

Kot Schroedingera w detektorach fal grawitacyjnych



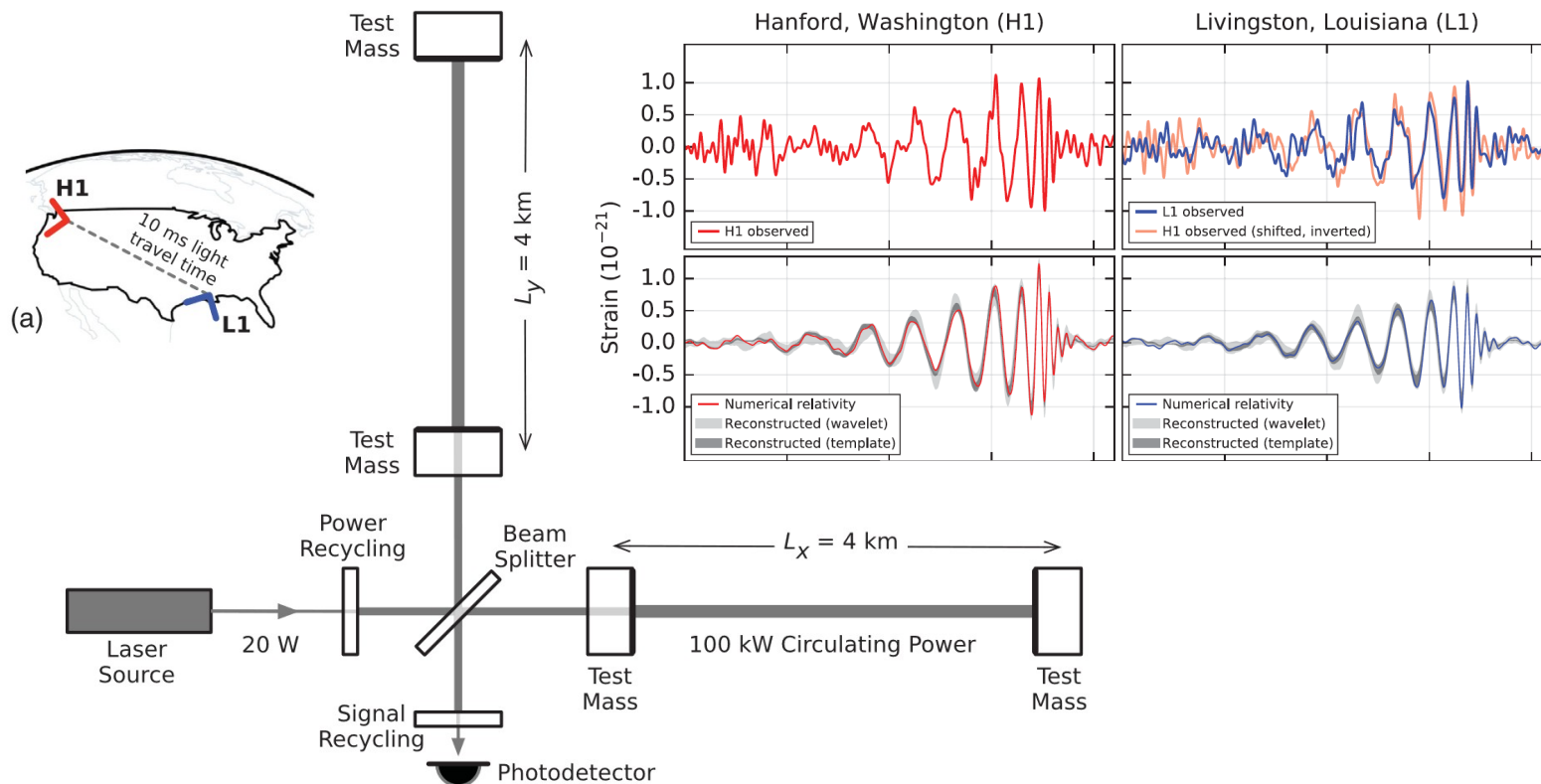


Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger

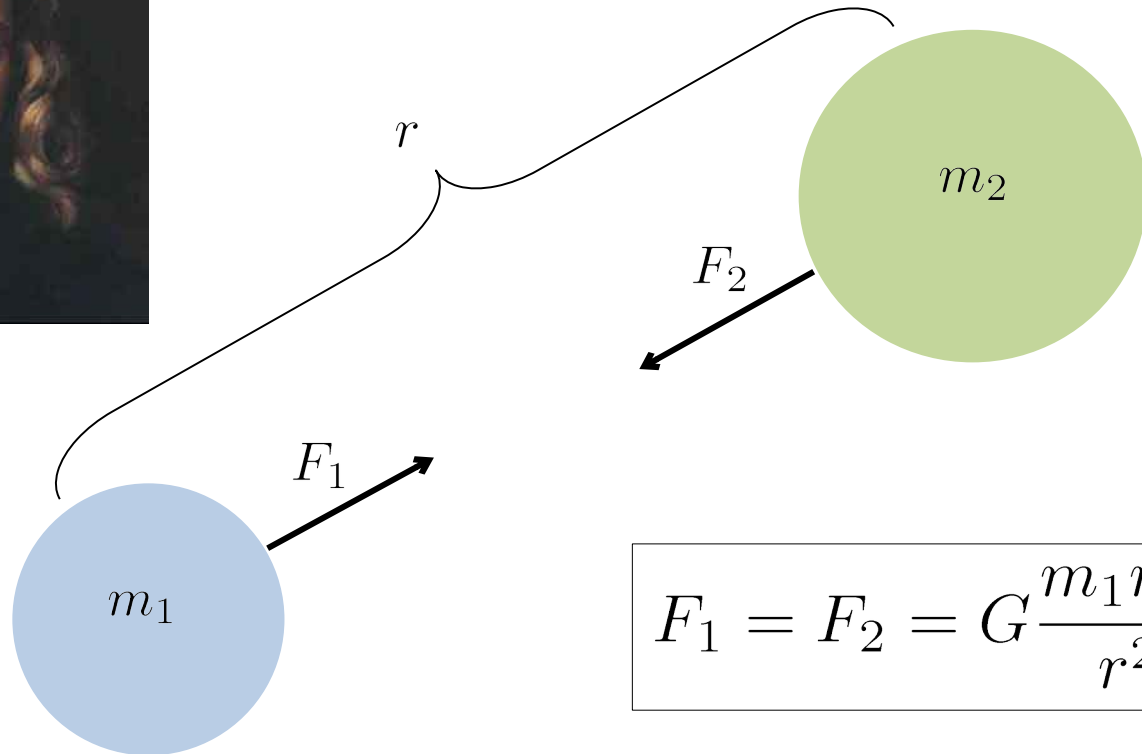
B. P. Abbott *et al.**

(LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)

(Received 21 January 2016; published 11 February 2016)



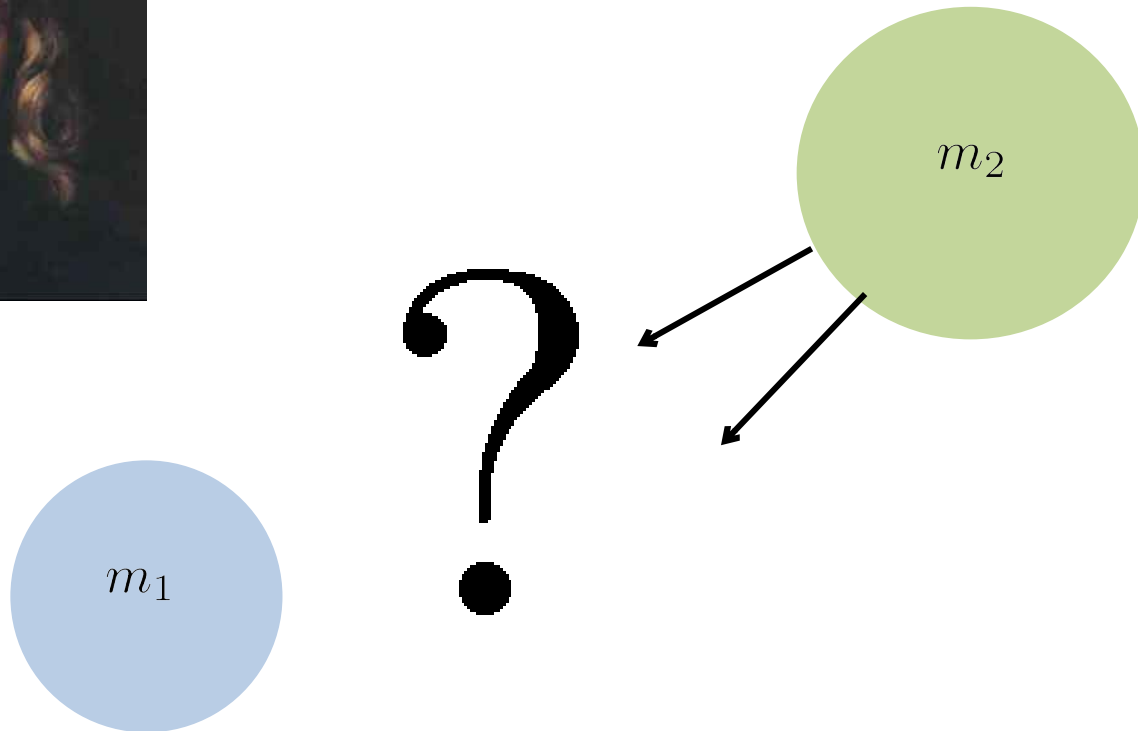
Grawitacja według Newtona



$$F_1 = F_2 = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

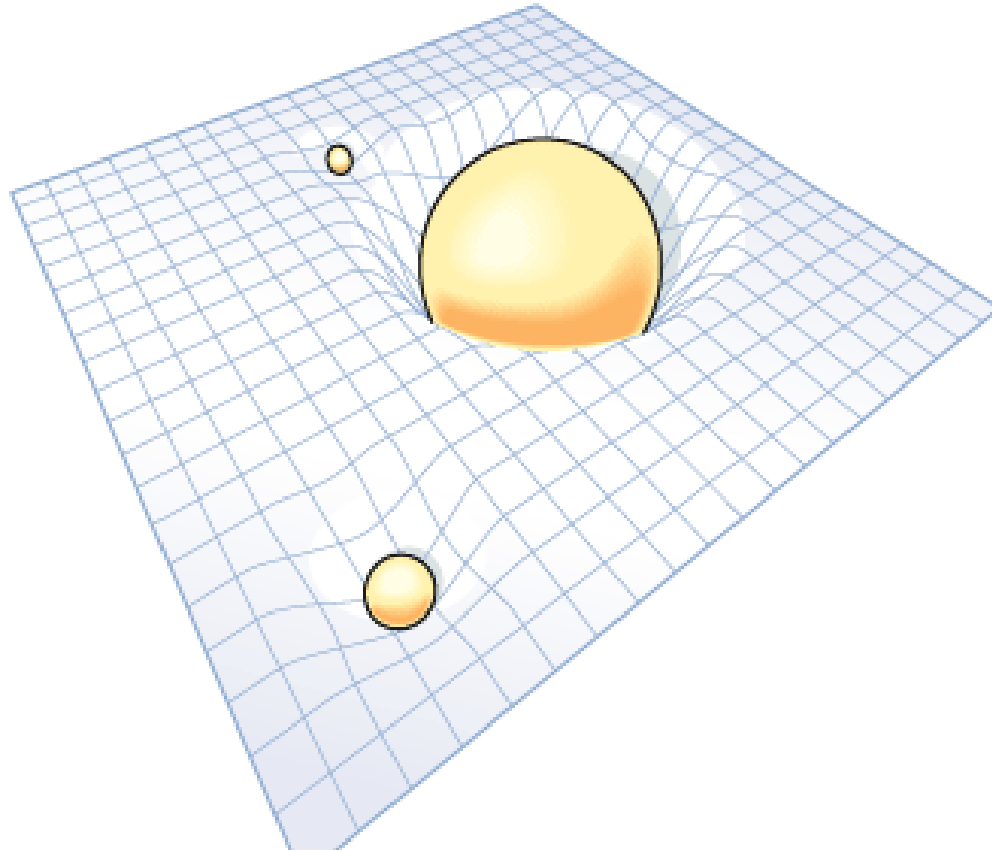
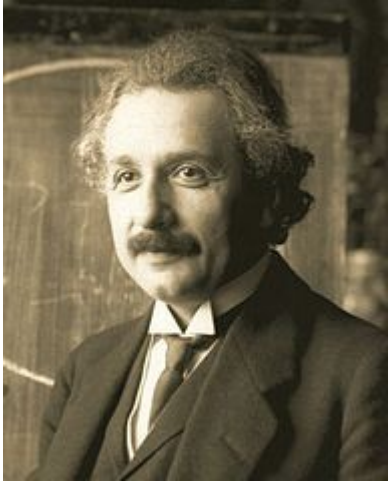
Prawo powszechnego ciążenia (1687r)

Co się stanie gdy jedna z mas się ruszy?



Zmiana siły natychmiast po zmianie położenia c

Teoria grawitacji Einsteina



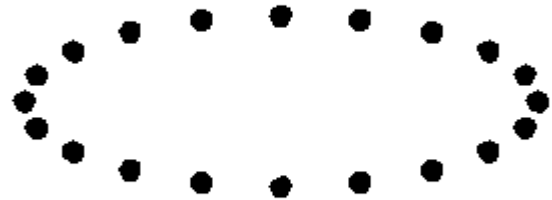
W oddziaływaniu mas pośredniczy sama czasoprzestrzeń!

Fale grawitacyjne

Rozchodzące się, unoszące energię odkształcenia czasoprzestrzeni



Układ podwójny białych
karłów



Odkształcenia przestrzeni na
Ziemi

Niestety baaaaardzo słabe!

Obiekt długości 1m zmieni swój rozmiar o 10^{-22} m

Po co wykrywać fale grawitacyjne?



**Nowe możliwości
obserwacji bardzo
wczesnego**

Wszechświata

**Nowe informacje o
czarnych dziurach i
innych**



egzotycznych

historia rozwoju metod obserwacyjnych w Astronomii



3000 p.n.e



1600



1930



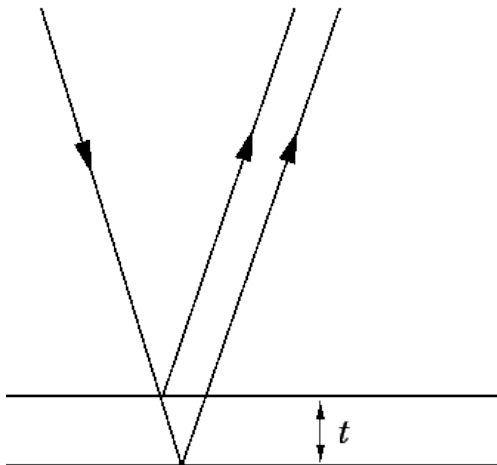
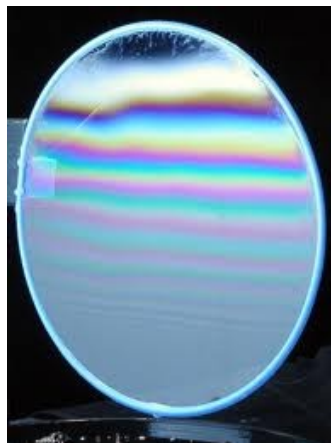
2016

Najlepsze narzędzie do pomiarów odległości...

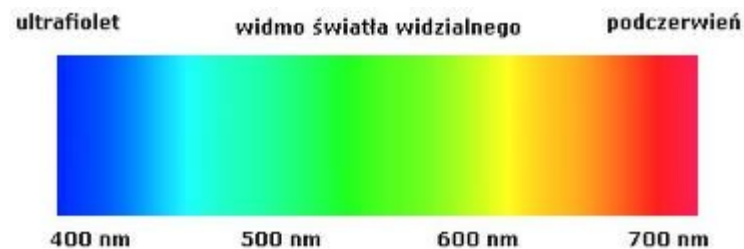


Światło!

Interferencja światła



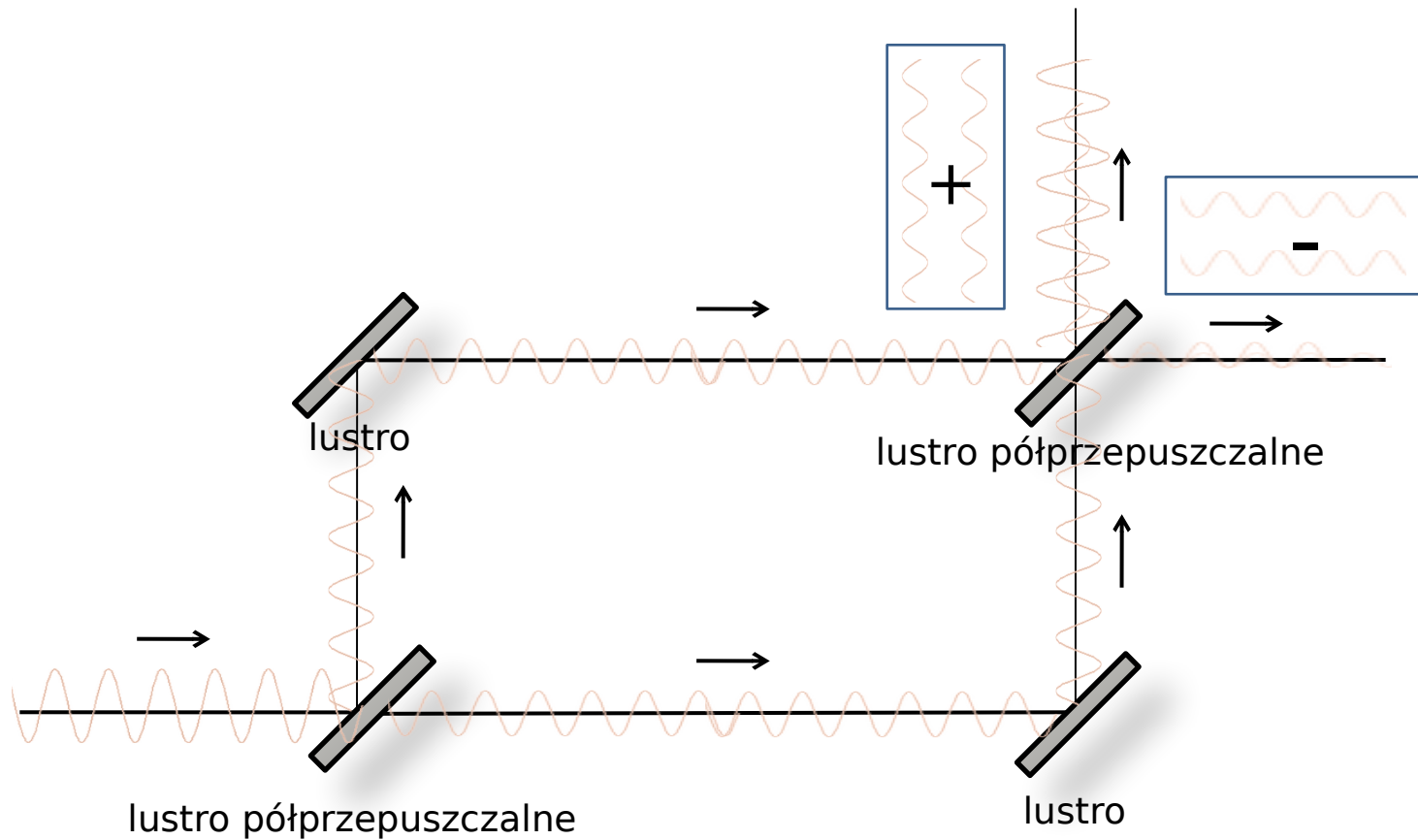
Różne barwy, różna długość fali



**Interferencja konstruktywna
dla różnych grubości warstwy,
różnych kątów,...**

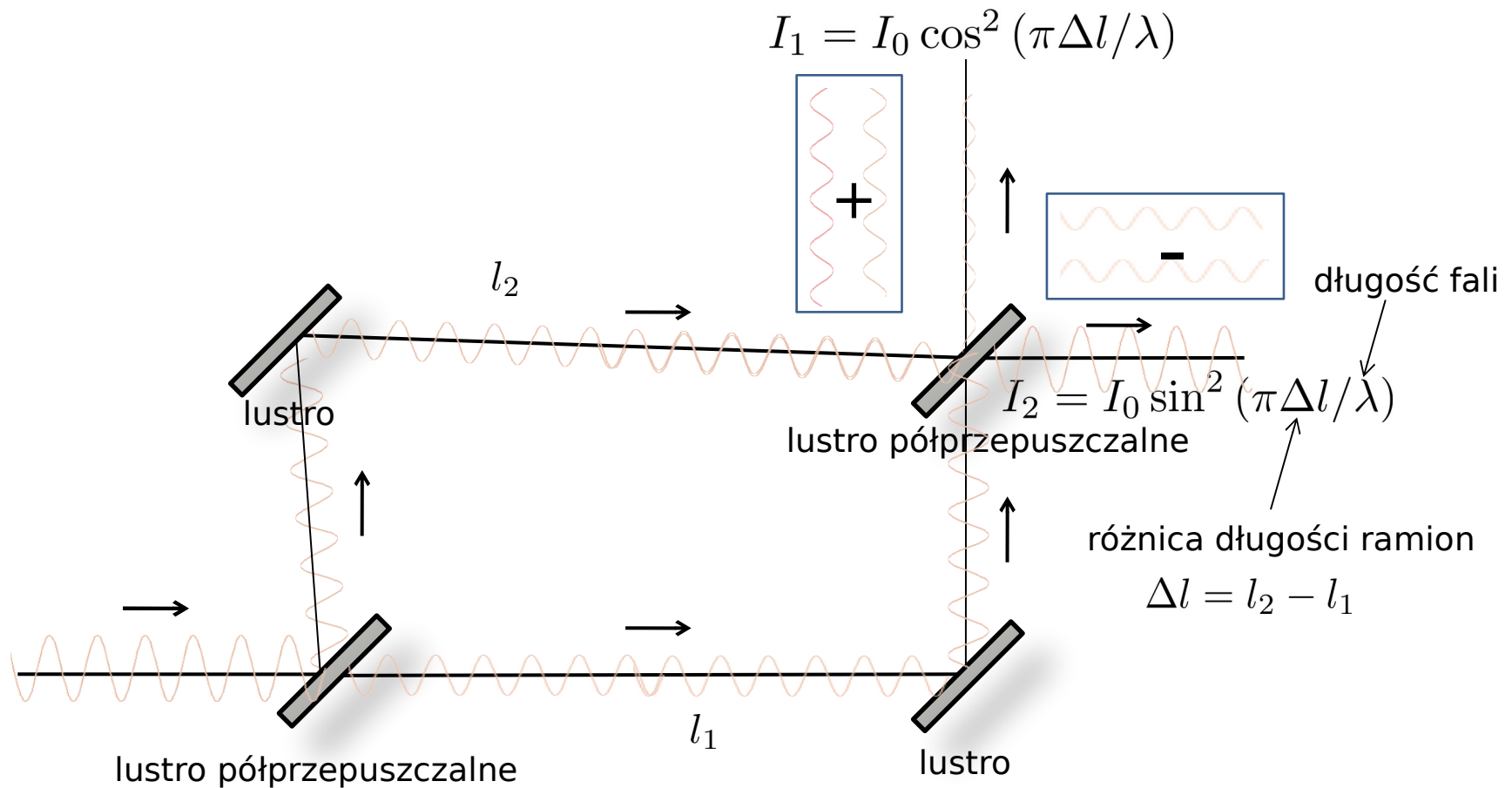
Interferometr

czyli interferencja pod kontrolą



Interferometr

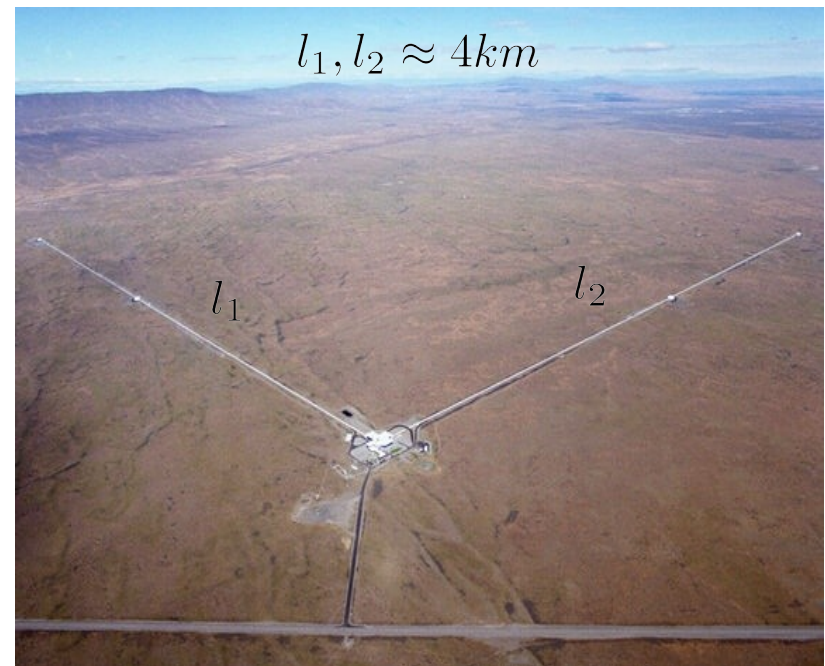
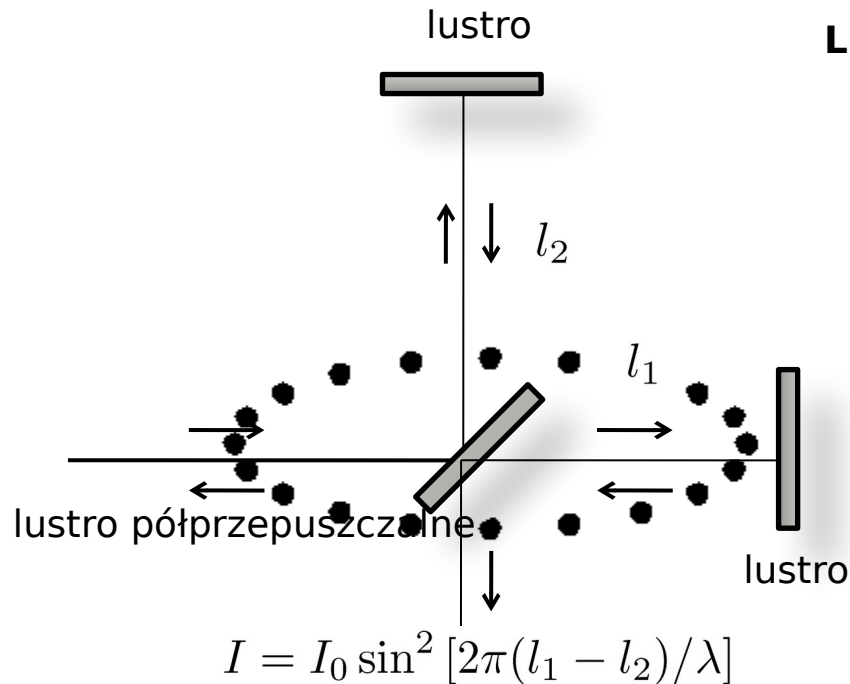
czyli interferencja pod kontrolą



Zmiany położeń luster zmiany natężeń światła na wyjściu

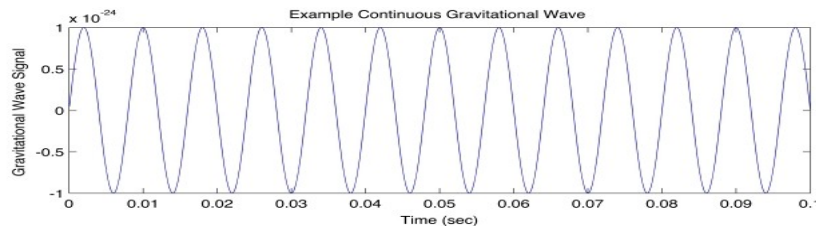
Interferometr Michelsona jako detektor fal grawitacyjnych

LIGO - Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory



$$I \approx I_0 (2\pi \Delta l / \lambda)^2$$

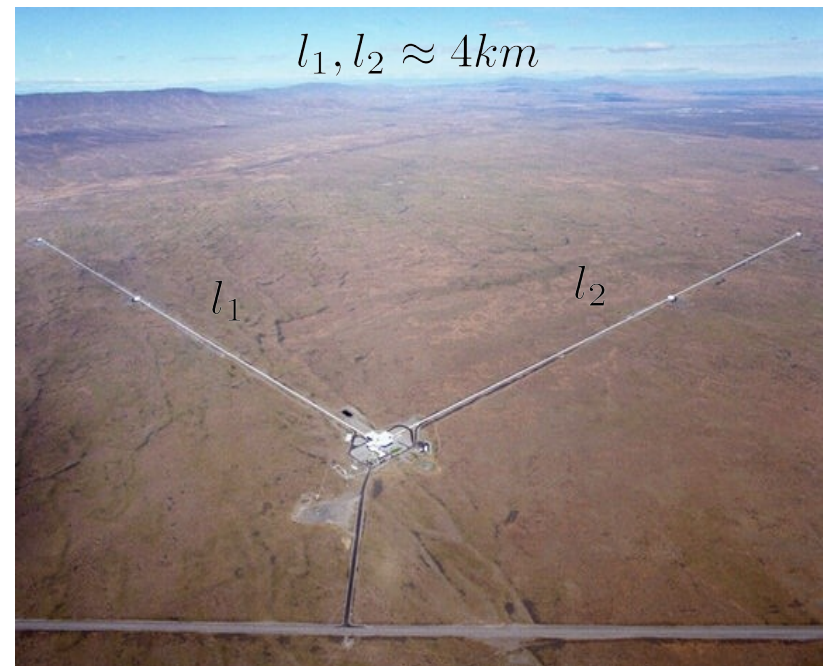
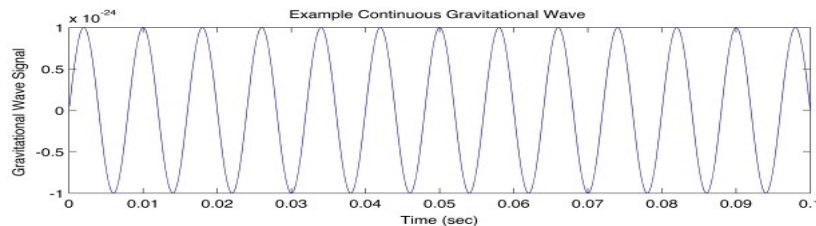
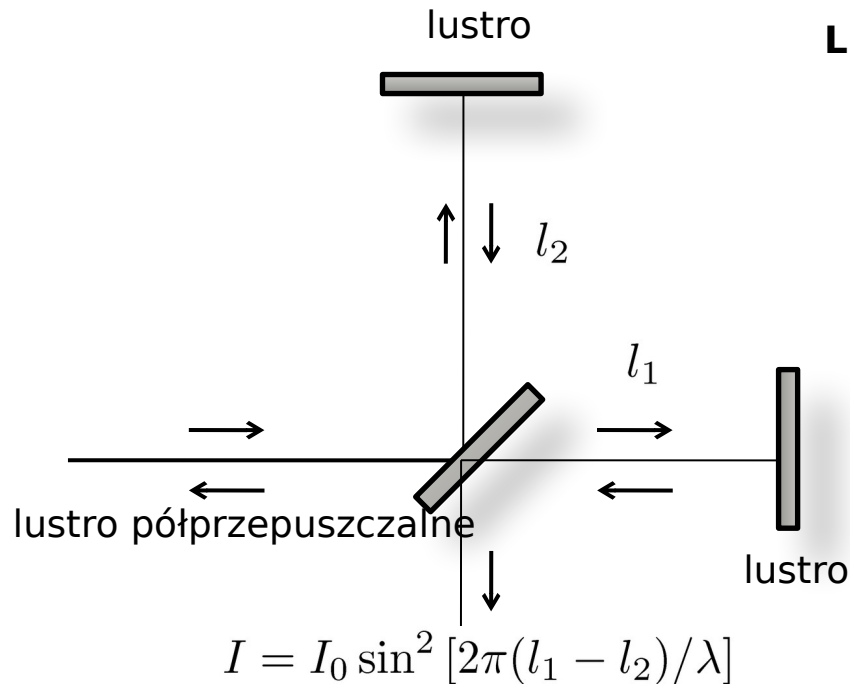
$$\Delta l \approx \frac{\lambda}{2\pi} \sqrt{\frac{I}{I_0}}$$



**Amplituda zmian położenia lustro mniejsza niż rozmiar protonu!
Jak można to zmierzyć używając światła o długości fali rzędu**

Interferometr Michelsona jako detektor fal grawitacyjnych

LIGO - Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory

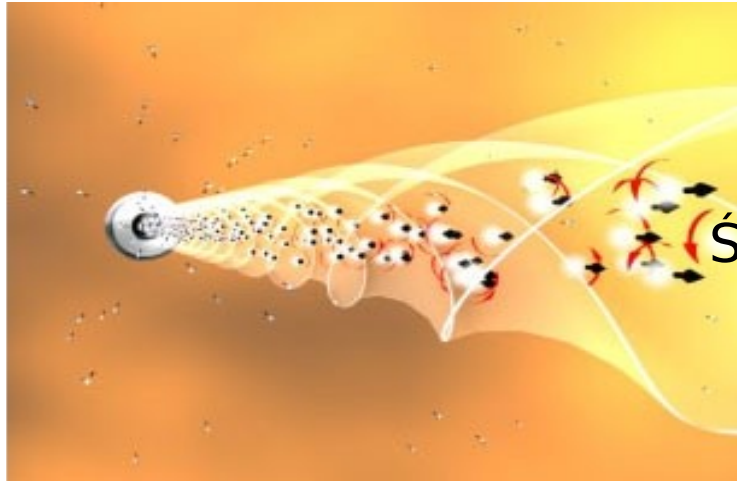


$$I \approx I_0 (2\pi \Delta l / \lambda)^2$$

$$\Delta l \approx \frac{\lambda}{2\pi} \sqrt{\frac{I}{I_0}}$$

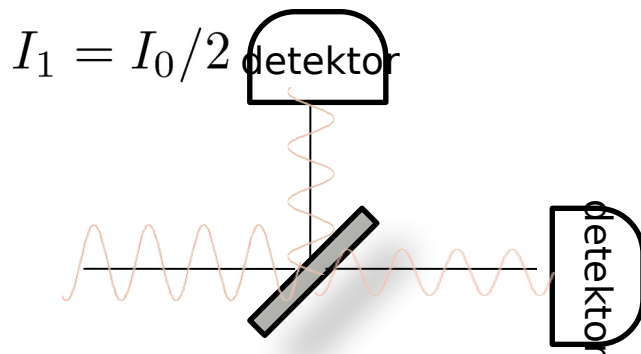
Zależy od tego jak dokładnie można zmierzyć zmiany

Energia światła przenoszona jest w porcjach

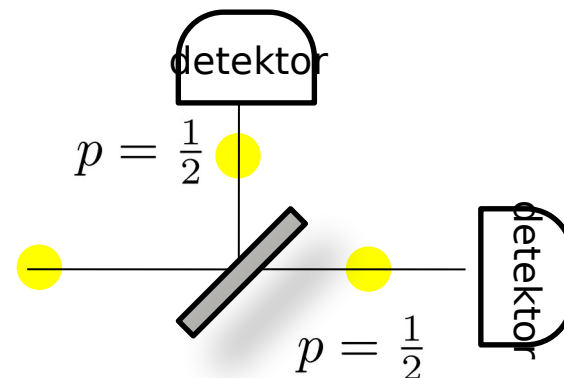


Światło = i fala i strumień cząstek...

klasyczna fala

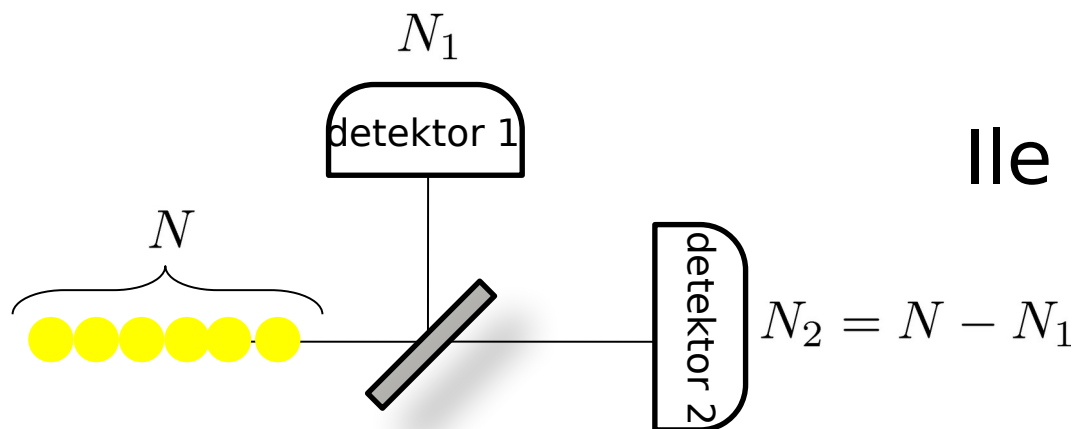


foton

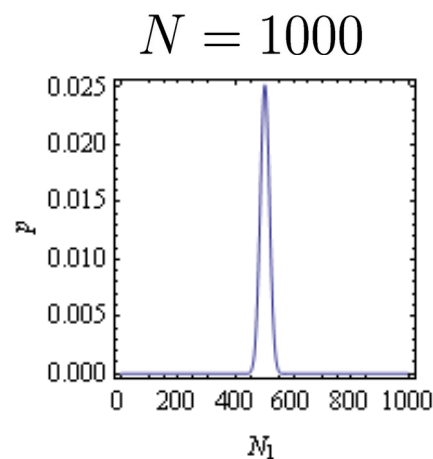
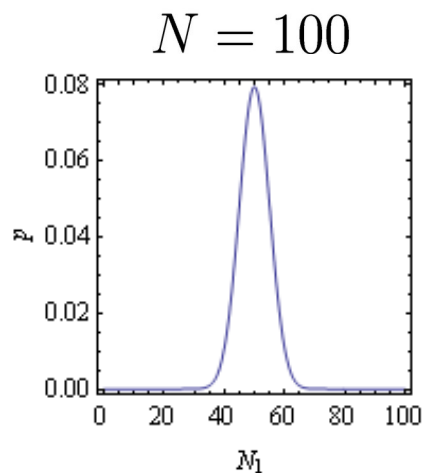
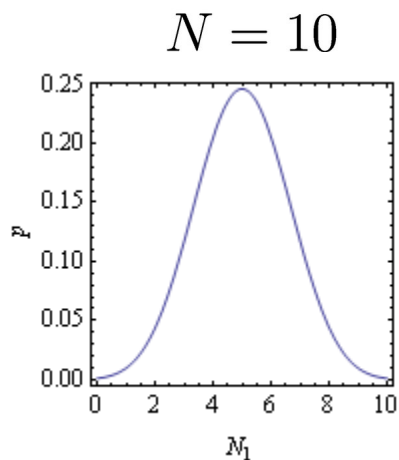


Możemy go zmierzyć tylko w jednym z detektorów

N fotonów



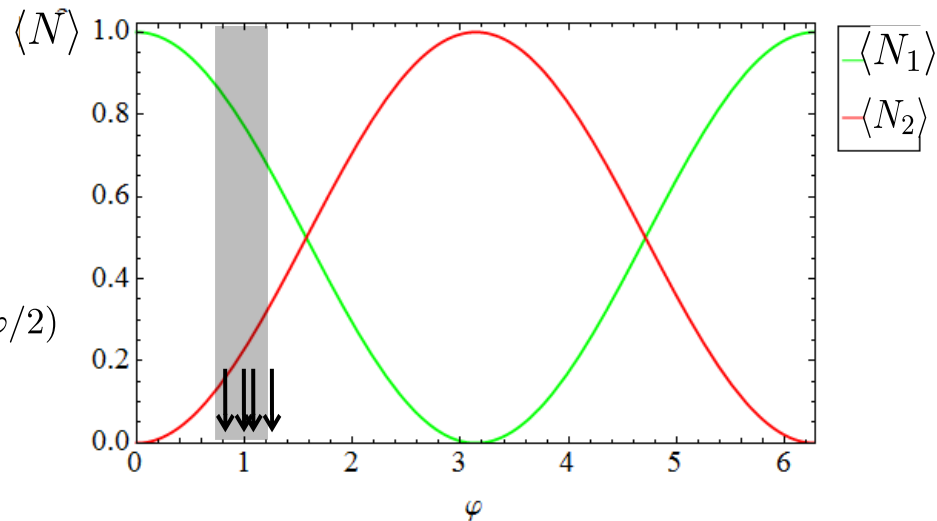
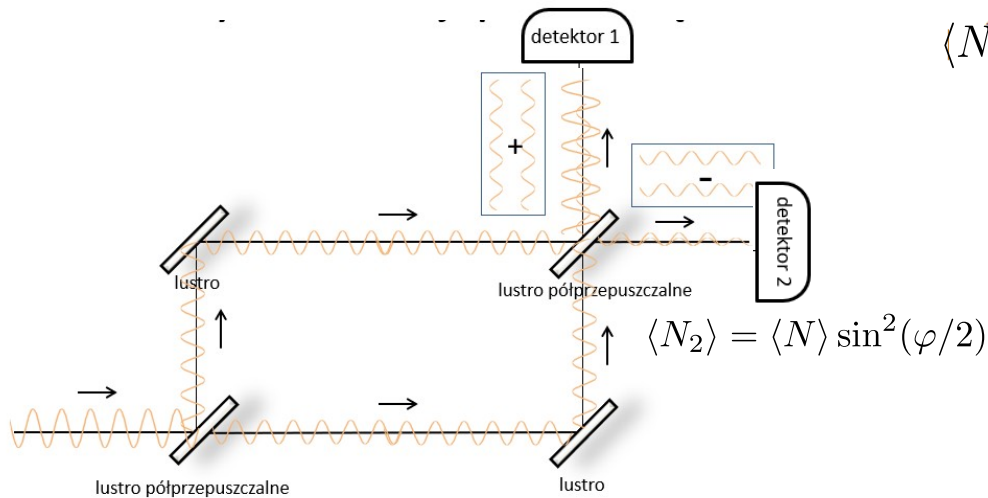
Ile fotonów trafi do
detektorów?
 N rzutów monetą...



$$\frac{N_1}{N} \approx 1/2 \pm \frac{1}{\sqrt{N}}$$

Długość fali nie fundamentalnym jest ograniczeniem

$$\langle N_1 \rangle = \langle N \rangle \cos^2(\varphi/2)$$



Fluktuacje zliczeń fotonów

$$N_i = \langle N_i \rangle \pm \sqrt{\langle N_i \rangle}$$

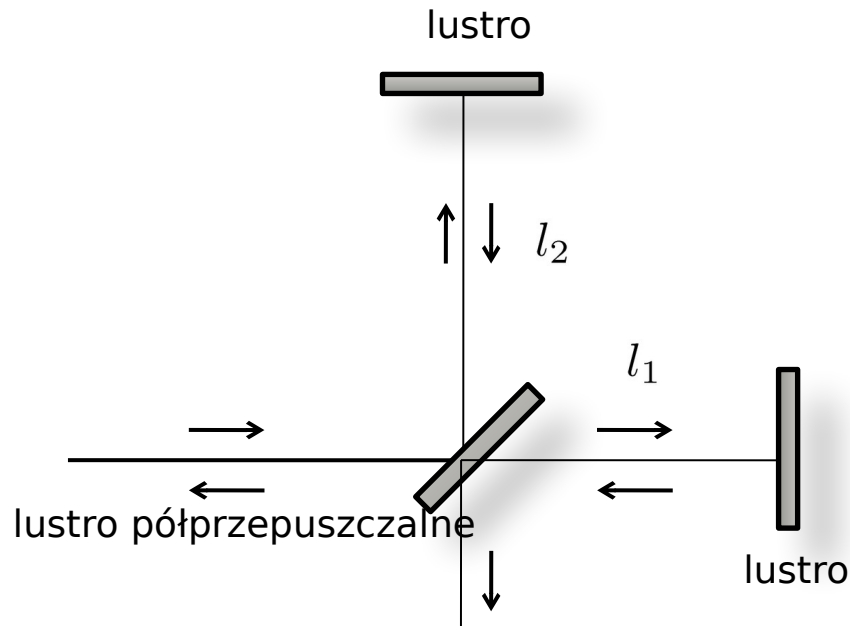
Najlepszy estymator

$$\varphi(N_1, N_2) = \arccos \left(\frac{N_1 - N_2}{\langle N \rangle} \right)$$

Niepewność estymacji

$$\delta\varphi \propto \frac{\text{fazy:}}{\sqrt{\langle N \rangle}}$$

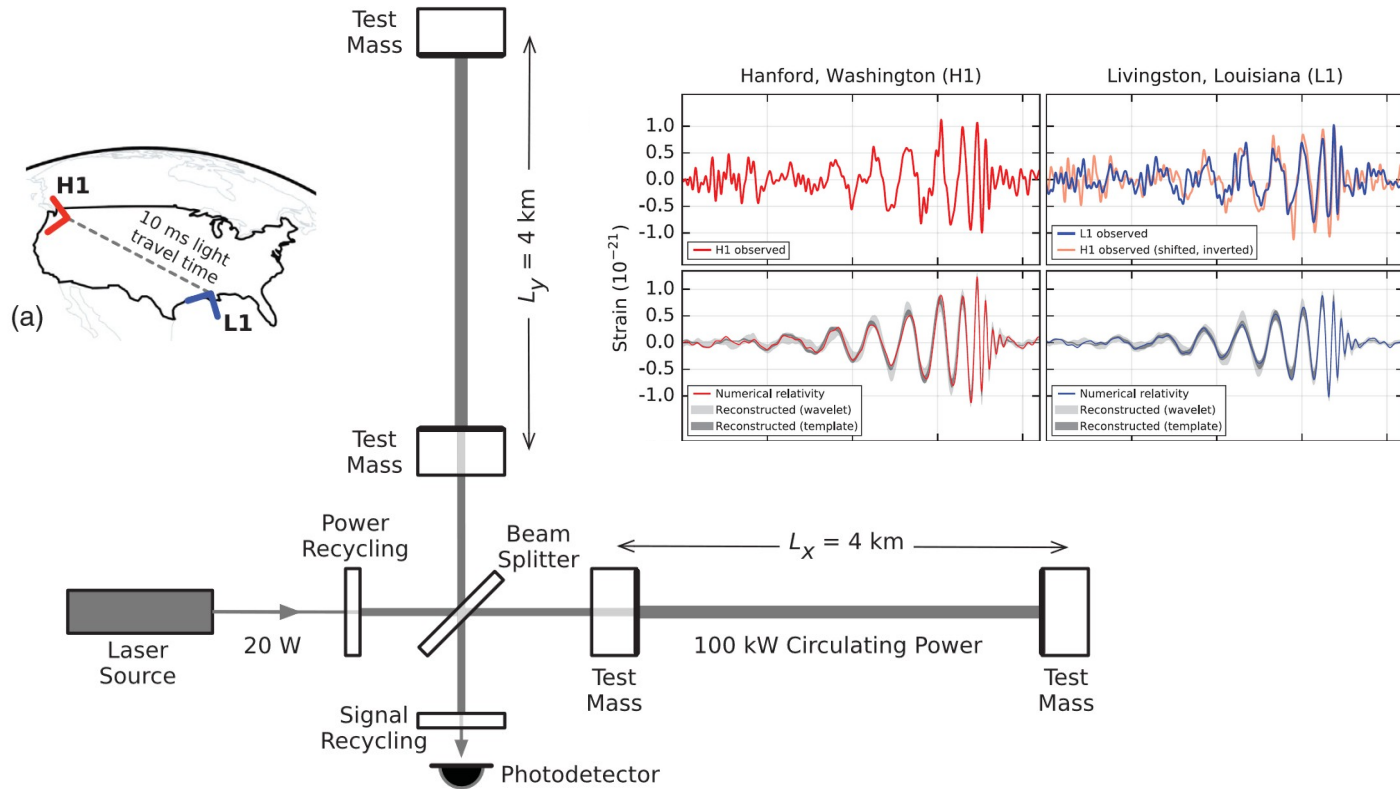
Długość fali nie fundamentalnym jest ograniczeniem



$$\Delta l \gtrsim \frac{\lambda}{\sqrt{N}}$$

Najmniejsze wykrywalne zmiany długości ramion interferometru

Czułość detektora LIGO



Dla stabilnego sygnału trwającego 1s? $\frac{\Delta l}{l} \approx \frac{\lambda}{l\sqrt{N}} \approx \frac{10^{-6}}{10^3\sqrt{10^{24}}} \approx 10^{-21}$

$$N \approx \frac{100 \text{ kW} \cdot 1 \text{ s}}{hc/\lambda} \approx 10^{24}$$

$$l = 4 \cdot 10^3 \text{ m}$$

$$\lambda = 10^{-6} \text{ m}$$

Dokładniej niż rozmiar protonu!

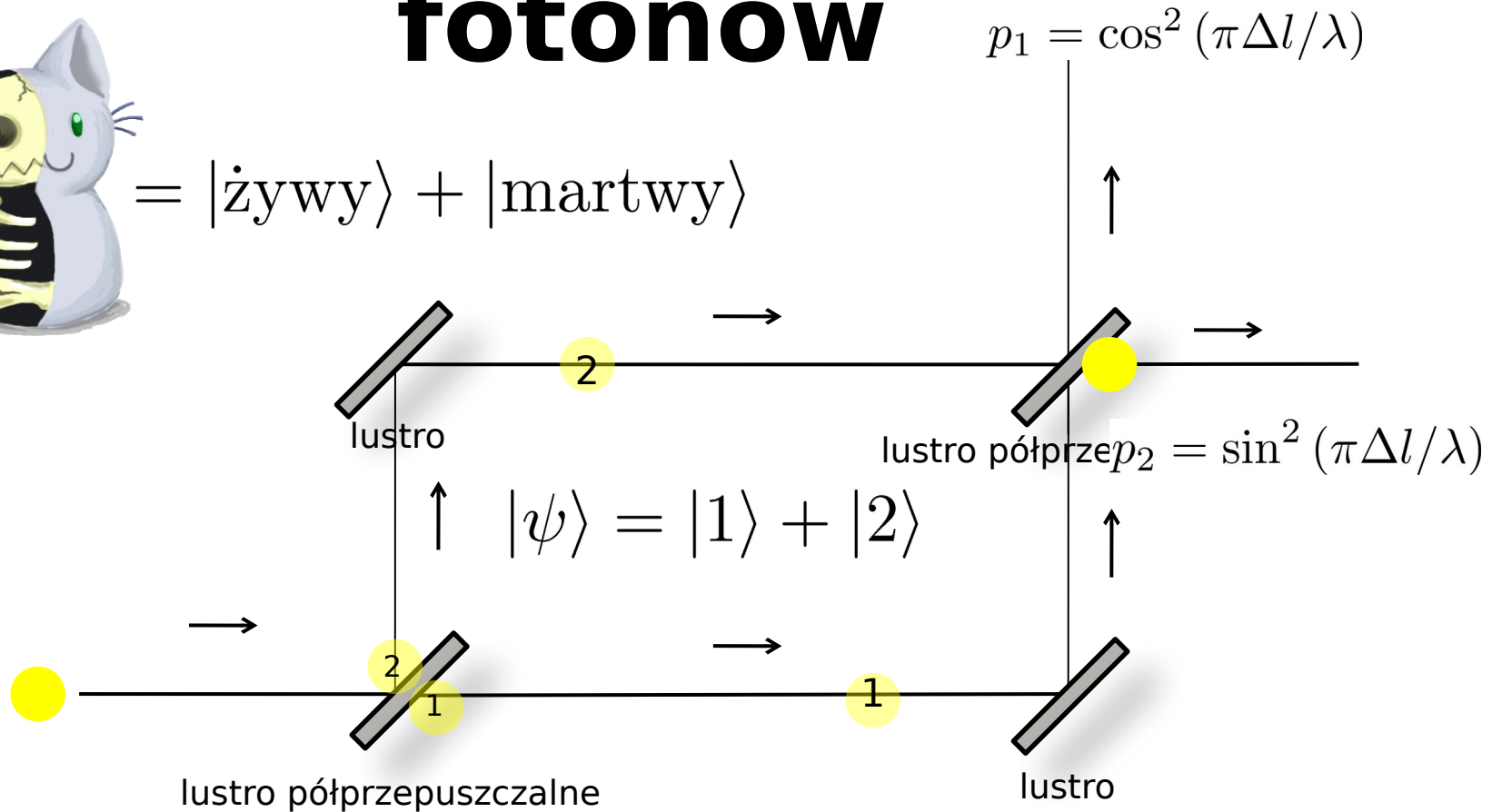
**Czy można z fotonów
wycisnąć
jeszcze więcej?**



Interferencja w języku fotonów

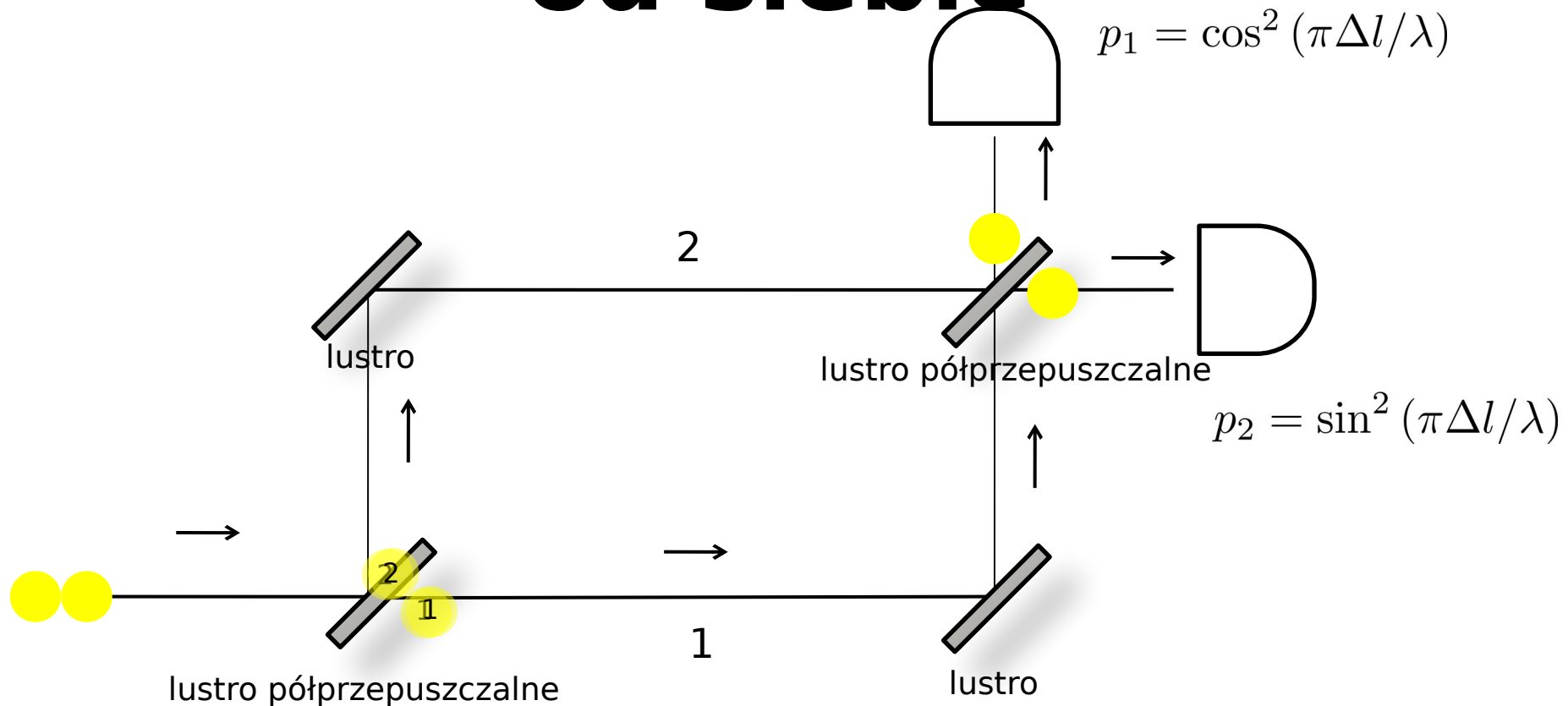


$$= |\text{żywy}\rangle + |\text{martwy}\rangle$$



Aby możliwa była interferencja jeden foton musi poruszać się dwoma drogami naraz!

Dwa fotony niezależne od siebie

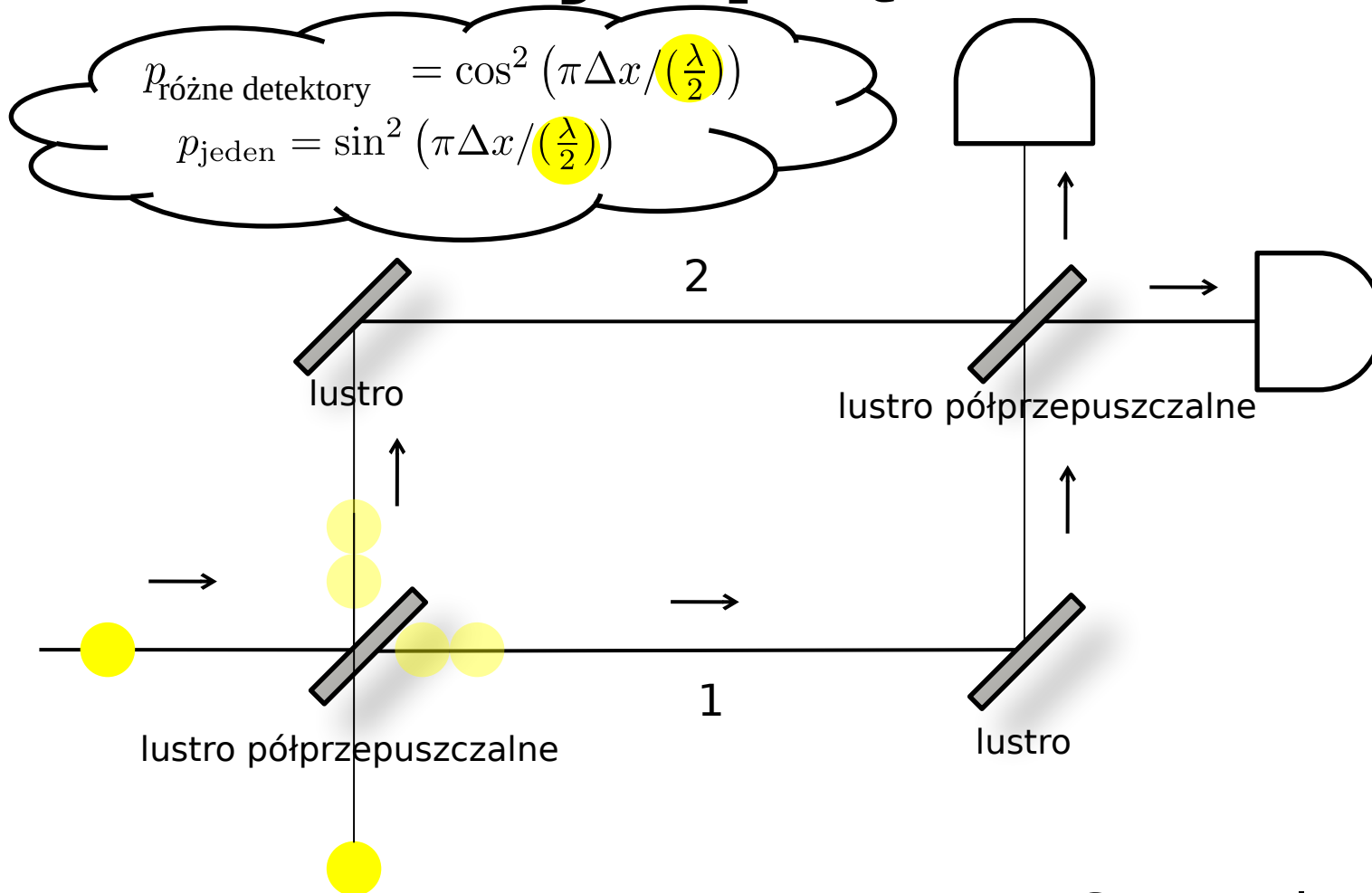


$$|\psi\rangle = \underbrace{(|1\rangle + |2\rangle)}_{\text{pierwszy foton}} \otimes \underbrace{(|1\rangle + |2\rangle)}_{\text{drugi foton}}$$

każdy foton interferuje tylko sam ze sobą!

nie wykorzystujemy korelacji kwantowych - splątania

Stany splątane



$$|\psi\rangle = |1\rangle \otimes |1\rangle + |2\rangle \otimes |2\rangle$$

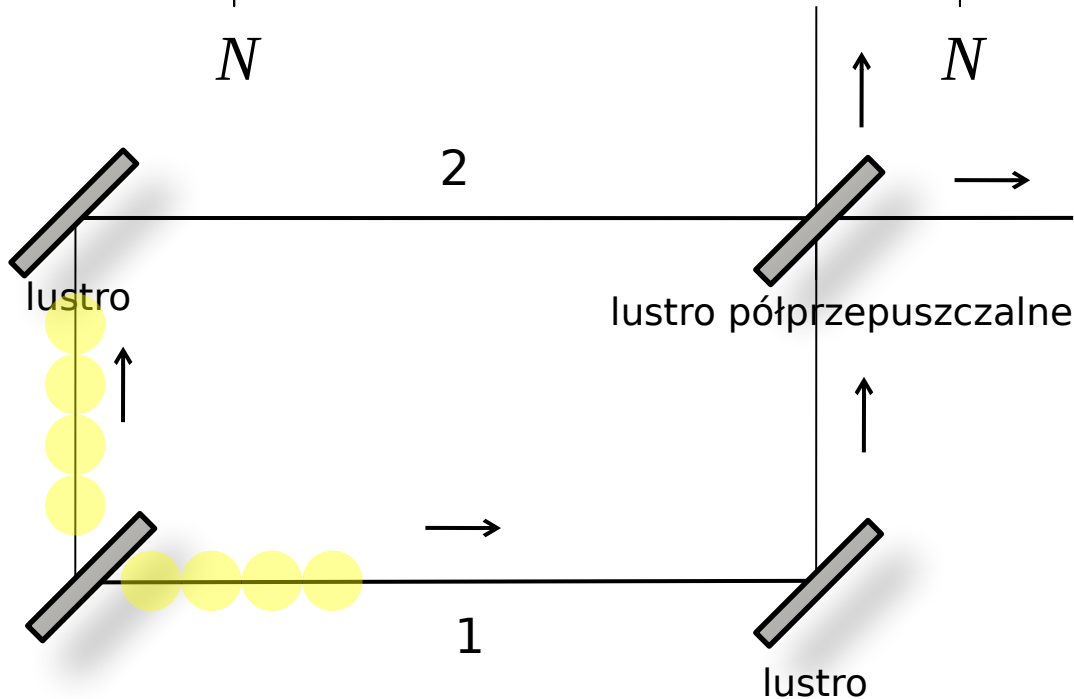
Stan splątany

fotony zawsze tą samą drogą

używać fotonu o dwa razy większej energii, tzn. dwa razy krótszej długości

Splątanie zwiększa czułość

$$|\psi\rangle = \underbrace{|1\rangle \otimes |1\rangle \otimes \dots \otimes |1\rangle}_N + \underbrace{|2\rangle \otimes |2\rangle \otimes \dots \otimes |2\rangle}_N$$



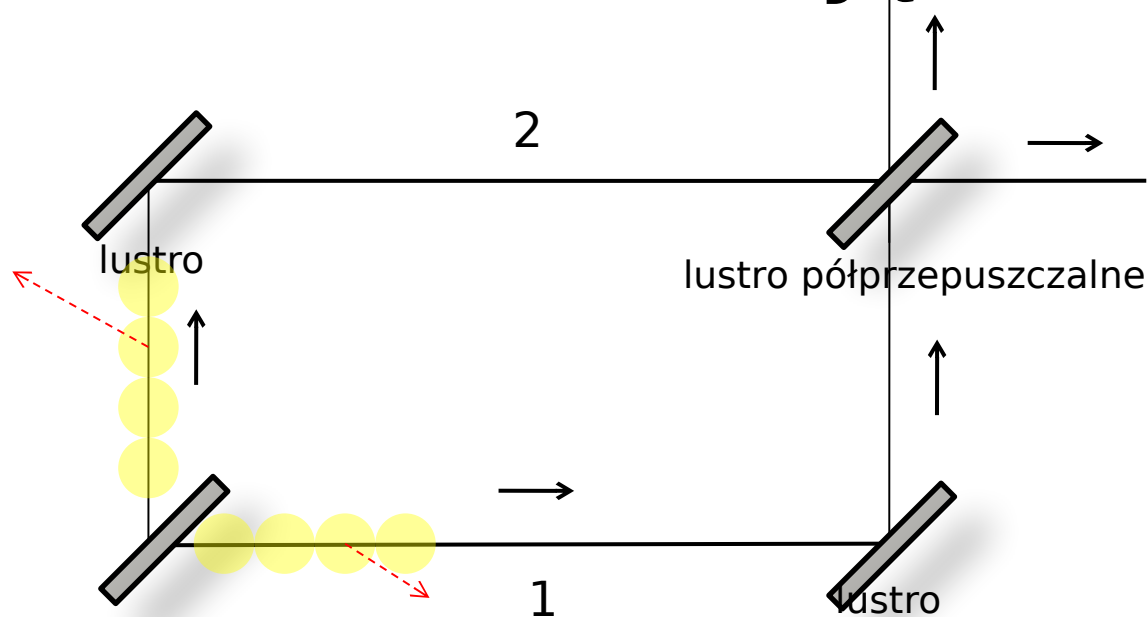
$$\Delta x \approx \frac{\lambda}{\sqrt{N}} \approx 10^{-18} m$$

fotony niezależne

$$\Delta x \approx \frac{\lambda}{N} \approx 10^{-30} m$$

fotony splątane

Straty fotonów niszczą interferencję



$$\Delta x \approx \frac{\lambda}{\sqrt{pN}}$$

fotony niezależne

zysk dzięki splątaniu

$$\Delta x \approx \frac{\lambda}{\sqrt{pN}} \cdot \sqrt{1-p}$$

fotony optymalnie splątane

p - prawdopodobieństwo przeżycia fotonu

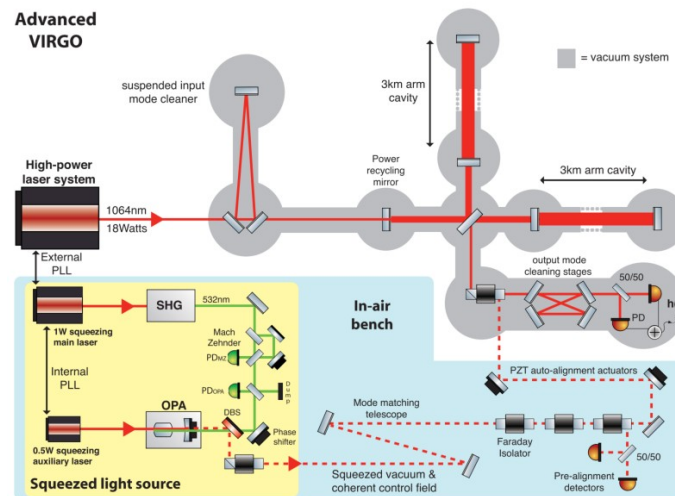
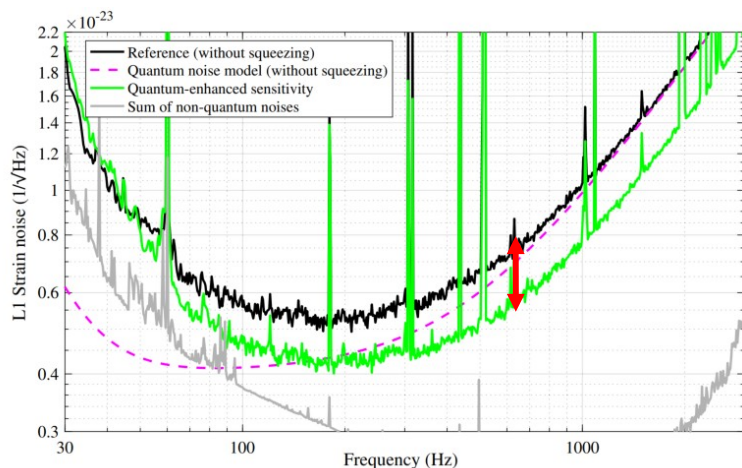
Stany splątane fotonów w detektorach fal grawitacyjnych



Zwiększenie liczby obserwacji fal grawitacyjnych o 50%!

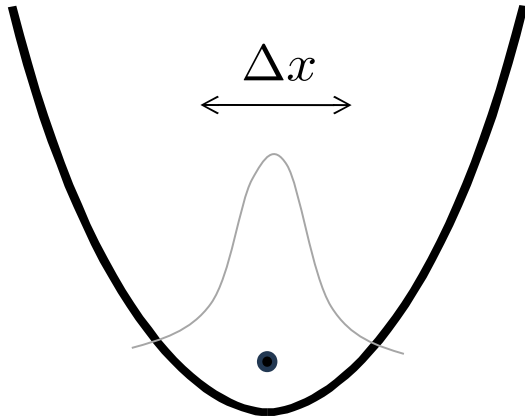
Phys. Rev. Lett. 123, 231107 (2019)

Phys. Rev. Lett. 123, 231108 (2019)



35% zmniejszenie szumu dzięki splątaniu równoważne zwiększeniu mocy lasera o 85%!
 ~100 `kwantowych' fotonów daje tę samą poprawę co dodatkowe 10^{20} fotonów „klasycznych”

Tak naprawdę, wykorzystuje się stan ściśniętej próżni...

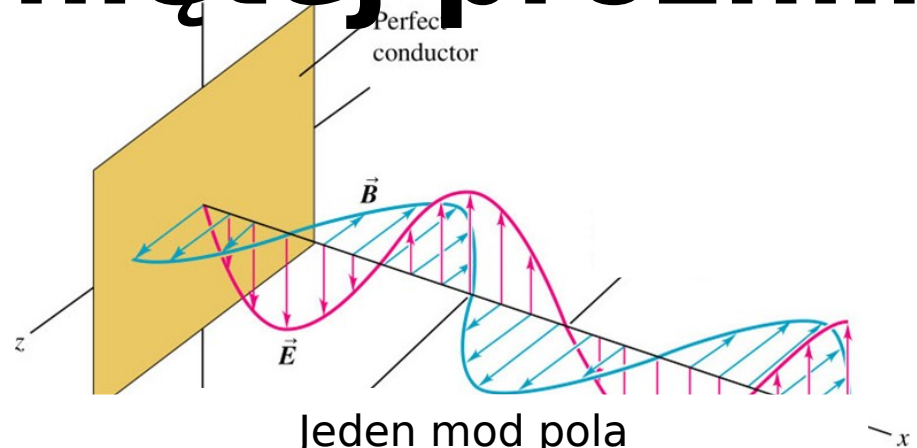


Cząstka kwantowa w potencjale harmonicznym

Zasada nieoznaczoności

Heisenberga
$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

Cząstka „drga” nawet w stanie podstawowym



Jeden mod pola elektromagnetycznego o danej częstotliwości

W elektrodynamice kwantowej, amplitudy pól E i B zachowują się analogicznie jak x i p

$$\Delta E \Delta B \geq \text{const} \times \hbar$$

Nie można mieć jednocześnie $E=0$ i $B=0$! **Fluktuacje próżni!!!**

Ale można zmniejszyć fluktuacje E kosztem B itp..

Stan ściśniętej próżni

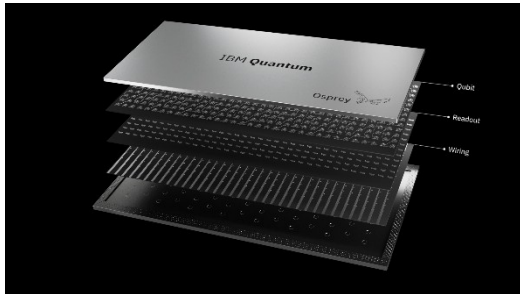
Generowana w optycznych procesach nieliniowych – generacja par fotonów (efektywnie splątanych)

Technologie Kwantowe AD 2024

Obliczenia
kwantowe

Komunikacja
kwantowa

Metrologia
kwantowa



**Dziękuję!
... i nie dziękuję**