

# Rewolucja kwantowa



**Louis Victor  
de Broglie**  
(1892 - 1987)



**Werner  
Heisenberg**  
(1901 - 1976)



**Erwin  
Schrödinger**  
(1887 - 1961)



**Pascual  
Jordan**  
(1902 - 1980)



**Max  
Born**  
(1882 - 1970)



**Wolfgang  
Pauli**  
(1900 - 1958)



**Paul Adrien  
Dirac**  
(1902 - 1984)



**Niels Hendrik  
Bohr**  
(1885 - 1962)

Z A. Wróblewskiego





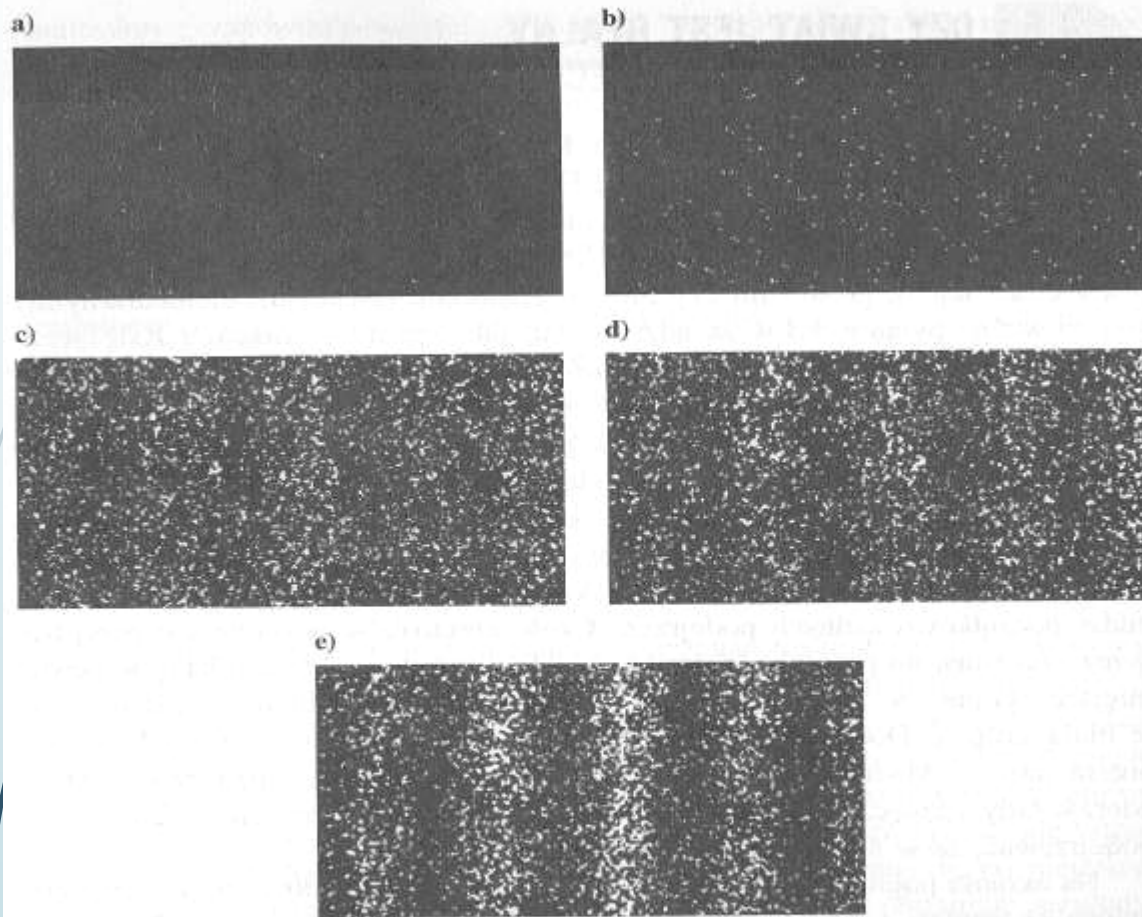
**KAMIENIE MIŁOWE**  
najważniejsze doświadczenia  
związane z poznaniem budowy **materii**

**Część 3**  
**Nowe cechy mikroświata**

2.3.4

✓ Eksperyment z podwójną szczeliną (ang. double slit)





**Rys. 1.7.** Oryginalny obraz interferencji elektronu wykonany przez Akirę Tonomurę [*Am. J. Physics*, 57 (1989) 117] na dwóch szczelinach. a) 10 elektronów; b) 100 elektronów; c) 3000 elektronów — już można coś podejrzewać; d) 20000 elektronów — nie ma wątpliwości, że będziemy mieć jakąś niespodziankę; e) 70000 elektronów — jest! Wniosek: jest tylko jedna możliwość — każdy z elektronów przechodził równocześnie przez dwie szczeliny (wg J. Gribbin, „Encyklopedia fizyki kwantowej”, Amber, 1998, s. 89)

Trudność ma głównie charakter psychologiczny; przybiera ona postać nieustannych cierpień powodowanych przez powtarzane pytanie „ale jak to jest możliwe?”, będące wyrazem niekontrolowanego, lecz całkowicie bezskutecznego pragnienia zrozumienia zjawisk kwantowych przez odwołanie się do czegoś znanego.

R. Feynman



# Dyfrakcja $C_{60}$ na (dwóch) szczelinach

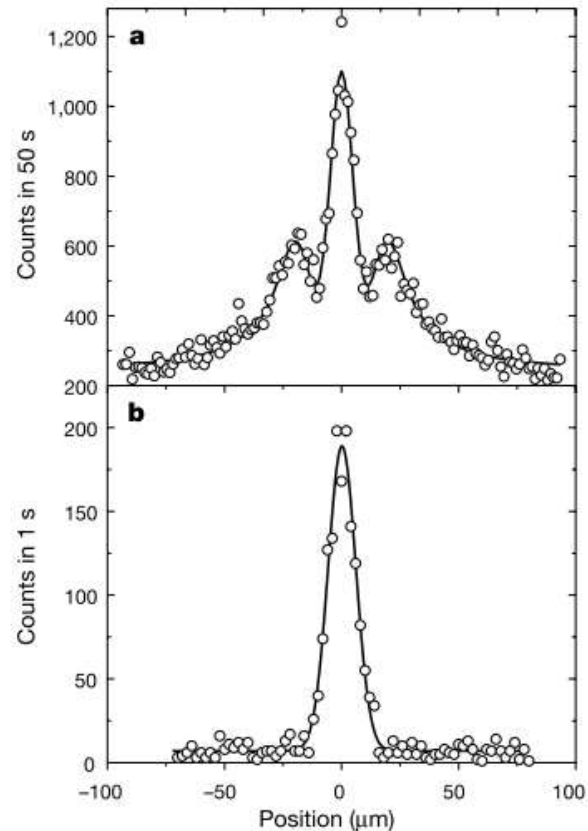
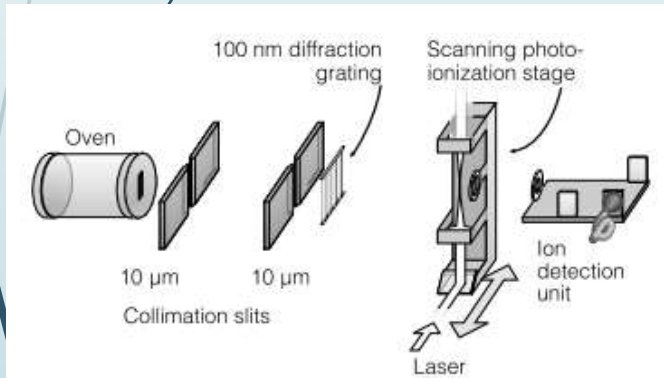
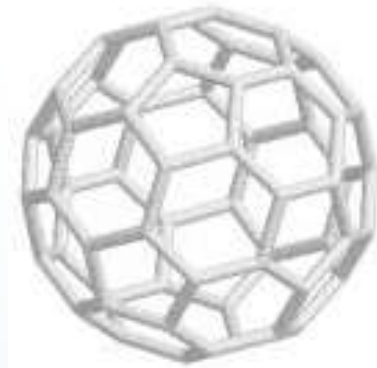
2.3. 6

**letters to nature**

## Wave-particle duality of $C_{60}$ molecules

Markus Arndt, Olaf Nairz, Julian Vos-Andreae, Claudia Keller, Gerbrand van der Zouw & Anton Zeilinger

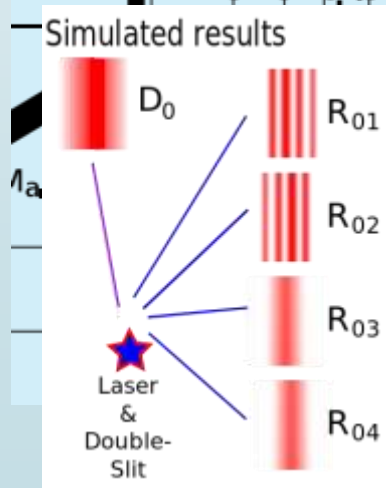
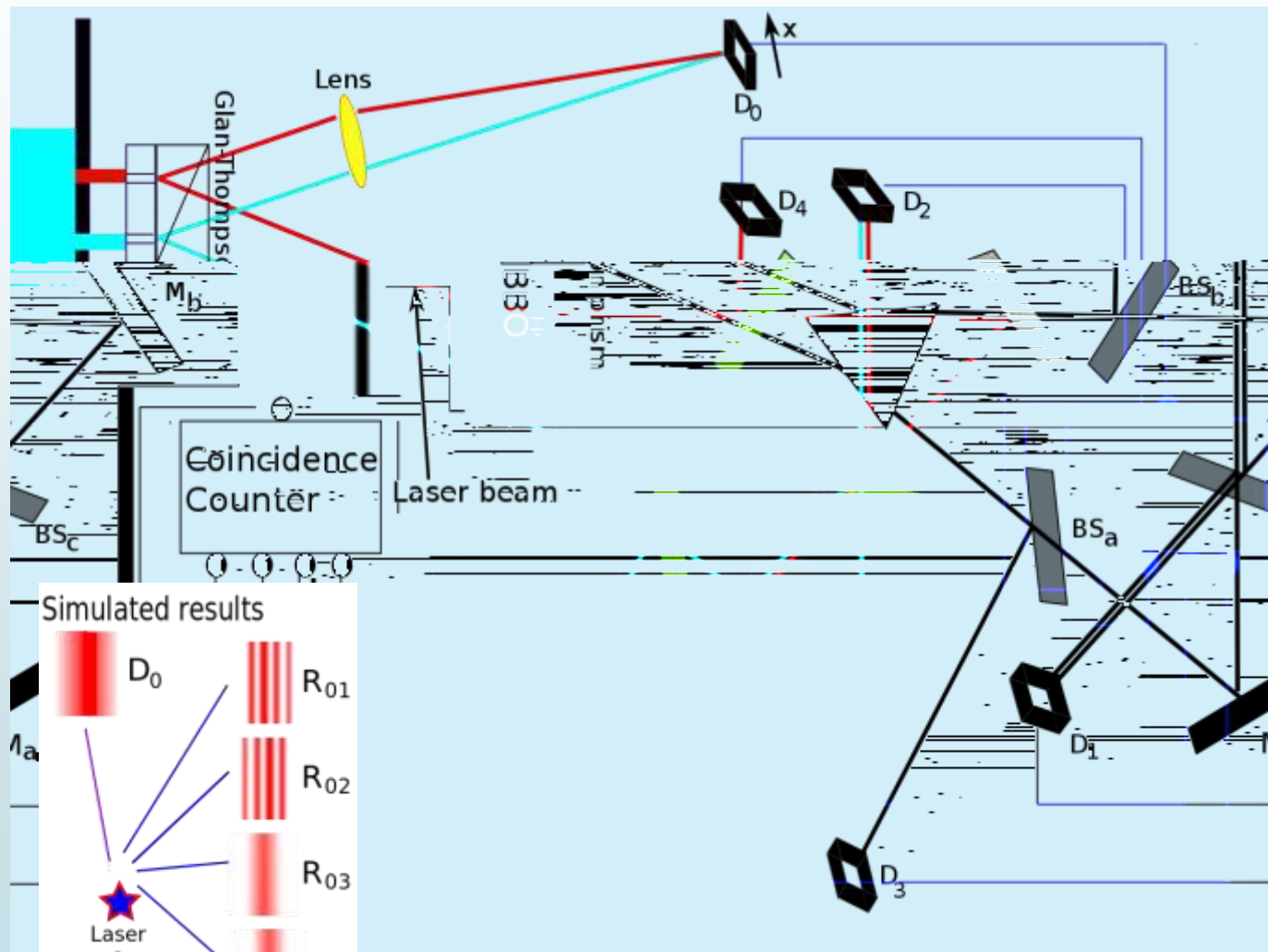
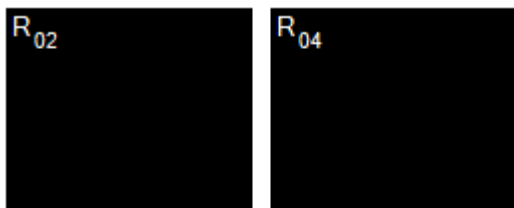
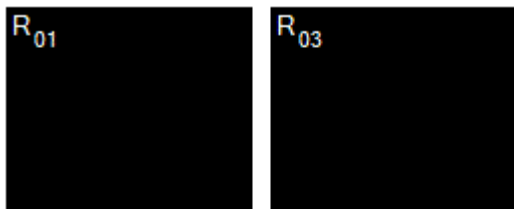
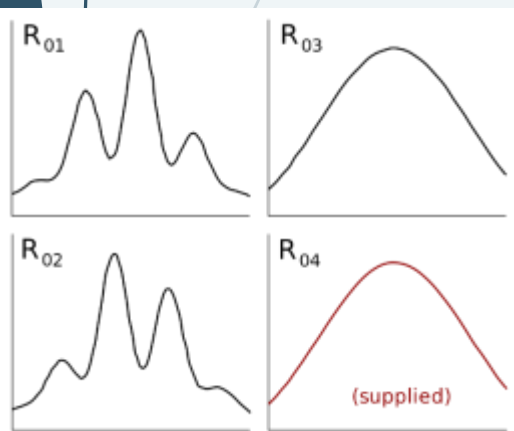
NATURE 401, 680-682 (2000)



**Figure 2** Interference pattern produced by  $C_{60}$  molecules. **a**, Experimental recording (open circles) and fit using Kirchhoff diffraction theory (continuous line). The expected zeroth and first-order maxima can be clearly seen. Details of the theory are discussed in the text. **b**, The molecular beam profile without the grating in the path of the molecules.

2.3.7

[https://en.wikipedia.org/wiki/Delayed-choice\\_quantum\\_eraser](https://en.wikipedia.org/wiki/Delayed-choice_quantum_eraser)

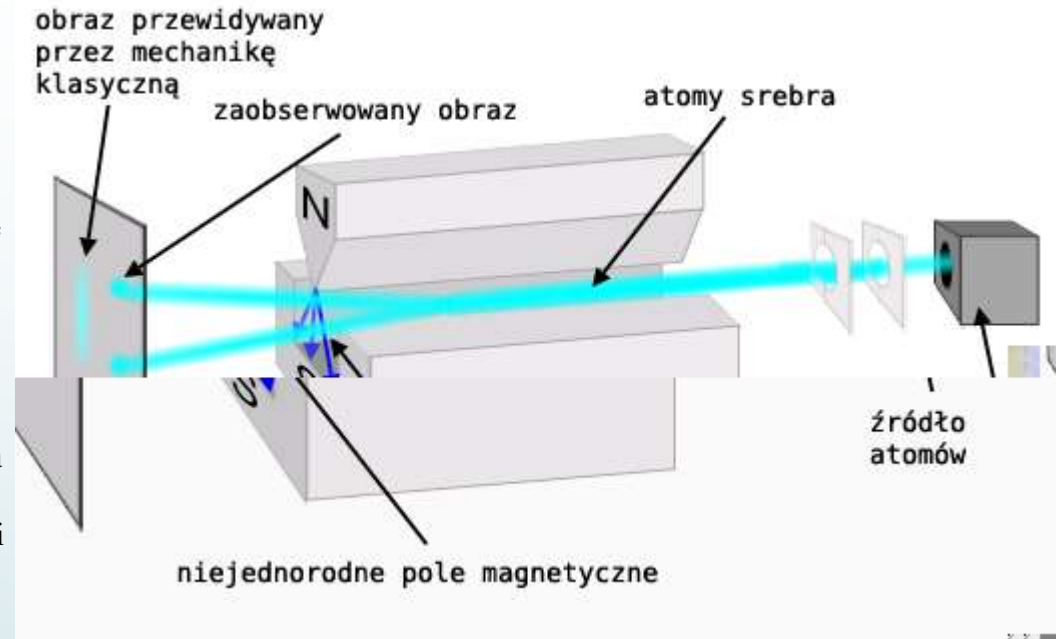


# Sterna-Gerlacha

[https://pl.wikipedia.org/wiki/Do%C5%9Bwiadczenie\\_Sterna-Gerlacha](https://pl.wikipedia.org/wiki/Do%C5%9Bwiadczenie_Sterna-Gerlacha)

## 2.3. 8

1. eksperyment przeprowadzony będący dowodem na istnienie kwantowania momentu pędu.
2. Doświadczenie to polegało na przepuszczeniu wiązki atomów srebra przez niejednorodne pole magnetyczne i obserwacji obrazu wiązki na ekranie (np. kliszy fotograficznej).
3. Atomy srebra mają niezerowy własny moment pędu (spin) i związany z nim moment magnetyczny. Oddziaływanie tego momentu magnetycznego z zewnętrznym polem magnetycznym zmienia tor ruchu atomu. Zmiana ta zależy od orientacji wektora momentu pędu w przestrzeni, a dokładniej od wartości rzutu tego wektora na kierunek zewnętrznego pola.



Ponieważ kierunki spinów atomów opuszczających piec są przypadkowe, to, zgodnie z mechaniką klasyczną, wartość tego rzutu może przyjąć dowolną wartość ograniczoną tylko przez wartość (długość wektora) momentu magnetycznego. Tym samym odchylenie toru atomu może być dowolne, pomiędzy wartościami skrajnymi odpowiadającymi ustawieniom spinu równoległe i antyrównoległe do pola. Mechanika klasyczna przewiduje więc, że obraz wiązki na ekranie powinien być jedną plamą rozciągniętą wzdłuż kierunku pola magnetycznego.

Według mechaniki kwantowej przewidywany wynik eksperymentu jest inny: rejestracja położenia atomu na ekranie po przejściu przez magnes jest aktem pomiaru składowej momentu pędu atomu w kierunku pola magnetycznego w magnesie, a pomiar taki może dać tylko pewną dyskretną wartość. W ogólności dla spinu  $s$  mamy  $2s+1$  możliwych wyników pomiaru. W wypadku cząstki o spinie  $s = 1/2$  możliwe są więc dwa wyniki takiego pomiaru: zgodny z kierunkiem wektora i przeciwny do niego.

Według mechaniki kwantowej w eksperymencie z atomami srebra powinniśmy więc rejestrować atomy docierające tylko do dwóch punktów ekranu, w przypadku użycia wiązki atomów idealnie jednorodnej i o bardzo małych rozmiarach poprzecznych. W praktyce, ze względu na skończone rozmiary poprzeczne wiązki i nieunikniony rozrzut prędkości atomów otrzymuje się dwie odseparowane plamy. Doświadczenie to wykonali po raz pierwszy w 1922 dwaj fizycy niemieccy: Otto Stern (1888-1969) i Walter Gerlach (1889-1979). Teoretyczne objaśnienie spinu oraz doświadczenia Sterna-Gerlacha podał w 1927 Wolfgang Pauli (równanie Pauliego), rozszerzając formalizm kwantowomechaniczny wprowadzony przez Schrödingera (równanie Schrödingera). Spin jest własnością wynikającą z relatywistycznej niezmienniczości praw fizyki, co pokazał w 1928 Paul Dirac (równanie Diraca).



**WNIOSKI**  
wypływające z  
**KAMIENI MILOWYCH**

**nowa terminologia**

**oraz**

**nowe kamienie milowe ...**



**Zasada nieoznaczoności**

**Superpozycja stanów**

**Koherencja - dekoherencja**

**Eksperyment EPR**

**Teleportacja kwantowa**

**(Teoremat Bell'a)**

...

**Interpretacje formalizmu mechaniki kwantowej**



**Współczesna chemia**

[https://pl.wikipedia.org/wiki/Dekoherencja\\_kwantowa](https://pl.wikipedia.org/wiki/Dekoherencja_kwantowa)

[https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum\\_decoherence](https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_decoherence)

# Superposition of states and decoherence

# Zasada nieoznaczoności

2.3. 12

**Iloczyn niepewności pomiaru pary wielkości fizycznych kanonicznie sprzężonych jest zawsze nie mniejszy od stałej wartości:**

$$\Delta p \Delta x \geq \frac{h}{2\pi} = \hbar$$

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{h}{2\pi} = \hbar$$

Pary wielkości kanonicznie sprzężone:  
Pęd, położenie  
Moment pędu, położenie kątowe  
Energia, czas



Werner Heisenberg  
(1927)

- **Fizyka klasyczna**

- dokładność pomiaru jest zdeterminowana jedynie jakością aparatury pomiarowej
- Nie ma teoretycznych ograniczeń na dokładność z jaką mogą być wykonane pomiary

- **Mechanika kwantowa**

- Obowiązuje zasada nieoznaczoności: pewnych wielkości fizycznych nie można zmierzyć równocześnie z dowolną dokładnością

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\downarrow\rangle - |\downarrow\uparrow\rangle)$$

2.3. 13

## Superpozycja stanów czyli kot Schrödingera



→ Jeden z najsłynniejszych paradoksów fizyki - eksperyment myślowy, który ilustruje pojęcie superpozycji stanów kwantowych, zgodnie z mechaniką kwantową - wymyślony w 1935 r przez Edwina Schrödingera.

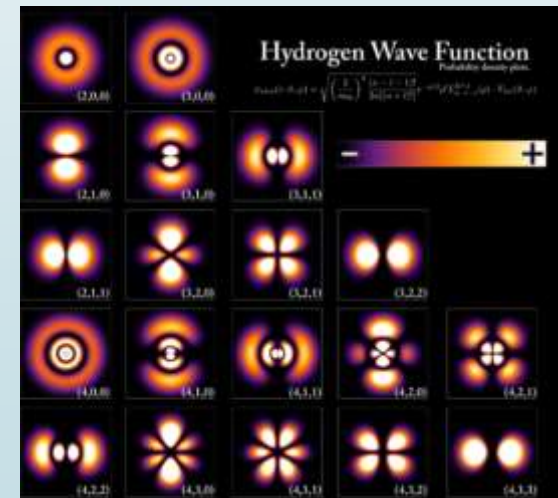
→ Wyobraźmy sobie, iż zamykamy kota w pudełku razem z atomem. W pudełku jest śmiertelny mechanizm: jeśli atom znajdzie się w określonym położeniu, to uwolni się trucizna, która uśmierci kota. Ale atom - jak przystało na obiekt z mikroświata - zachowuje się probabilistycznie, mogąc być jednocześnie w dozwolonych stanach z różnych od zera prawdopodobieństwem.

Nosi to nazwę superpozycji stanów.

→ W skrajnym przypadku mogą być dwa stany: w jednym z nich uaktywni truciznę, w innym - będzie dla kota całkiem nieszkodliwy. Pytanie, czy kot w pudełku żyje więc, czy też nie?



Rozkłady prawdopodobieństwa związane z kilkoma stanami atomu wodoru





## Dekoherencja stanów czyli jak powstaje makroświat

- Jeśli układ fizyczny jest całkowicie odizolowany od otoczenia, to mechanika kwantowa doskonale opisuje właściwości układu.
- Gdy układ poddawany jest wpływowi otoczenia (fotonów, subcząstek, cząsteczek elementarnych, itp.) to następuje dekoherencja co wywołuje, że kwantowe superpozycje stanów, bardzo szybko rozpadają się. Układ „wybiera” jeden z dozwolonych stanów (realizuje swój stan na jedną z wielu możliwości)
- Dekoherencja jest procesem fizycznym, polegającym na „ucieczce” informacji o względnych fazach tworzących dany stan do innych, nieobserwowanych stopni swobody. Ponieważ informacja fazowa jest zniszczona, stan nie może interferować. Dekoherencja dotyczy, jak widać, układu otwartego
- Tak naprawdę dekoherencja daje tylko "menu" dozwolonych stanów, nie gwarantując, który z nich zostanie zajęty aktorem jest... kot. Słowem, kot ginie albo pozostaje żywy. Ale już nie pozostaje w tych dwóch stanach jednocześnie. - Nie potrzeba obserwatora, przyrządu bądź bezpośredniego pomiaru. To otoczenie nieustannie śledzi układy, sprawiając, że z wszystkich kwantowych możliwości (martwy lub żywy) makroskopowe obiekty (kot) wybierają tylko niektóre stany



### teleportacja

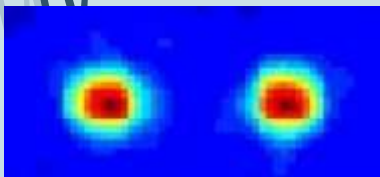
Anton Zeilinger wraz ze swoimi współpracownikami, pokazał eksperymentalnie, że teleportacja stanów fotonowych jest możliwa (Nature, 390, 575 (1997)).

Rainer Blatt wraz z grupą z Uniwersytetu w Innsbrucku (Austria) dokonał teleportacji stanów kwantowych jonów wapnia  $^{40}\text{Ca}^+$  w pułapce jonowej (Nature, 429, 734 (2004)).



David Wineland wraz z grupą z NIST, Boulder, Kolorado, USA, dokonał teleportacji stanów kwantowych jonów berylu  $^9\text{Be}^+$  w pułapce jonowej (Nature, 429, 737 (2004)).

- Na zewnętrznej powłoce berylu krążą dwa elektrony. Naukowcy za pomocą promienia lasera usunęli jeden z nich. Tak powstał jon berylu. Ostudzili go innym laserem do temperatury bliskiej zera bezwzględnego i wzbudzali sekwencją strzałów lasera. Zmierzone sygnały dokumentowały, że jest on równocześnie w dwóch różnych stanach i w dwóch różnych miejscach (oddalonych o kilkadziesiąt nanometrów).
- Następnie wyprowadzono układ z koherencji modyfikując wpływy otoczenia - tzn. jon odnajdywał się tylko w jednym miejscu. Dekohierencja następuje tym szybciej, im bardziej pozycje jonu były od siebie oddalone.



# Eksperyment EPR

„...God does not play dice...”



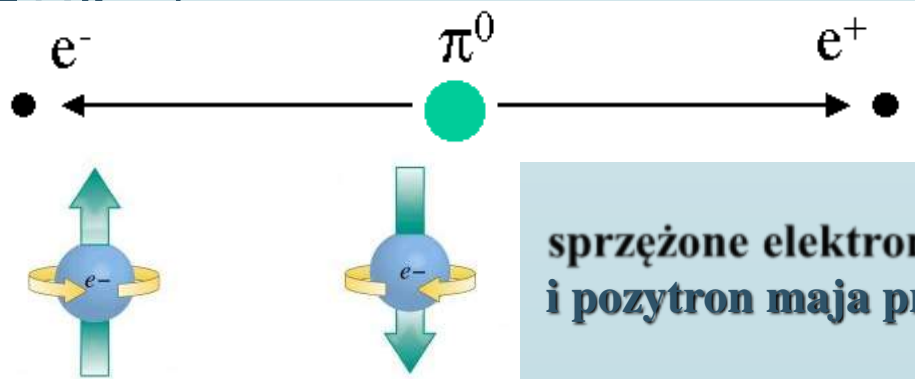
A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen: "Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?" Physical Review 41, 777 (15 May 1935).

2.3. 16

→ Alberta Einsteina krytycznie nastawiony do mechaniki kwantowej – mawiał iż "Bóg nie gra w kości", nigdy nie zaakceptował kwantowej teorii. Aby wykazać jej absurdalność w 1935 roku opublikował słynny polemiczny artykuł, w którym przeanalizował hipotetyczną sytuację - możliwą z punktu widzenia teorii kwantów, natomiast zupełnie nie do przyjęcia dla fizyki klasycznej oraz dla zdrowego rozsądku.

→ Najprościej ukazać ją na przykładzie pary cząstek, np. fotonów, koherencyjnie połączonych. W takim wypadku polaryzacja jednego fotonu jest skorelowana i uzależniona od drugiego. Pomiar polaryzacji jednego z fotonów automatycznie narzuca wartość drugiego, bez konieczności uciekania się do osobnego pomiaru. Drugi foton w jakiś sposób "wie", że sprawdziliśmy jego towarzysza. I nie ma znaczenia, jak bardzo oddalony jest od niego w momencie pomiaru. Einstein nazwał to zjawisko upiornym oddziaływaniem na odległość.

Rozpad pionu generuje sprzężone elektron i pozytron



sprzężone elektron i pozytron mają przeciwne spiny

**Sformułowanie EPR: dla pewnych stanów kwantowych mechanika kwantowa przewiduje silną korelację pomiędzy oddalonymi przestrzennie eksperymentami (obiektami kwantowymi).**



A. Aspect, Dalibard, G. Roger:  
"Experimental test of Bell's  
inequalities using time-varying  
analyzers" *Physical Review Letters*  
49 #25, 1804 (20 Dec 1982).

### Experimental Test of Bell's Inequalities Using Time-Varying Analyzers

Alain Aspect, Jean Dalibard,<sup>(a)</sup> and Gérard Roger

*Institut d'Optique Théorique et Appliquée, F-91406 Orsay Cédex, France*

(Received 27 September 1982)

Correlations of linear polarizations of pairs of photons have been measured with time-varying analyzers. The analyzer in each leg of the apparatus is an acousto-optical switch followed by two linear polarizers. The switches operate at incommensurate frequencies near 50 MHz. Each analyzer amounts to a polarizer which jumps between two orientations in a time short compared with the photon transit time. The results

are in good agreement with quantum mechanical predictions but violate Bell's inequality.

~~are in good agreement with quantum mechanical predictions but violate Bell's inequality.~~

~~are in good agreement with quantum mechanical predictions but violate Bell's inequality.~~

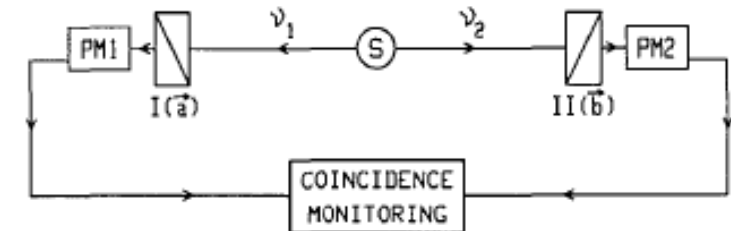


FIG. 1. Optical version of the Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm *Gedankenexperiment*. The pair of photons  $\nu_1$  and  $\nu_2$  is analyzed by linear polarizers I and II (in orientations  $\vec{a}$  and  $\vec{b}$ ) and photomultipliers. The coincidence rate is monitored.

**1981/82 Alain Aspect wraz ze swym zespołem z Orsay (Paryż) przeprowadził trzy doświadczenia (słynne na całym świecie). We wszystkich eksperymentach nierówności Bella nie zostały spełnione, co zostało przez większość fizyków uznane za dowód poprawności przewidywań mechaniki kwantowej i niemożliwość skonstruowania obiektywnej i lokalnej teorii opisującej zdarzenia kwantowe.**

**Doświadczenie nie było jednak doskonałe i zmierzono pewną ilość „przypadkowych” sygnałów, które pozostawiły jednak cień wątpliwości.**

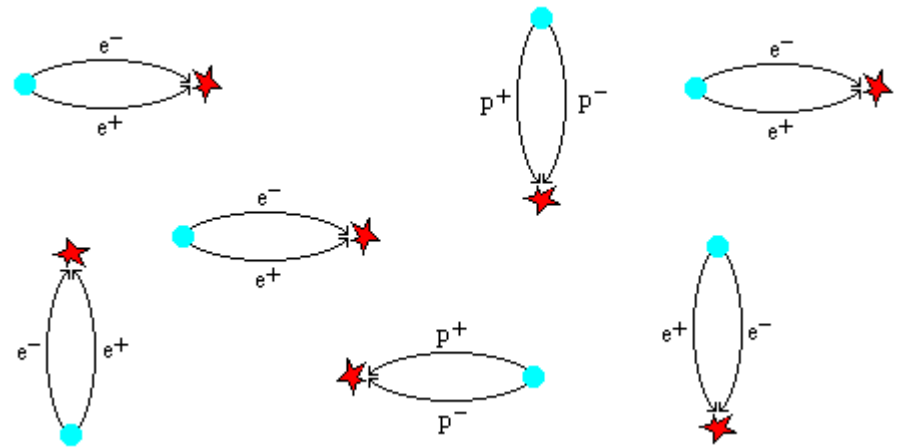
# Próżnia kwantowa

2.3. 18

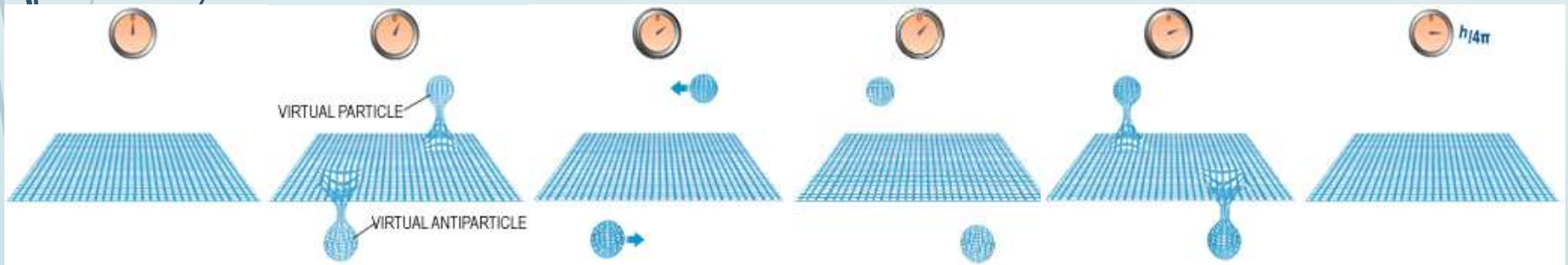
Próżnia nie jest pusta, a jej energia fluktuuje

$$E=mc^2$$

Fluktuacje energii mogą być postrzegane jako cząstki zwane wirtualnymi



Żadne z praw fizycznych nie jest łamane, gdy cząstka powstaje lub zanika w określonym czasie (zasada nieoznaczoności):



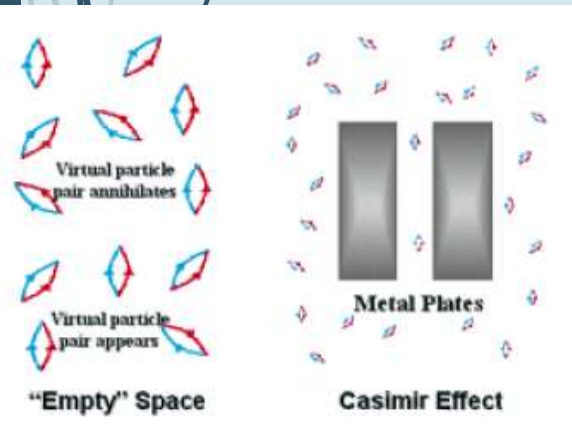
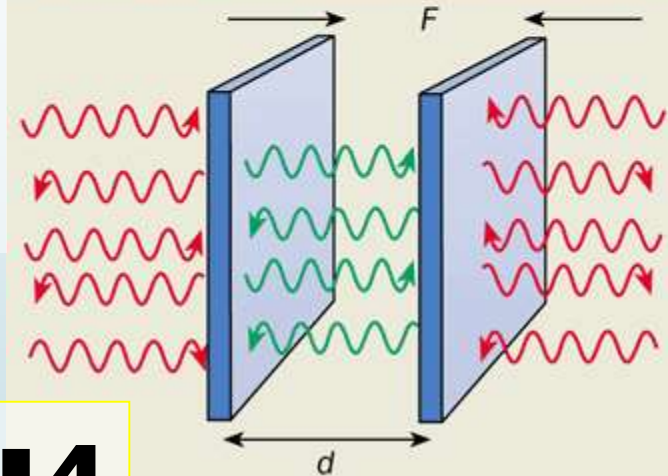


# Efekt Casimir'a

– doświadczalne potwierdzenie istnienia cząstek wirtualnych

2.3. 19

**Hendrik Casimir (1909-2000) fizyk duński, który jako pierwszy zauważył, że dwa lustra umieszczone w próżni muszą oddziaływać ze sobą – jako skutek nierównomiernego oddziaływania z cząstkami wirtualnymi. Średnie ciśnienie z zewnętrznej strony (czerwone) jest inne niż średnie ciśnienie działające na storne wewnętrzną (zielone). Skutkiem tego ścianki przyciągają się – co nosi nazwę efektu Casimira.**



$$F \sim A/d^4$$

$A$  - powierzchnia luster  
 $d$  - odległość między nimi