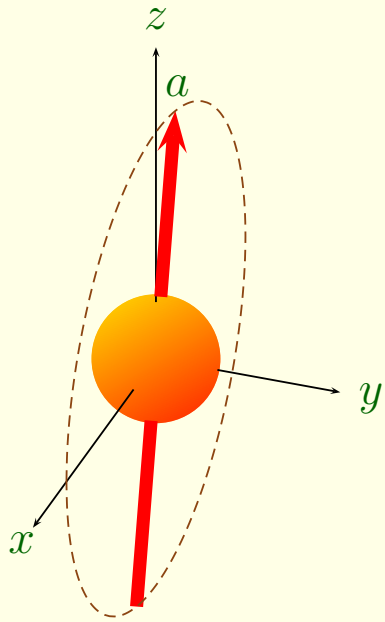


$$a = 1$$

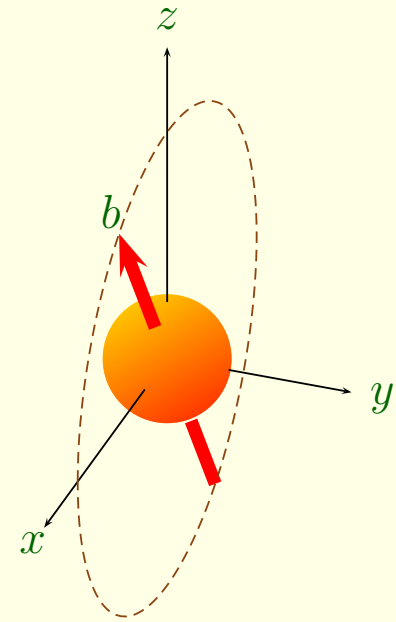


$$b = -1$$

Możemy jednak mierzyć korelacje dla **różnych ustawień** detektorów
i dostać wtedy wyniki **przeciwne** jak tutaj ...



$$a = 1$$

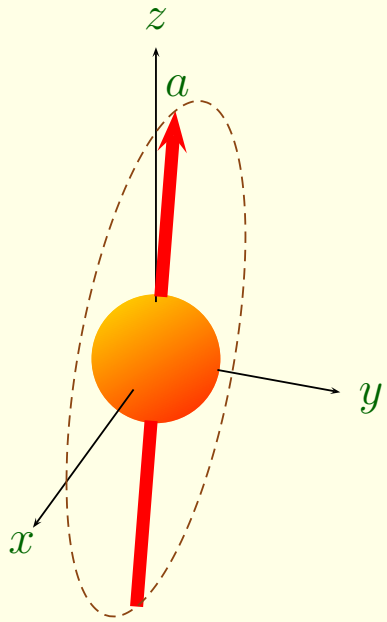


$$b = 1$$

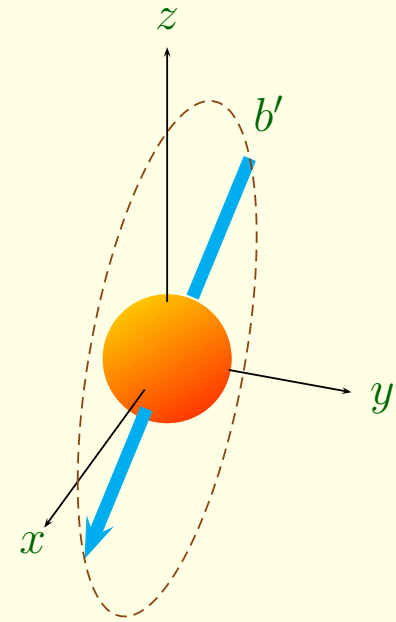
... ale możemy też dostać wyniki zgodne

Kwantowo

$$\langle ab \rangle = \langle \Psi_{AB} | \vec{\sigma} \cdot \vec{a} \otimes \vec{\sigma} \cdot \vec{b} | \Psi_{AB} \rangle = -\vec{a} \cdot \vec{b} = -\cos \theta_{ab}$$

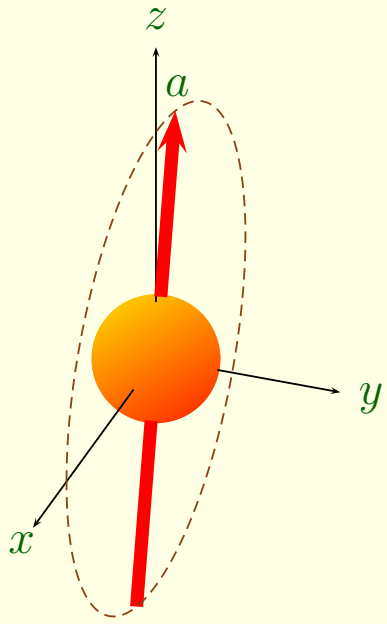


$$a = 1$$

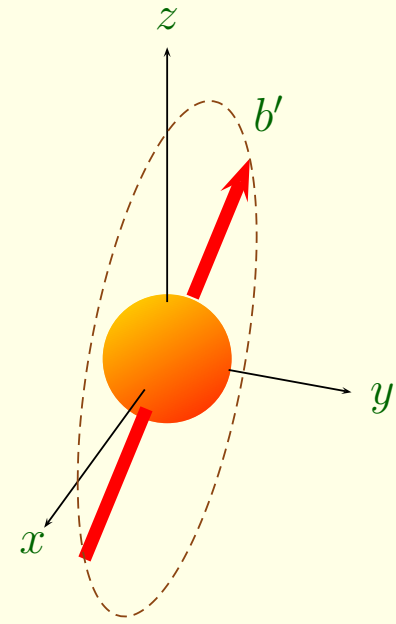


$$b' = -1$$

Możemy wybrać dowolne dwa ustawienia



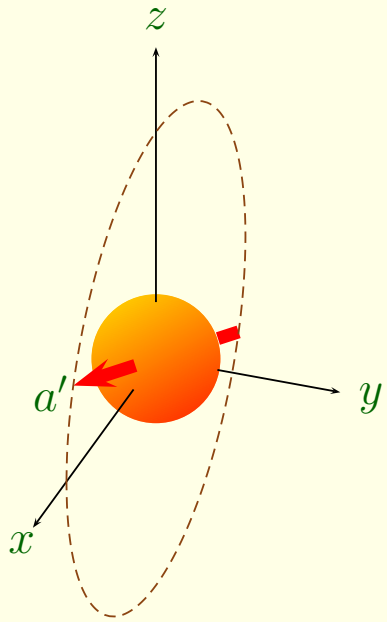
$$a = 1$$



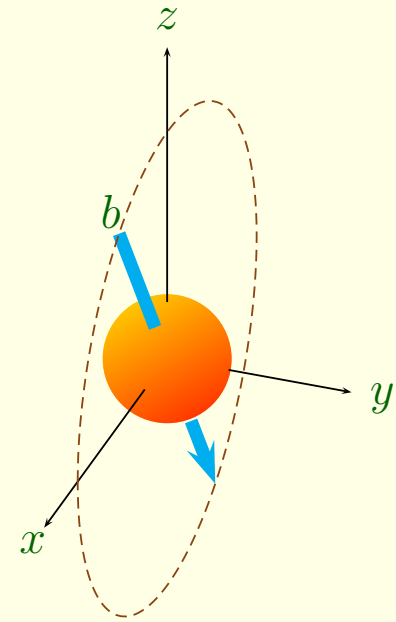
$$b' = 1$$

Kwantowo

$$\langle ab' \rangle = -\vec{a} \cdot \vec{b}' = -\cos \theta_{ab'}$$

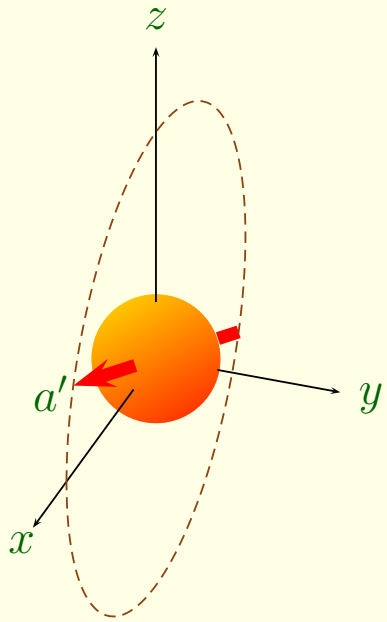


$$a' = 1$$

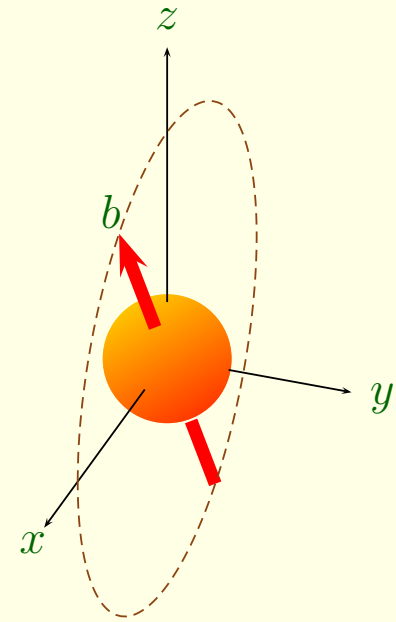


$$b = -1$$

lub jeszcze inne dwa ustawienia



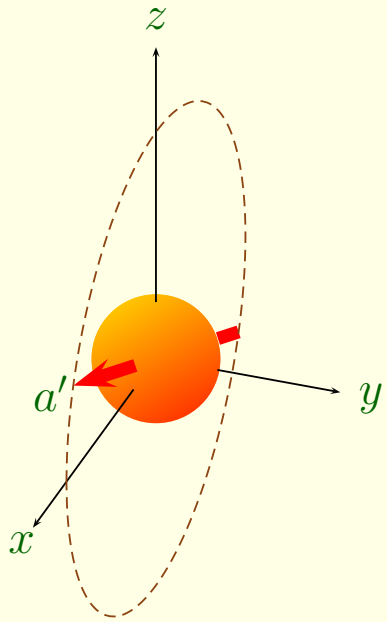
$$a' = 1$$



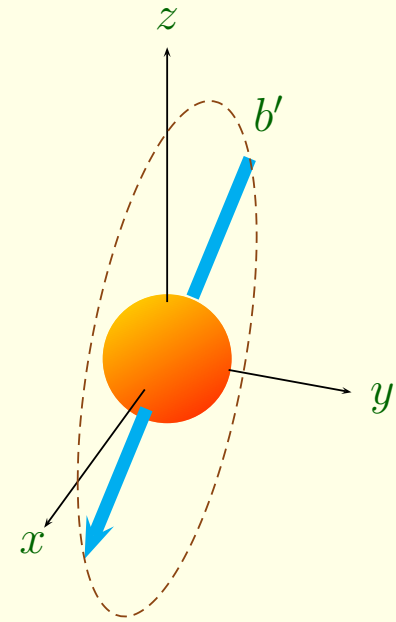
$$b = 1$$

Kwantowo

$$\langle a'b \rangle = -\vec{a}' \cdot \vec{b} = -\cos \theta_{a'b}$$

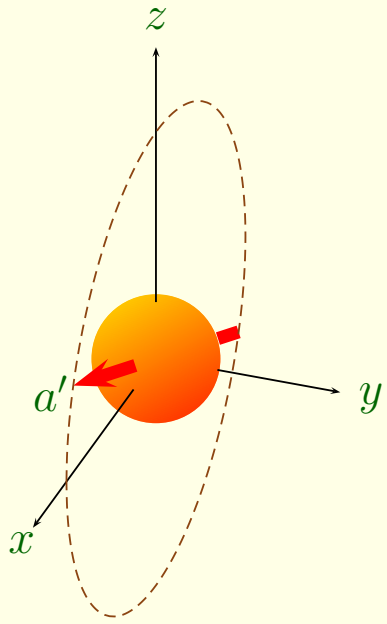


$$a' = 1$$

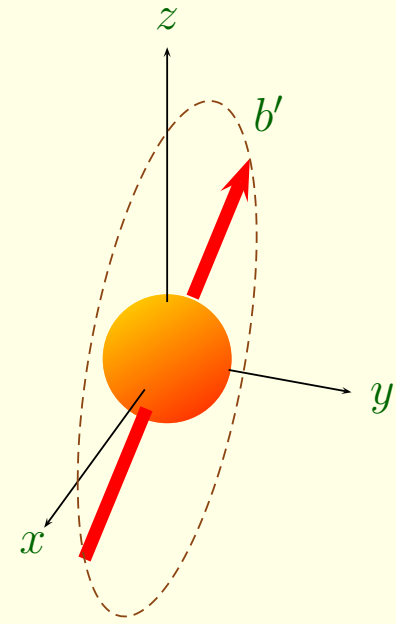


$$b' = -1$$

i jeszcze inne dwa ustawienia



$$a' = 1$$



$$b' = 1$$

Kwantowo

$$\langle a'b' \rangle = -\vec{a}' \cdot \vec{b}' = -\cos \theta_{a'b'}$$

- Bell, 1965, Clauser, Horne, Shimony, Holt, 1969

- Ponieważ $\{a, a', b, b'\} = \pm 1$,

to

$$a(b + b') + a'(b - b') \equiv \pm 2$$

bo albo $b + b'$ albo $b - b'$ jest zerem.

- A to oznacza, że spełniona jest nierówność

$$|a(b + b') + a'(b - b')| \leq 2$$

- Dla średnich wartości powinno zatem być prawdziwe

$$|\langle ab \rangle + \langle ab' \rangle + \langle a'b \rangle - \langle a'b' \rangle| \leq 2$$

- Bell, 1965, Clauser, Horne, Shimony, Holt, 1969

- Ponieważ $\{a, a', b, b'\} = \pm 1$,

to

$$a(b + b') + a'(b - b') \equiv \pm 2$$

bo albo $b + b'$ albo $b - b'$ jest zerem.

- A to oznacza, że spełniona jest nierówność

$$|a(b + b') + a'(b - b')| \leq 2$$

- Dla średnich wartości powinno zatem być prawdziwe

$$|\langle ab \rangle + \langle ab' \rangle + \langle a'b \rangle - \langle a'b' \rangle| \leq 2$$

- Bell, 1965, Clauser, Horne, Shimony, Holt, 1969

- Ponieważ $\{a, a', b, b'\} = \pm 1$,

to

$$a(b + b') + a'(b - b') \equiv \pm 2$$

bo albo $b + b'$ albo $b - b'$ jest zerem.

- A to oznacza, że spełniona jest nierówność

$$|a(b + b') + a'(b - b')| \leq 2$$

- Dla średnich wartości powinno zatem być prawdziwe

$$|\langle ab \rangle + \langle ab' \rangle + \langle a'b \rangle - \langle a'b' \rangle| \leq 2$$

- Bell, 1965, Clauser, Horne, Shimony, Holt, 1969

- Ponieważ $\{a, a', b, b'\} = \pm 1$,

to

$$a(b + b') + a'(b - b') \equiv \pm 2$$

bo albo $b + b'$ albo $b - b'$ jest zerem.

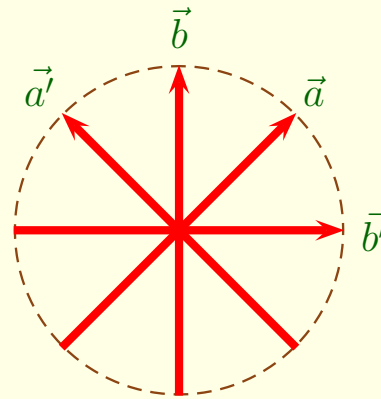
- A to oznacza, że spełniona jest nierówność

$$|a(b + b') + a'(b - b')| \leq 2$$

- Dla średnich wartości powinno zatem być prawdziwe

$$|\langle ab \rangle + \langle ab' \rangle + \langle a'b \rangle - \langle a'b' \rangle| \leq 2$$

- Wybierzmy kierunki detektorów tak



$$\theta_{ab} = \theta_{a'b} = \theta_{ab'} = 45^\circ, \quad \theta_{a'b'} = 135^\circ$$

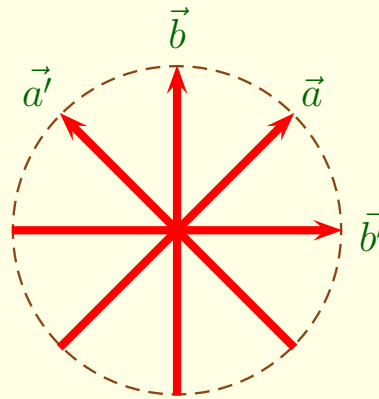
i policzmy kwantowo

$$|\cos \theta_{ab} + \cos \theta_{ab'} + \cos \theta_{a'b} - \cos \theta_{a'b'}| \leq 2$$

- Otrzymujemy

$$\frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{1}{\sqrt{2}} = 2\sqrt{2} \approx 2.8284 > 2$$

- Wybierzmy kierunki detektorów tak



$$\theta_{ab} = \theta_{a'b} = \theta_{ab'} = 45^\circ, \quad \theta_{a'b'} = 135^\circ$$

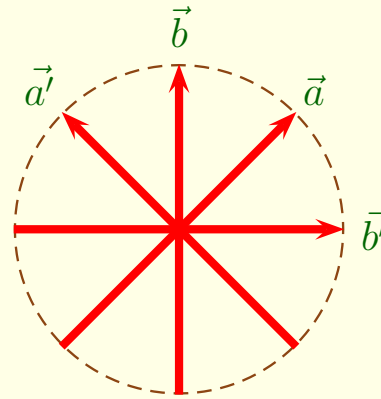
i policzmy kwantowo

$$|\cos \theta_{ab} + \cos \theta_{ab'} + \cos \theta_{a'b} - \cos \theta_{a'b'}| \leq 2$$

- Otrzymujemy

$$\frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{1}{\sqrt{2}} = 2\sqrt{2} \approx 2.8284 > 2$$

- Wyberzmy kierunki detektorów tak



$$\theta_{ab} = \theta_{a'b} = \theta_{ab'} = 45^\circ, \quad \theta_{a'b'} = 135^\circ$$

i p **Nierówność jest łamana!**

$$|\cos \theta_{ab} + \cos \theta_{ab'} + \cos \theta_{a'b} - \cos \theta_{a'b'}| \leq 2$$

- Otrzymujemy

$$\frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{1}{\sqrt{2}} = 2\sqrt{2} \approx 2.8284 > 2$$

- Lokalna teoria zmiennych ukrytych musi spełniać pewną nierówność (wartość korelacji jest ograniczona z góry):

$$|\langle ab \rangle + \langle ab' \rangle + \langle a'b \rangle - \langle a'b' \rangle| \leq 2$$

- W stanie singletowym mechanika kwantowa daje:

$$|\langle ab \rangle + \langle ab' \rangle + \langle a'b \rangle - \langle a'b' \rangle| = 2\sqrt{2}$$

- Korelacje kwantowe są silniejsze niż klasyczne!
- Lokalna teoria zmiennych ukrytych nie może odtworzyć korelacji kwantowych
- Możliwe są eksperymentalne testy mechaniki kwantowej!

- Lokalna teoria zmiennych ukrytych musi spełniać pewną nierówność (wartość korelacji jest ograniczona z góry):

$$|\langle ab \rangle + \langle ab' \rangle + \langle a'b \rangle - \langle a'b' \rangle| \leq 2$$

- W stanie singletowym mechanika kwantowa daje:

$$|\langle ab \rangle + \langle ab' \rangle + \langle a'b \rangle - \langle a'b' \rangle| = 2\sqrt{2}$$

- Korelacje kwantowe są silniejsze niż klasyczne!
- Lokalna teoria zmiennych ukrytych nie może odtworzyć korelacji kwantowych
- Możliwe są eksperymentalne testy mechaniki kwantowej!

- Lokalna teoria zmiennych ukrytych musi spełniać pewną nierówność (wartość korelacji jest ograniczona z góry):

$$|\langle ab \rangle + \langle ab' \rangle + \langle a'b \rangle - \langle a'b' \rangle| \leq 2$$

- W stanie singletowym mechanika kwantowa daje:

$$|\langle ab \rangle + \langle ab' \rangle + \langle a'b \rangle - \langle a'b' \rangle| = 2\sqrt{2}$$

- Korelacje kwantowe są silniejsze niż klasyczne!
- Lokalna teoria zmiennych ukrytych nie może odtworzyć korelacji kwantowych
- Możliwe są eksperymentalne testy mechaniki kwantowej!

- Lokalna teoria zmiennych ukrytych musi spełniać pewną nierówność (wartość korelacji jest ograniczona z góry):

$$|\langle ab \rangle + \langle ab' \rangle + \langle a'b \rangle - \langle a'b' \rangle| \leq 2$$

- W stanie singletowym mechanika kwantowa daje:

$$|\langle ab \rangle + \langle ab' \rangle + \langle a'b \rangle - \langle a'b' \rangle| = 2\sqrt{2}$$

- Korelacje kwantowe są silniejsze niż klasyczne!
- Lokalna teoria zmiennych ukrytych nie może odtworzyć korelacji kwantowych
- Możliwe są eksperymentalne testy mechaniki kwantowej!

- Lokalna teoria zmiennych ukrytych musi spełniać pewną nierówność (wartość korelacji jest ograniczona z góry):

$$|\langle ab \rangle + \langle ab' \rangle + \langle a'b \rangle - \langle a'b' \rangle| \leq 2$$

- W stanie singletowym mechanika kwantowa daje:

$$|\langle ab \rangle + \langle ab' \rangle + \langle a'b \rangle - \langle a'b' \rangle| = 2\sqrt{2}$$

- Korelacje kwantowe są silniejsze niż klasyczne!
- Lokalna teoria zmiennych ukrytych nie może odtworzyć korelacji kwantowych
- Możliwe są eksperymentalne testy mechaniki kwantowej!

6 Eksperymentalne testy

- Wiele eksperymentów pokazało łamanie nierówności Bella:
Freedman, Clauser, 1972, Fry, Thompson, 1976, Aspect, Grangier, Roger, 1981, 1982, Ou, Mandel, 1988, Tapster, Rarity, Owens, 1994, Tittel, Brendel, Zbinden, Gisin, 1998, Weihs, Jennewein, Simon, Weinfurter, Zeilinger, 1998, Rowe, Kielpinski, Meyer, Sackett, Itano, Monroe, Wineland, 2001
- Lokalny realizm nie daje się obronić w świetle faktów eksperymentalnych!
- Korelacje kwantowe czy splątanie stanów kwantowych to dzisiaj podstawa informatyki kwantowej.

6 Eksperymentalne testy

- Wiele eksperymentów pokazało łamanie nierówności Bella:
Freedman, Clauser, 1972, Fry, Thompson, 1976, Aspect, Grangier, Roger, 1981, 1982, Ou, Mandel, 1988, Tapster, Rarity, Owens, 1994, Tittel, Brendel, Zbinden, Gisin, 1998, Weihs, Jennewein, Simon, Weinfurter, Zeilinger, 1998, Rowe, Kielinski, Meyer, Sackett, Itano, Monroe, Wineland, 2001
- Lokalny realizm nie daje się obronić w świetle faktów eksperymentalnych!
- Korelacje kwantowe czy splątanie stanów kwantowych to dzisiaj podstawa informatyki kwantowej.

6 Eksperymentalne testy

- Wiele eksperymentów pokazało łamanie nierówności Bella:
Freedman, Clauser, 1972, Fry, Thompson, 1976, Aspect, Grangier, Roger, 1981, 1982, Ou, Mandel, 1988, Tapster, Rarity, Owens, 1994, Tittel, Brendel, Zbinden, Gisin, 1998, Weihs, Jennewein, Simon, Weinfurter, Zeilinger, 1998, Rowe, Kielinski, Meyer, Sackett, Itano, Monroe, Wineland, 2001
- Lokalny realizm nie daje się obronić w świetle faktów eksperymentalnych!
- Korelacje kwantowe czy splątanie stanów kwantowych to dzisiaj podstawa informatyki kwantowej.

7 Technologia kwantowa

- Dzisiaj możemy już mówić o rozwoju **technologii kwantowej**, która wykorzystuje nieklasyczne własności układów kwantowych do celów użytecznych.
- Kryptografia kwantowa osiągnęła już status **produktu rynkowego**
- Dokonano teleportacji kwantowej zarówno stanów fotonowych (**Zeilinger, 1997**) jak i atomowych (**Blatt, 2004, Wineland, 2004**)
- W perspektywie rysuje się możliwość zbudowania **komputera kwantowego** o niezwykłych możliwościach

7 Technologia kwantowa

- Dzisiaj możemy już mówić o rozwoju **technologii kwantowej**, która wykorzystuje nieklasyczne własności układów kwantowych do celów użytecznych.
- Kryptografia kwantowa osiągnęła już status **produktu rynkowego**
- Dokonano teleportacji kwantowej zarówno stanów fotonowych (**Zeilinger, 1997**) jak i atomowych (**Blatt, 2004, Wineland, 2004**)
- W perspektywie rysuje się możliwość zbudowania **komputera kwantowego** o niezwykłych możliwościach

7 Technologia kwantowa

- Dzisiaj możemy już mówić o rozwoju **technologii kwantowej**, która wykorzystuje nieklasyczne własności układów kwantowych do celów użytecznych.
- Kryptografia kwantowa osiągnęła już status **produktu rynkowego**
- Dokonano teleportacji kwantowej zarówno stanów fotonowych (**Zeilinger, 1997**) jak i atomowych (**Blatt, 2004, Wineland, 2004**)
- W perspektywie rysuje się możliwość zbudowania **komputera kwantowego** o niezwykłych możliwościach

7 Technologia kwantowa

- Dzisiaj możemy już mówić o rozwoju **technologii kwantowej**, która wykorzystuje nieklasyczne własności układów kwantowych do celów użytecznych.
- Kryptografia kwantowa osiągnęła już status **produktu rynkowego**
- Dokonano teleportacji kwantowej zarówno stanów fotonowych (**Zeilinger, 1997**) jak i atomowych (**Blatt, 2004, Wineland, 2004**)
- W perspektywie rysuje się możliwość zbudowania **komputera kwantowego** o niezwykłych możliwościach



Anton Zeilinger demonstruje pierwszy czek przesłany z wykorzystaniem kryptografii kwantowej (21 kwietnia 2004)

8 Kilka uwag na koniec

- Mechanika kwantowa jest nielokalna. I wcale nam to nie przeszkadza!
- Na poziomie kwantowym porządek jest większy niż na poziomie klasycznym pomimo tego, że opis jest probabilistyczny. Korelacje kwantowe są silniejsze od klasycznych!
- Potrafimy wykorzystywać korelacje kwantowe do celów użytecznych.
- Twierdzenie Bella uważane jest za jedno z największych osiągnięć fizyki, a nawet nauki.
- Einstein się mylił, ale praca EPR odegrała ogromną rolę w rozwoju nauki.

8 Kilka uwag na koniec

- Mechanika kwantowa jest nielokalna. I wcale nam to nie przeszkadza!
- Na poziomie kwantowym porządek jest większy niż na poziomie klasycznym pomimo tego, że opis jest probabilistyczny. Korelacje kwantowe są silniejsze od klasycznych!
- Potrafimy wykorzystywać korelacje kwantowe do celów użytecznych.
- Twierdzenie Bella uważane jest za jedno z największych osiągnięć fizyki, a nawet nauki.
- Einstein się mylił, ale praca EPR odegrała ogromną rolę w rozwoju nauki.

8 Kilka uwag na koniec

- Mechanika kwantowa jest nielokalna. I wcale nam to nie przeszkadza!
- Na poziomie kwantowym porządek jest większy niż na poziomie klasycznym pomimo tego, że opis jest probabilistyczny. Korelacje kwantowe są silniejsze od klasycznych!
- Potrafimy wykorzystywać korelacje kwantowe do celów użytecznych.
- Twierdzenie Bella uważane jest za jedno z największych osiągnięć fizyki, a nawet nauki.
- Einstein się mylił, ale praca EPR odegrała ogromną rolę w rozwoju nauki.

8 Kilka uwag na koniec

- Mechanika kwantowa jest nielokalna. I wcale nam to nie przeszkadza!
- Na poziomie kwantowym porządek jest większy niż na poziomie klasycznym pomimo tego, że opis jest probabilistyczny. Korelacje kwantowe są silniejsze od klasycznych!
- Potrafimy wykorzystywać korelacje kwantowe do celów użytecznych.
- Twierdzenie Bella uważane jest za jedno z największych osiągnięć fizyki, a nawet nauki.
- Einstein się mylił, ale praca EPR odegrała ogromną rolę w rozwoju nauki.

8 Kilka uwag na koniec

- Mechanika kwantowa jest nielokalna. I wcale nam to nie przeszkadza!
- Na poziomie kwantowym porządek jest większy niż na poziomie klasycznym pomimo tego, że opis jest probabilistyczny. Korelacje kwantowe są silniejsze od klasycznych!
- Potrafimy wykorzystywać korelacje kwantowe do celów użytecznych.
- Twierdzenie Bella uważane jest za jedno z największych osiągnięć fizyki, a nawet nauki.
- Einstein się mylił, ale praca EPR odegrała ogromną rolę w rozwoju nauki.



Dziękuję!

2005
Światowy Rok
FIZYKI