

Století kvantové teorie: Porozumění se nedostavuje a bláznovství nekončí

Zdeněk Havlas

Ústav organické chemie a biochemie AV ČR



19. století:

Něco je jinak, než předvídá klasická (newtonovská) mechanika!

1801 – Thomas Young: světlo se chová jako vlny

1859 – Gustav Kirchhoff: emise černého tělesa závisí pouze na jeho teplotě

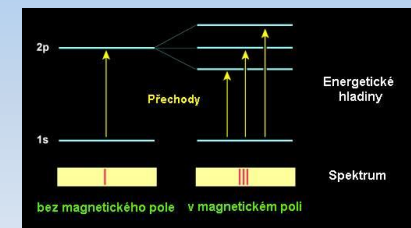
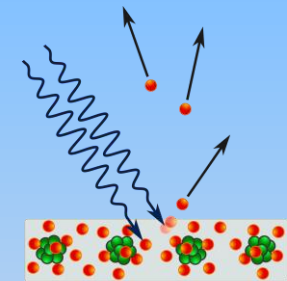
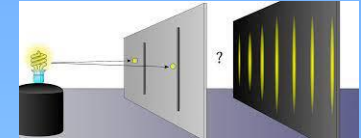
1860-1900 – Ludwig Eduard Boltzmann, James Clerk Maxwell: vývoj statistické mechaniky (entropie je míra neuspořádanosti)

1877 – Boltzmann: energetické hladiny by mohly být diskrétní (založeno na statistické mechanice)

1887 – Heinrich Hertz: objevil fotoelektrický efekt

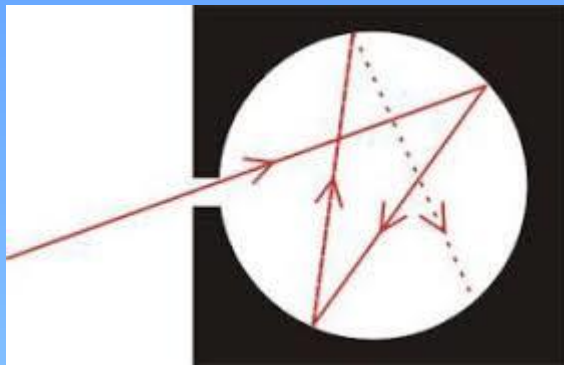
1888 – Hertz: experimentální důkaz existence elektromagnetických vln (predikovaných Maxwellem)

1897 – Pieter Zeeman: první pozoroval štěpení spektra v magnetickém poli (předpověděl Faraday), potvrdil elektromagnetickou povahu světla

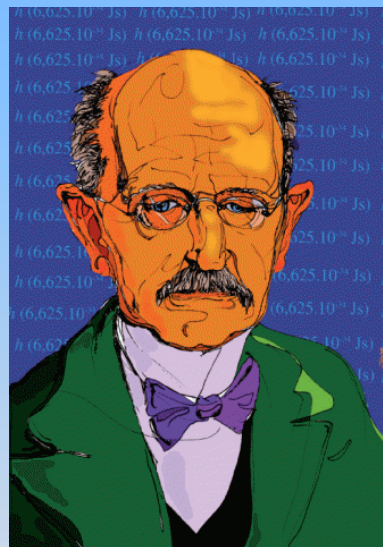


20. století: 1900

Záření černého tělesa



Max Planck

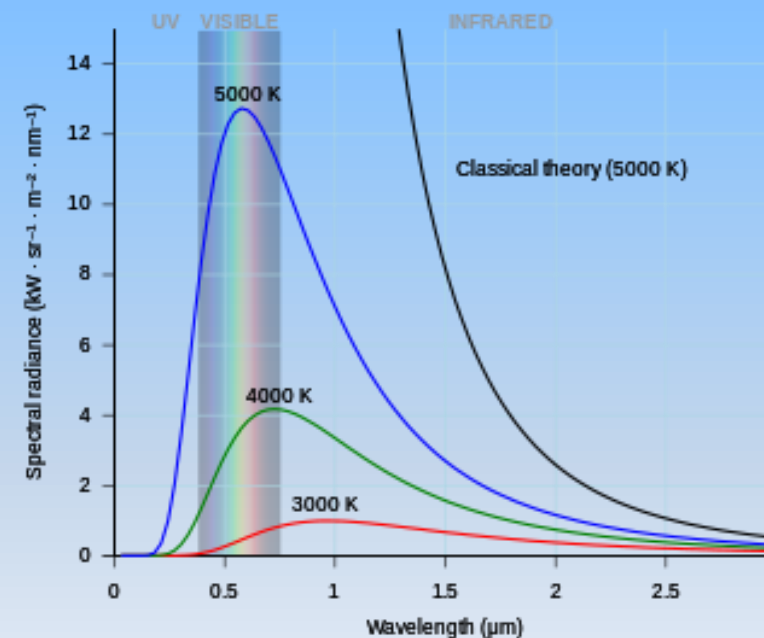


Elektromagnetická energie může být vyzařována pouze v kvantované formě, energie může být pouze násobkem elementární jednotky, $E = h\nu$

$$dI = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} d\lambda$$

Rayleighův-Jeansův zákon

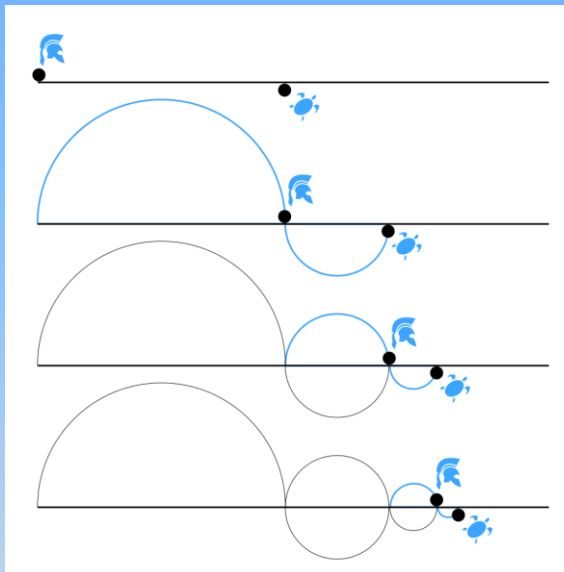
$$dI = \frac{8\pi kT}{\lambda^4} d\lambda$$



4. století př. n. l.: Zénónův paradox – Achilles želvu nepřehoní



Achilles



Zénón z Eleje

5. století př. n. l. Démokritos: hmotu nelze dělit do nekonečna -> **atom**

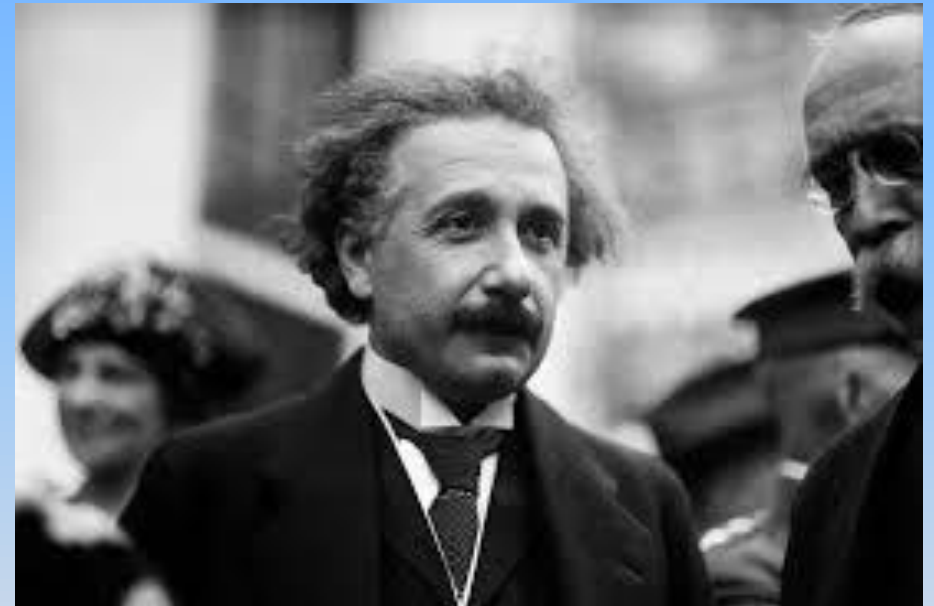
20. století: 1905

Fotoelektrický efekt

Albert Einstein

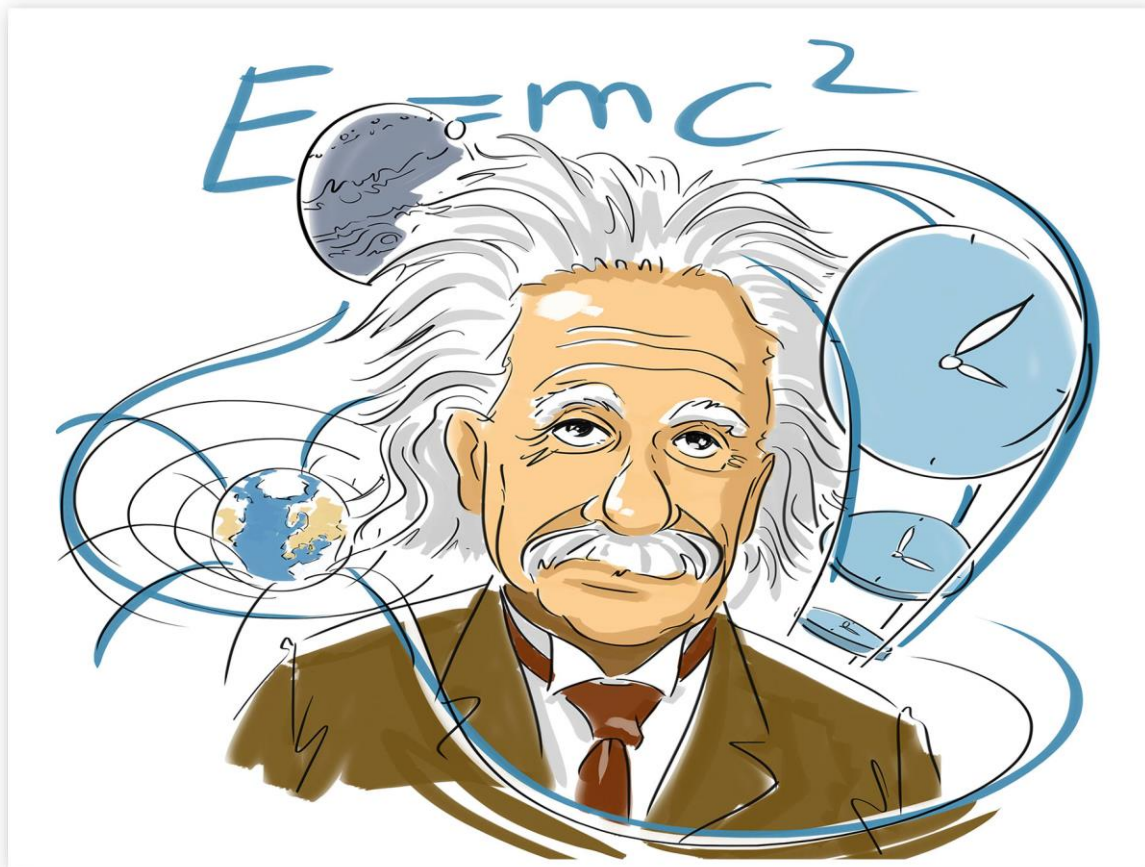
„Tradiční názor, že energie světla je rozložena spojitě v oblasti tímto světlem ozářené, působí při snaze o objasnění fotoelektrických jevů popsaných v Lenardově průkopnickém článku velké potíže.“

$$E_k = h\nu - W_0$$



20. století: 1905

Ekvivalence hmoty a energie, teorie relativity



Postuláty:

- Ve všech inerciálních vztažných soustavách probíhají fyzikální děje stejně (platí pro ně stejné fyzikální zákony)
- Rychlost světla ve vakuu je ve všech inerciálních vztažných soustavách stejná.

20. století: druhá dekáda

Nové experimenty, model atomu, chemická vazba, ...

- Anomálie spinu ^{14}N (1 oproti Rutherfordově předpovědi $\frac{1}{2}$ -> objev neutronu a neutrina)
- Určení magnetického dipólového momentu elektronu
- Bohrov model atomu
- Přesné změření náboje elektronu (a určení Avogadrovy konstanty)
- Teoretické určení magnetického momentu elektronu z Bohrova modelu atomu
- Srážka elektronu s Hg potvrdila kvantování atomových hladin energie
- Lewisova (dvojtečková) teorie chemické vazby a volných elektronových párů



20. století: 1924

Dualita částice a vlnění

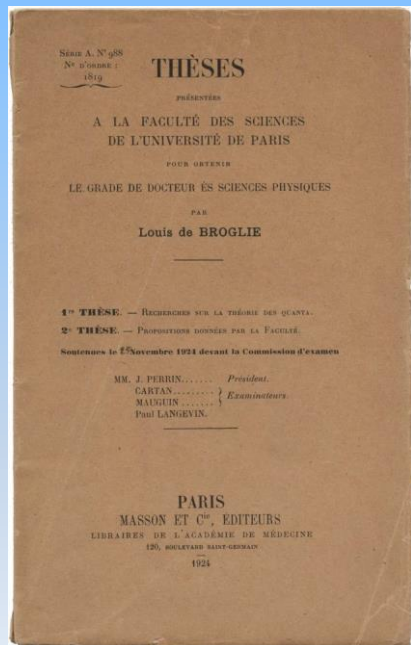
Louis Victor Pierre Raymond vévoda de Broglie

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

$$E = hv = mc^2$$

$$p = mv = \frac{E}{c} = \frac{hv}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

Údajně nejkratší dizertace (3-25 stran), v reedici 128 stran
Prý neobsahuje žádné citace
Neobsahuje experimentální důkazy (NE)



(1) La théorie du Rayonnement noir et les quanta, Réunion rapport de M. EINSTEIN, p. Les théories statistiques en thermodynamique, Conférences de M. H.-A. LORENTZ au Collège de France, Teubner, 1916, pp. 70 et 114.



20. století: třetí dekáda

- 1924 – Wolfgang Pauli: Princip výlučnosti, fermiony nemůžou existovat ve stejném kvantovém stavu (empirický zákon)
- 1925 – George Uhlenbeck a Samuel Goudsmit: postulovaly existenci elektronového spinu
- 1925 – Werner Heisenberg, Max Born, Pascual Jordan: maticová mechanika (formulace kvantové mechaniky)
- 1926 – Enrici Fermi: spinová statistika
- 1926 – Paul Dirac: Fermi-Diracova statistika
- **1926 – Erwin Schrödinger: odvodil vlnovou rovnici a zavedl Hamiltonův operátor $\hat{H}\psi = E\psi$**
- 1926-1932 – John von Neumann: vypracoval matematické základy kvantové mechaniky (Hermitovské operátory v Hilbertově prostoru)



20. století: 1927

Princip neurčitosti



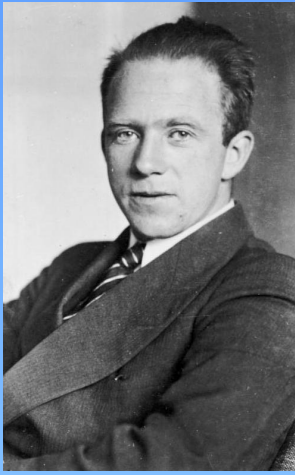
Werner Heisenberg

$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}$$

$$\Delta t \Delta E \geq \frac{\hbar}{2}$$

- Lze matematicky odvodit pomocí Cauchyho-Schwarzovy nerovnosti
- **Představa klasické fyziky**, že můžeme předpovědět chování systému, pokud známe jeho počáteční stav, je v praxi nepoužitelná
- Počáteční stav systému nikdy nemůžeme zjistit dostatečně přesně, protože nelze dostatečně přesně zjistit oba tyto konjugované parametry





20. století: 1927 Kodaňská interpretace

Niels Henrik David Bohr

Werner Karl Heisenberg

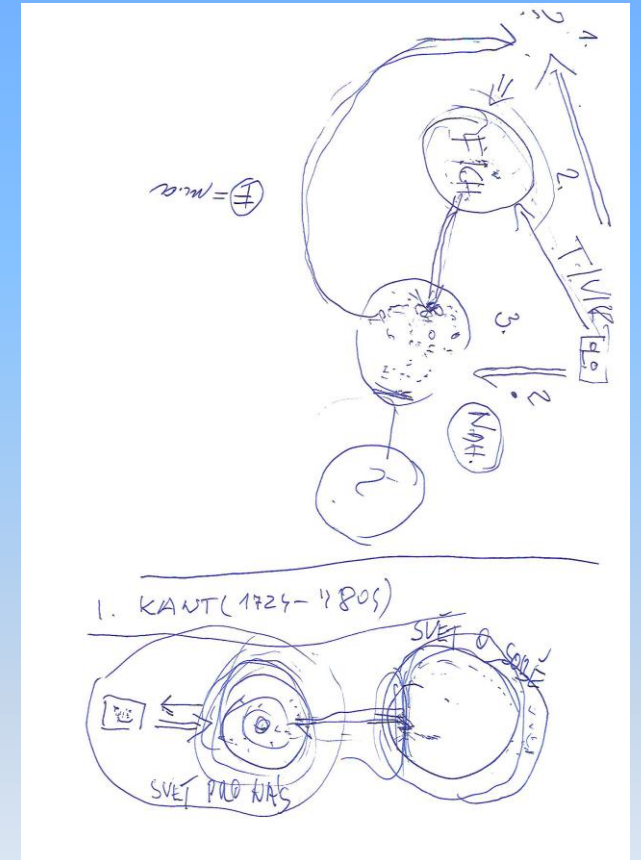
Hustota **pravděpodobnosti** nalezení částice v bodě x, y, z v čase t je rovna čtverci vlnové funkce

$$\rho = |\psi(x, y, z, t)|^2$$

$$\int |\psi|^2 dV = 1$$

Einstein:
Bůh nehraje v kostky

Co znamená porozumění fyzikální teorii? (či přírodě, mechanice, kvantové teorii, ...)



20. století: 1927

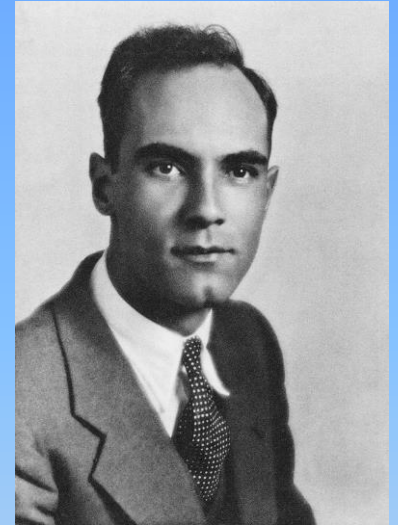
Kvantová relativistická rovnice



Paul Adrien Maurice Dirac

$$\left(i\hbar c \sum_{\mu=0}^3 \gamma^{\mu} \partial_{\mu} - mc^2 \right) \psi = 0$$

Vlnová funkce je čtyřkomponentní objekt = spinor



Carl David Anderson

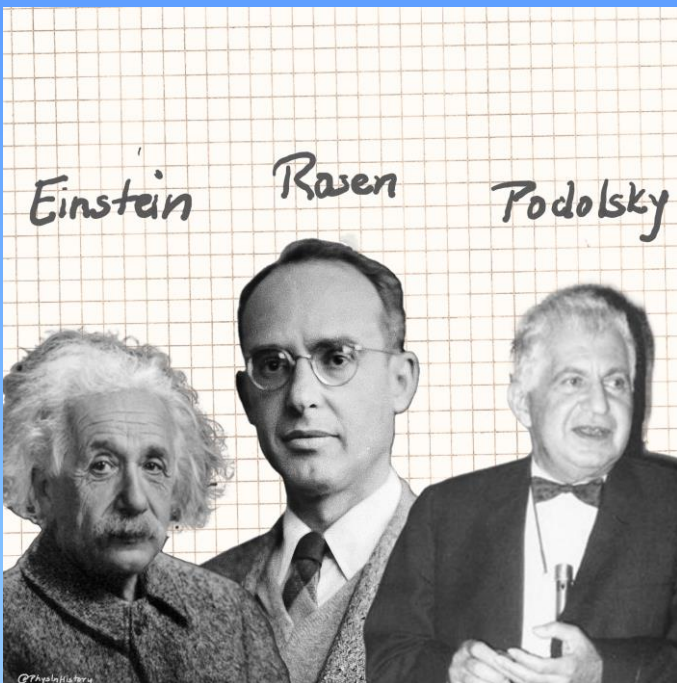
1930: Dirac předpovídá existenci pozitronu (antičástice, antihmota)

1932: Carl Anderson experimentálně potvrzuje existenci pozitronu

20. století: čtvrtá dekáda

- Příspěvky k teorii chemické vazby
- Výpočet molekulárních orbitálů vodíkové molekuly
- Příspěvky v oblasti radioaktivity (γ – záření, umělá radioaktivita, ...)
- Objev nových částic (mion)





20. století: 1935 EPR paradox

Žádná kvantová vlastnost neexistuje a priori, pokud ji měřícím zařízením nezaznamáme. Superpozice stavů.

EINSTEIN ATTACKS QUANTUM THEORY

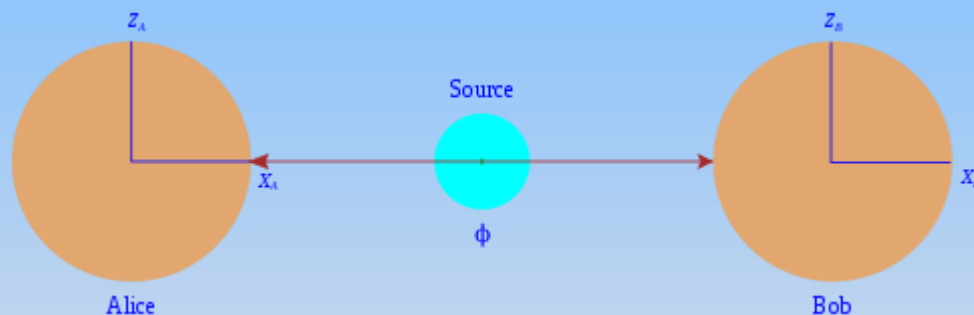
Scientist and Two Colleagues
Find It Is Not 'Complete'
Even Though 'Correct.'

SEE FULLER ONE POSSIBLE

Believe a Whole Description of
'the Physical Reality' Can Be
Provided Eventually.

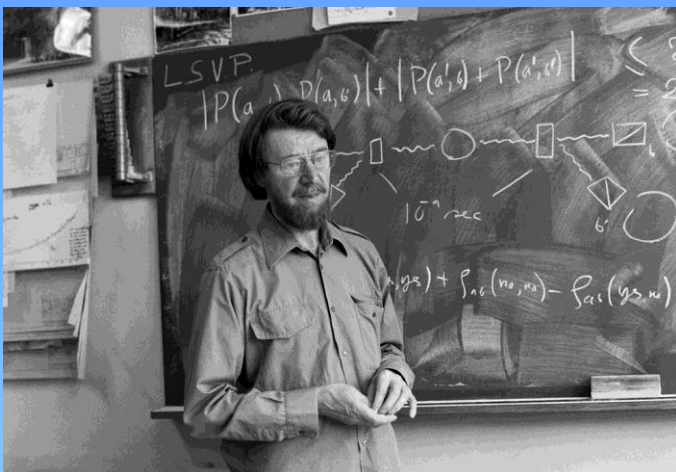
The New York Times, 5/4/1935

Myšlenkový experiment vedoucí
k závěru:
Kvantová mechanika nepodává
úplný popis fyzikální reality



Pravděpodobnostní charakter kvantové teorie je důsledkem existence skrytých proměnných, které nejsme schopni identifikovat

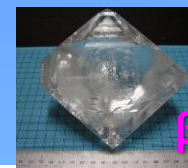




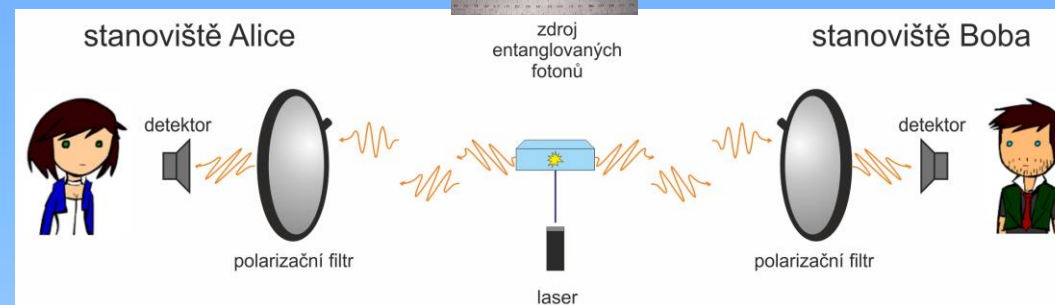
John Stewart Bell

20. století: 1964

Bellova nerovnost



β-barium



Lokální teorie (skryté parametry):

$$|\langle A_0 B_0 \rangle + \langle A_0 B_1 \rangle + \langle A_1 B_0 \rangle - \langle A_1 B_1 \rangle| \leq 2$$

Kvantová teorie:

$$|\langle A_0 B_0 \rangle + \langle A_0 B_1 \rangle + \langle A_1 B_0 \rangle - \langle A_1 B_1 \rangle| \leq 2\sqrt{2}$$

Návod na ověření teorie, ne interpretace teorie.

Alice	Bob
0	1
0	0
1	1
0	1
1	0
1	1
1	0
0	0

nezávislé
fotony

Alice	Bob
0	0
0	0
1	1
0	0
1	1
1	1
1	1
0	0

provázané
fotony



20. – 21. století: Testy Bellovy nerovnosti

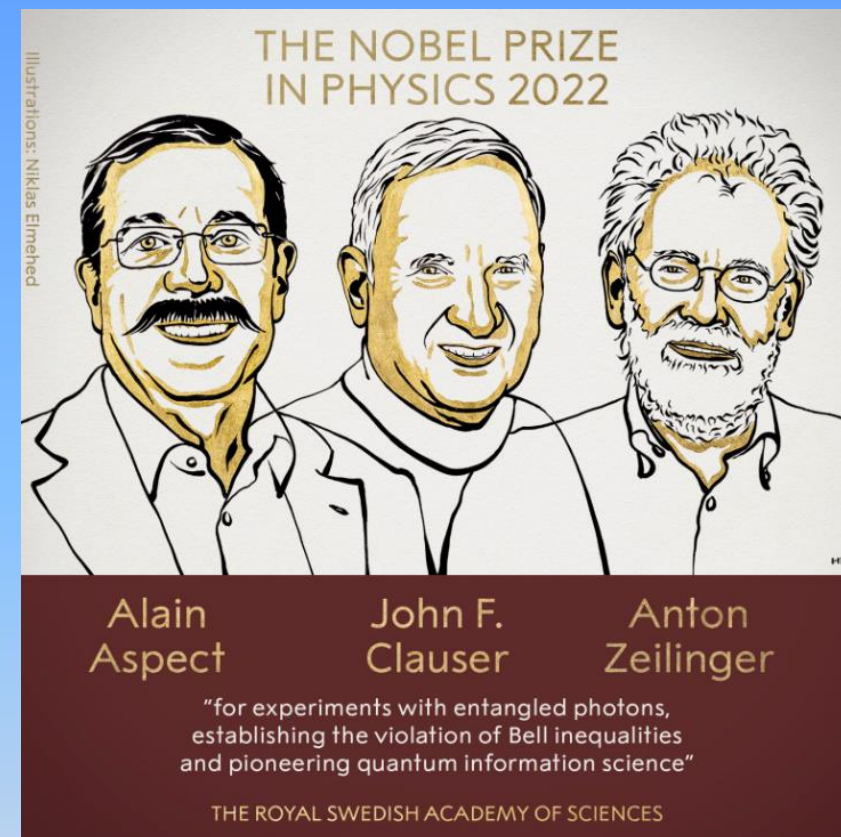
- Freedman and Clauser, **1972**. This was the first actual Bell test, using Freedman's inequality, a variant on the CH74 inequality.
- **Aspect, 1981-2**. A. Aspect and his team at Orsay, Paris, conducted three Bell tests using calcium cascade sources. The first and last used the CH74 inequality. The second was the first application of the CHSH inequality. The third (and most famous) was arranged such that the choice between the two settings on each side was made during the flight of the photons (as originally suggested by John Bell).
- Tittel and the Geneva group, 1998. The Geneva 1998 Bell test experiments showed that distance did not destroy the "entanglement". Light was sent in fibre optic cables over distances of several kilometers before it was analysed. As with almost all Bell tests since about 1985, a "parametric down-conversion" (PDC) source was used.
- Weihs' experiment under "strict Einstein locality" conditions 1998. G. Weihs and a team at Innsbruck, led by A. Zeilinger, conducted an ingenious experiment that closed the "locality" loophole, improving on Aspect's of 1982. The choice of detector was made using a quantum process to ensure that it was random. This test violated the CHSH inequality by over 30 standard deviations, the coincidence curves agreeing with those predicted by quantum theory.
- Pan et al.'s 2000 experiment on the GHZ state. This is the first of new Bell-type experiments on >2 particles; this one uses the so-called GHZ state of 3 particles.
- Rowe et al. 2001 are the first to close the detection loophole. The detection loophole was first closed in an experiment with two entangled trapped ions, carried out in the ion storage group of D. Wineland at the NIST in Boulder. The experiment had detection efficiencies well over 90%.
- Gröblacher et al. 2007 test of Leggett-type non-local realist theories. A specific class of non-local theories suggested by A. Leggett is ruled out. Based on this, the authors conclude that any possible non-local hidden variable theory consistent with quantum mechanics must be highly counterintuitive.
- Salart et al. 2008 separation in a Bell Test. This experiment filled a loophole by providing an 18 km separation between detectors, which is sufficient to allow the completion of the quantum state measurements before any information could have traveled between the two detectors.
- Ansmann et al. 2009 overcoming the detection loophole in solid state. This was the first experiment testing Bell inequalities with solid-state qubits (superconducting Josephson phase qubits were used). This experiment surmounted the detection loophole using a pair of superconducting qubits in an entangled state. However, the experiment still suffered from the locality loophole because the qubits were only separated by a few millimeters.
- Giustina et al. 2013, Larsson et al. 2014 overcoming the detection loophole for photons. The detection loophole for photons has been closed for the first time in a group by A. Zeilinger, using highly efficient detectors. This makes photons the first system for which all of the main loopholes have been closed, albeit in different experiments.
- Christensen et al. 2013 overcoming the detection loophole for photons. Setup similar to that of Giustina et al., who did just four long runs with constant measurement settings (one for each of the four pairs of settings). The present experiment was not pulsed so that formation of "pairs" from the two records of measurement results had to be done after the experiment which in fact exposes the experiment to the coincidence loophole. This led to a reanalysis of the experimental data in a way which removed the coincidence loophole, and fortunately the new analysis still showed a violation of the appropriate CHSH or CH inequality. The experiment was pulsed and measurement settings were reset in a random way, though only once every 1000 particle pairs, not every time.
- Hensen et al., Giustina et al., Shalm et al. **2015** loophole-free Bell tests. The first three significant-loophole-free Bell-tests were published within three months by independent groups in Delft, Vienna and Illinois. All three tests simultaneously addressed the detection loophole, the locality loophole, and the memory loophole. This makes them "loophole-free" in the sense that all remaining conceivable loopholes like superdeterminism require truly exotic hypotheses that might never get closed experimentally.



21. století: Kvantové technologie



The first quantum-safe video conference was held between President Chunli Bai of the Chinese Academy of Sciences in Beijing and President Anton Zeilinger of the Austria Academy of Sciences in Vienna, as **the first real-world demonstration of intercontinental quantum communication** on September 29th. (2017)



21. století: Kvantové technologie

Kvantový počítač v Ostravě



- Kvantová kryptografie
- Kvantová komunikace
- Kvantové senzory
- Kvantová metrologie času a frekvence
- **Kvantové počítače**

Funkční kvantový počítač **nebude** nikdy sestrojen

- Drtivou většinu času tráví opravou chyb
- Potřebuje obrovské množství hradel



20 – 21. století: Kvantová teorie

1. Každému kvantovému systému přísluší komplexní separabilní Hilbertův prostor \mathcal{H} (stavový prostor)
2. Každému čistému stavu odpovídá jednorozměrný podprostor \mathcal{H} reprezentovaný jednotkovým vektorem $|\Psi\rangle$
3. Každé pozorovatelné veličině odpovídá nějaký samozdružený operátor na prostoru \mathcal{H}
4. Může-li se systém nacházet ve stavech reprezentovaných vektory $|\Psi_1\rangle, |\Psi_2\rangle$, může se nacházet i jejich libovolné lineární kombinaci $|\Psi\rangle = \alpha|\Psi_1\rangle + \beta|\Psi_2\rangle$; ($|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$) (princip superpozice)
5. Operátory \hat{A}, \hat{B} , které odpovídají měřitelným veličinám A, B , splňují komutační relace

$$[\hat{A}, \hat{B}] = i\hbar\{A, B\}$$

$$[\hat{A}, \hat{B}] = \hat{A}\hat{B} - \hat{B}\hat{A}$$

$$\{A, B\} = \sum_i \left(\frac{\partial A}{\partial q_i} \frac{\partial B}{\partial p_i} - \frac{\partial A}{\partial p_i} \frac{\partial B}{\partial q_i} \right) \quad (\text{Poissonova závorka})$$

6. Možným výsledkem pozorovatelné veličiny A je pouze hodnota ze spektra operátoru \hat{A}