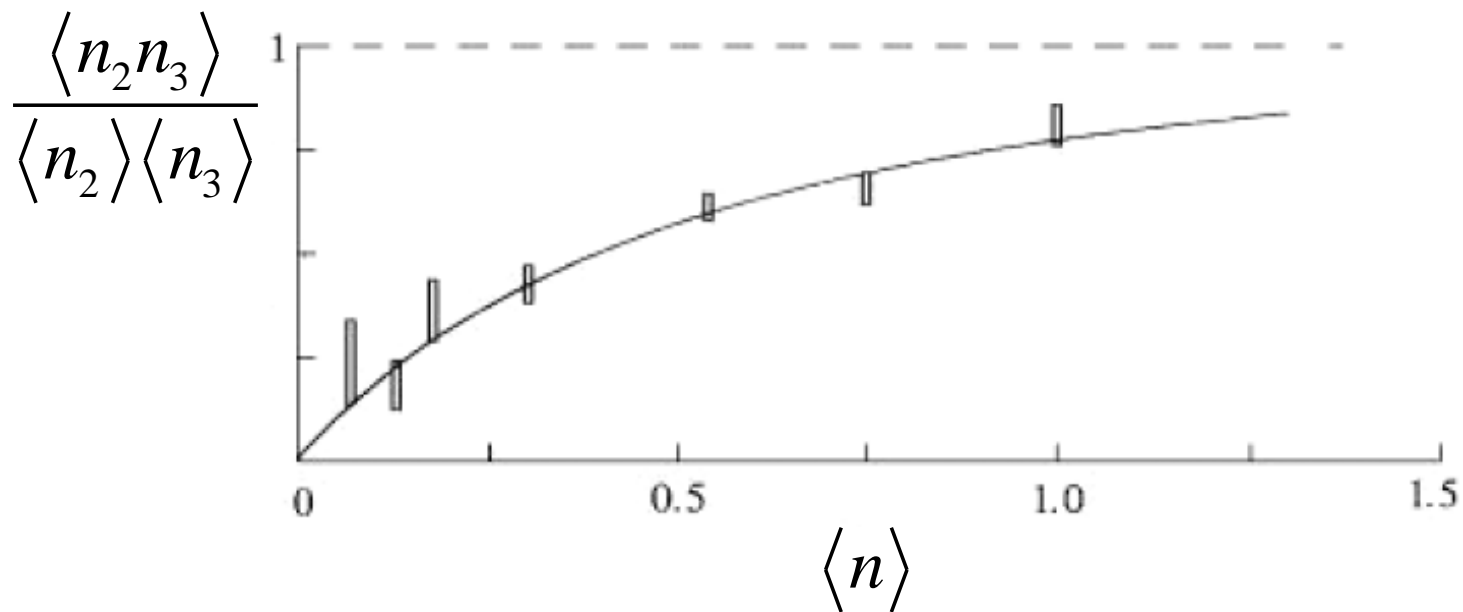
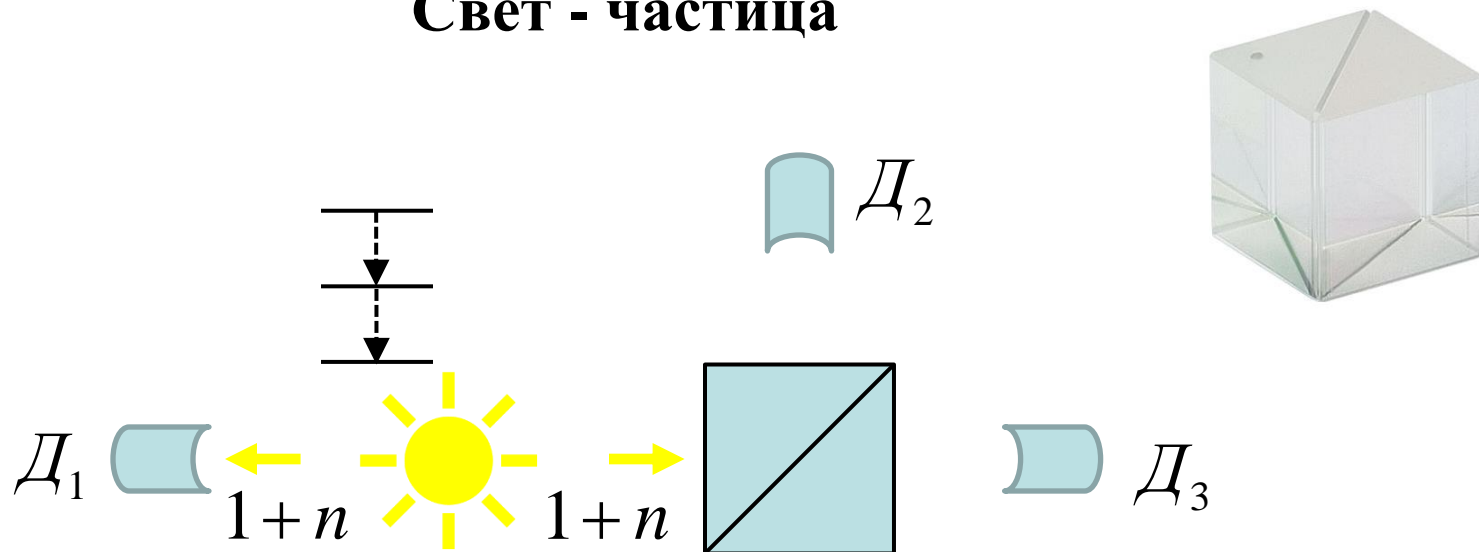


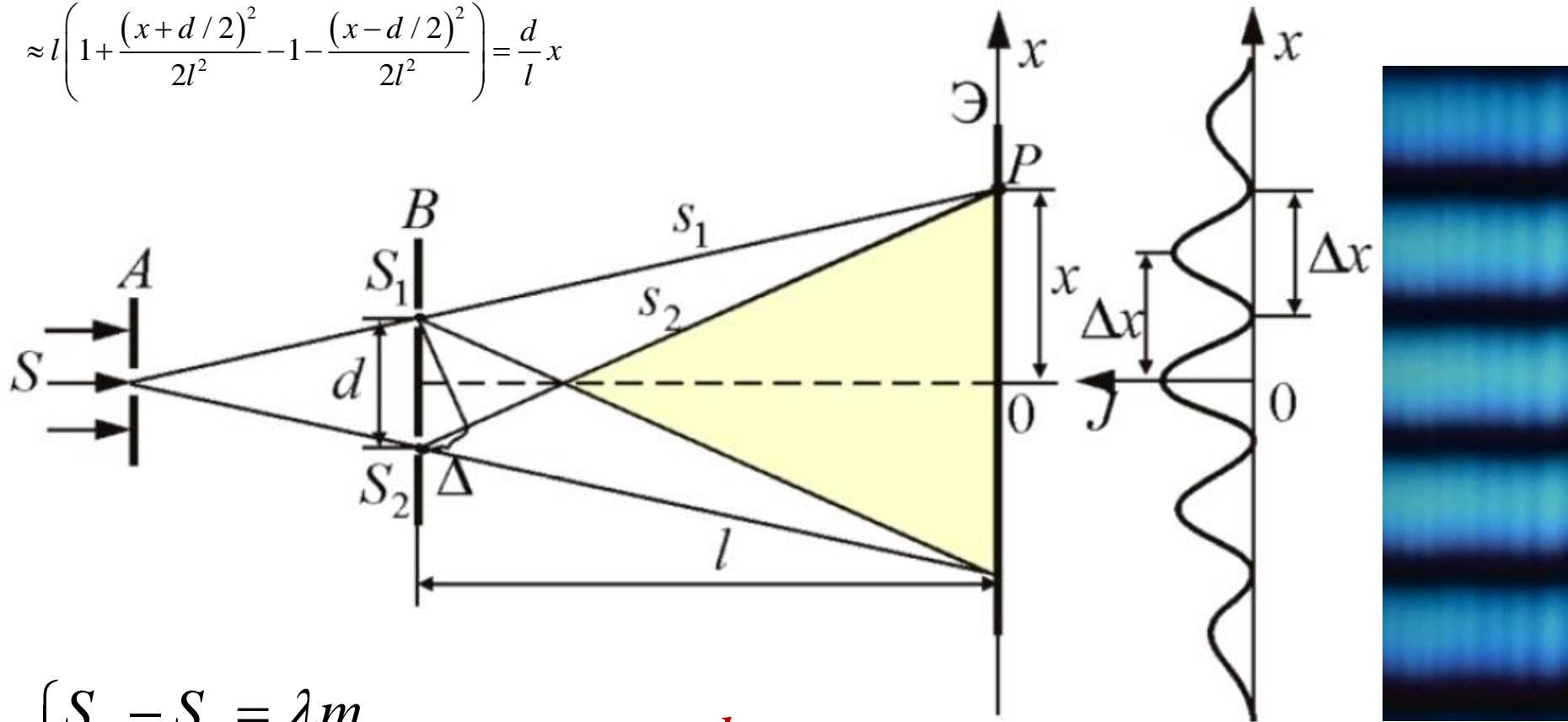
# Свет - частица



# Интерференционная схема Юнга

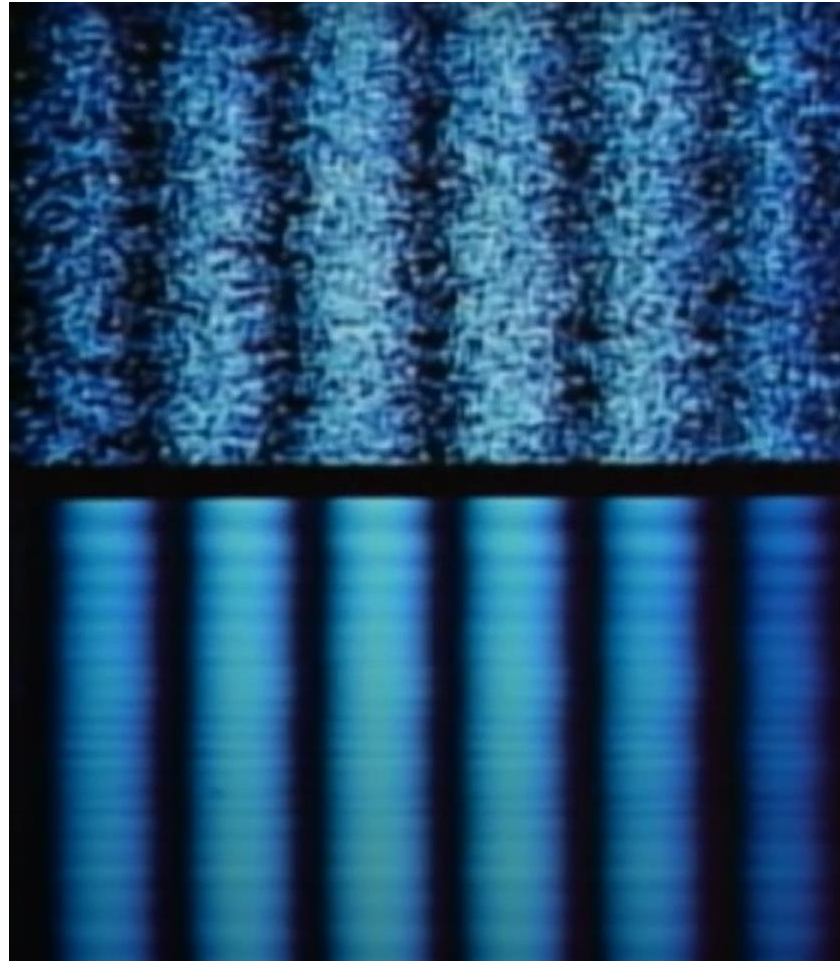
$$S_2 - S_1 = \sqrt{l^2 + (x + d/2)^2} - \sqrt{l^2 + (x - d/2)^2} = l \left( \left[ 1 + \frac{(x + d/2)^2}{l^2} \right]^{1/2} - \left[ 1 + \frac{(x - d/2)^2}{l^2} \right]^{1/2} \right) \approx$$

$$\approx l \left( 1 + \frac{(x + d/2)^2}{2l^2} - 1 - \frac{(x - d/2)^2}{2l^2} \right) = \frac{d}{l} x$$



$$\begin{cases} S_2 - S_1 = \lambda m \\ S_{1,2} = \sqrt{l^2 + (x \pm d/2)^2} \end{cases} \Rightarrow \frac{d}{l} x_m = \lambda m$$

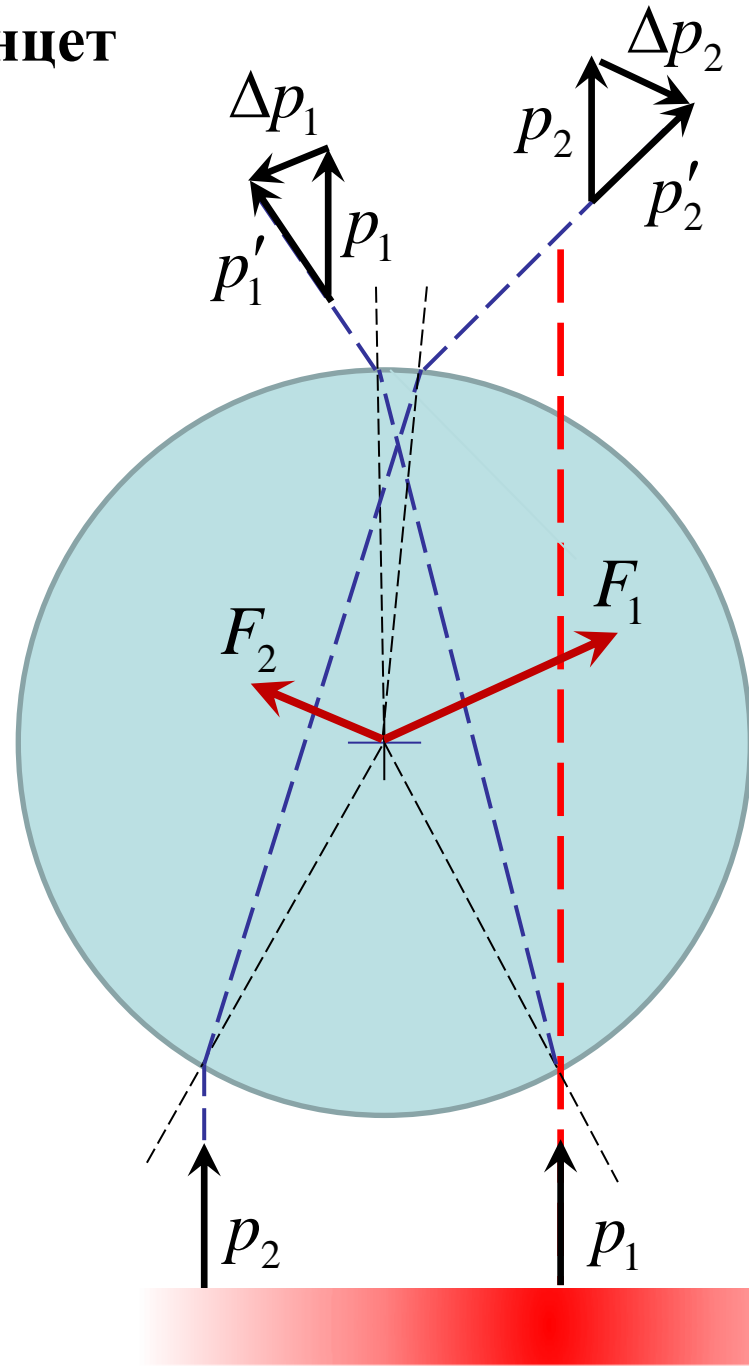
# Интерференция одиночных фотонов в опыте Юнга-Цайлингера



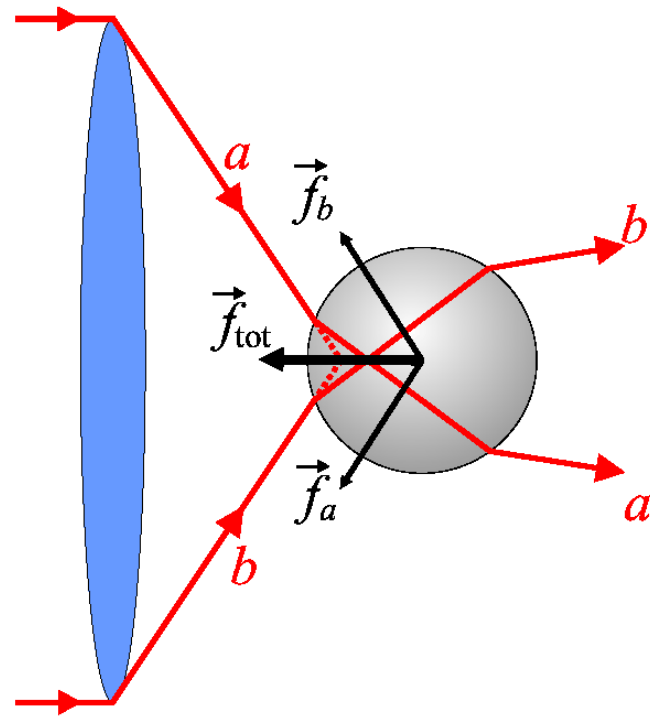
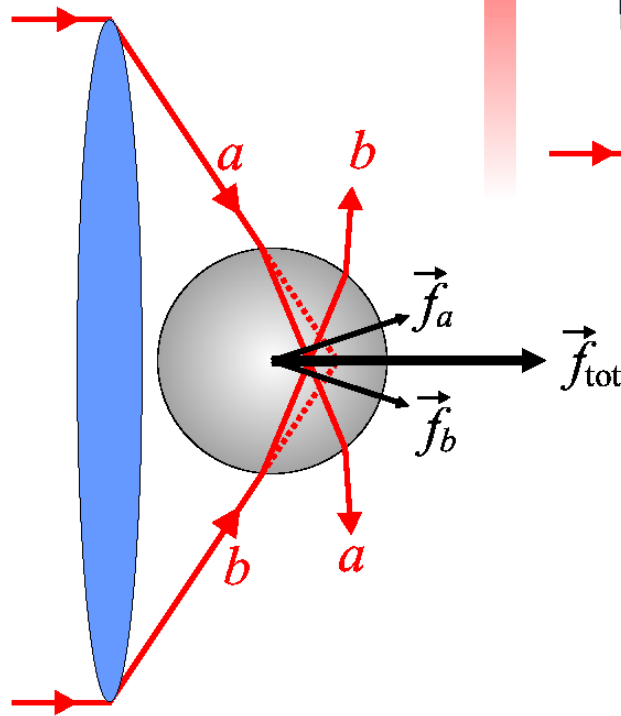
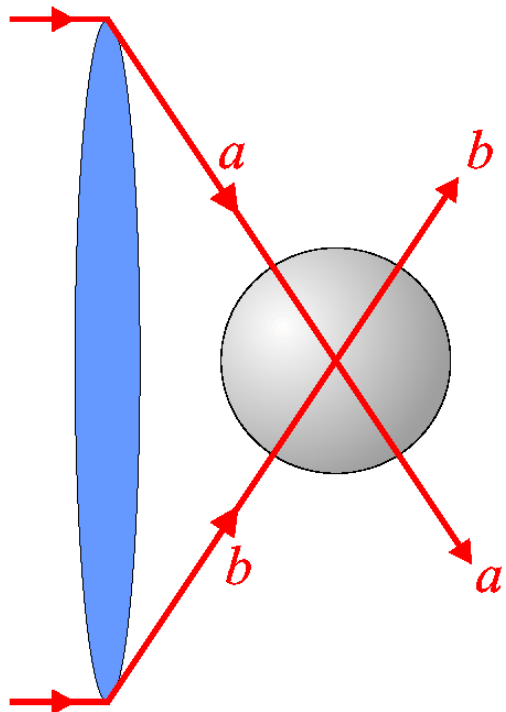
# Лазерный пинцет

Нобелевская премия  
по физике 2018

$$W_\phi = h\nu = \hbar\omega$$
$$p_\phi = \frac{h}{\lambda} = \frac{h\nu}{c} = \frac{\hbar\omega}{c} = \hbar k$$
$$\vec{p}_\phi = \hbar\vec{k}$$



# Лазерный пинцет



# Гипотеза де Бройля (1926)

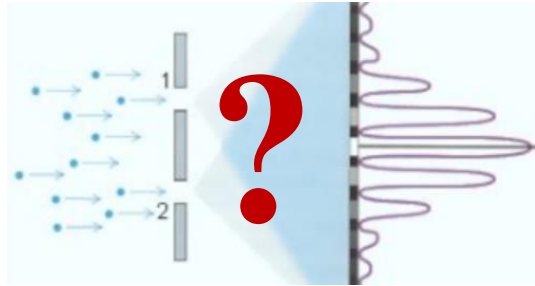


*Louis-Victor-Pierre-Raymond,  
7ème duc de Broglie  
1892-1987*

L. de Broglie, Recherches sur la theorie des quanta.  
Ann. Phys. 10, 22–128, 1925.

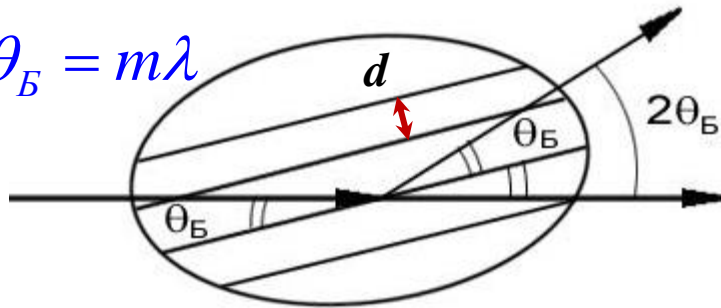
**Частица** с энергией  $W$ , движущаяся со скоростью  $V$ ,  
одновременно **является волной** с частотой  $\nu_0=W/h$   
и длиной волны  $\lambda=h/p$ .

# Дифракция электронов



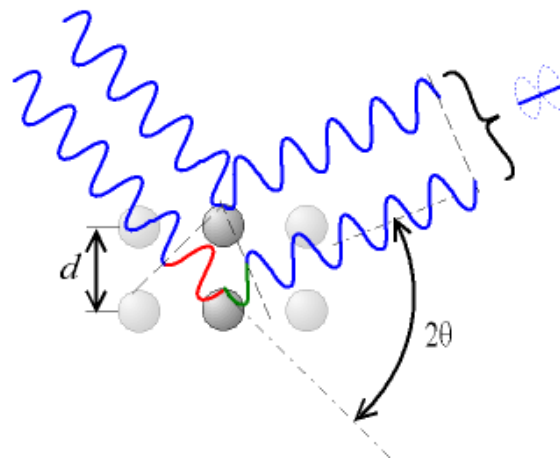
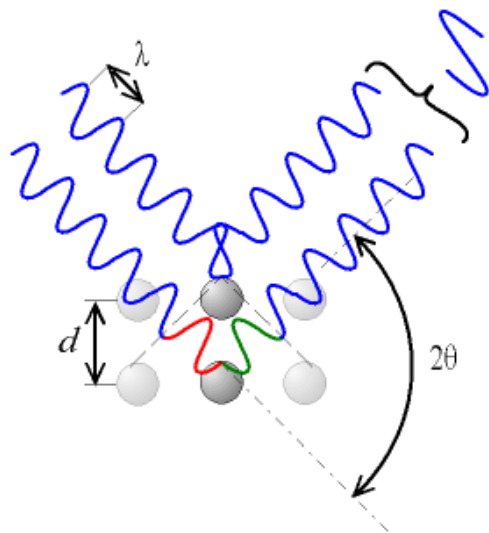
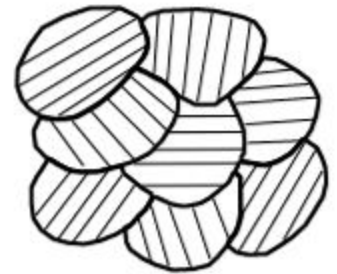
$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m_e V} \approx \frac{h}{\sqrt{2m_e eU}} \approx \frac{12}{\sqrt{U}} \text{ \AA}$$

$$2d \sin \theta_B = m\lambda$$



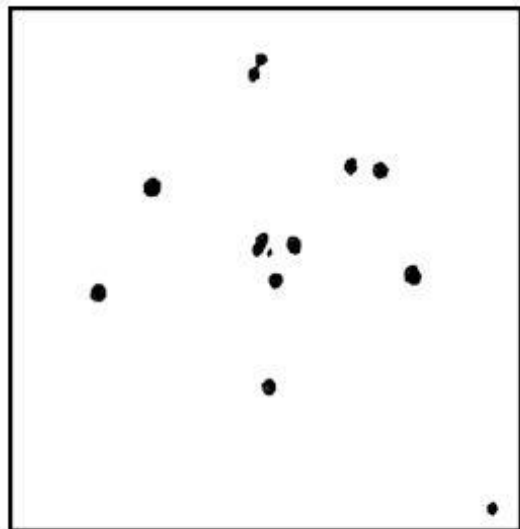
Поликристалл графита:

$$\begin{cases} d_{1,2} = [1, 23; 2, 13] \text{ \AA} \\ U = 5,1 \text{ кВ} \\ m = 1 \\ \sin \theta_{B1,2} \approx [0,04; 0,07] \\ r_{1,2} \approx [2; 3,5] \text{ см} \end{cases}$$



Видео:  
Дифракция электронов

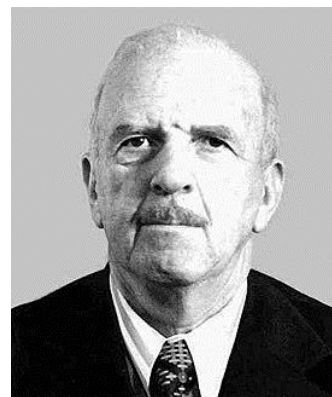
# Дифракция электронов



*Л.М. Биберман, Н.Г. Сушкин, В.А. Фабрикант,  
Дифракция одиночных поочерёдно летящих электронов,  
ДАН СССР 66(2), 185, 1949.*



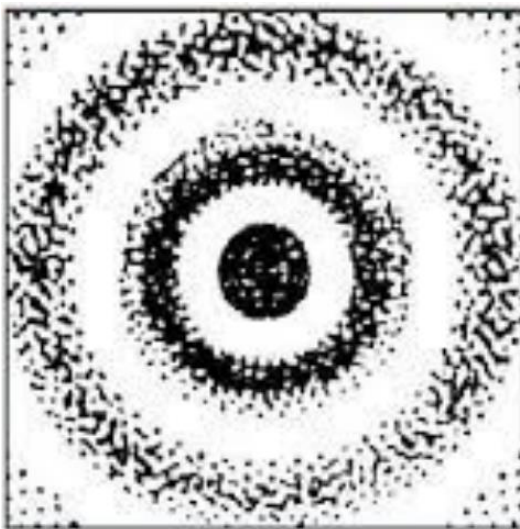
*Валентин  
Александрович  
Фабрикант  
1907-1991*



*Леонид  
Михайлович  
Биберман  
1915-1998*



*Николай  
Гаврилович  
Сушкин  
1911-*





# Примеры дифракции других материальных объектов

## Дифракция электронов на Ni (d=3,5Å)

C. J. Davisson, L.H. Germer, The scattering of electrons by a single crystal of nickel. Nature 119, 558-560, 1927.

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m_e v} \approx \frac{h}{\sqrt{2m_e eU}} \approx \left\| U = 60\text{В}, V \approx 4600 \frac{\text{км}}{\text{с}} \right\| \approx \frac{12}{\sqrt{60}} \text{Å} \approx 1,5 \text{Å} \Rightarrow \theta_{\text{диф}} \approx 25^\circ$$

## Дифракция He и H<sub>2</sub> на NaCl (d=4Å) и LiF (d=2,8Å)

I. Estermann, O. Stern, Beugung von Molekularstrahlen. Z. Phys. 61, 95-125, 1930.

$$T = 100\text{К} \left\| V_T \approx 800 \frac{\text{м}}{\text{с}} \right\| : \lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m_{\text{He}} V_T} \approx \frac{h}{\sqrt{3m_{\text{He}} kT}} \approx 1 \text{Å} \Rightarrow \theta_{\text{диф}} \approx 20^\circ$$

## Дифракция нейтронов

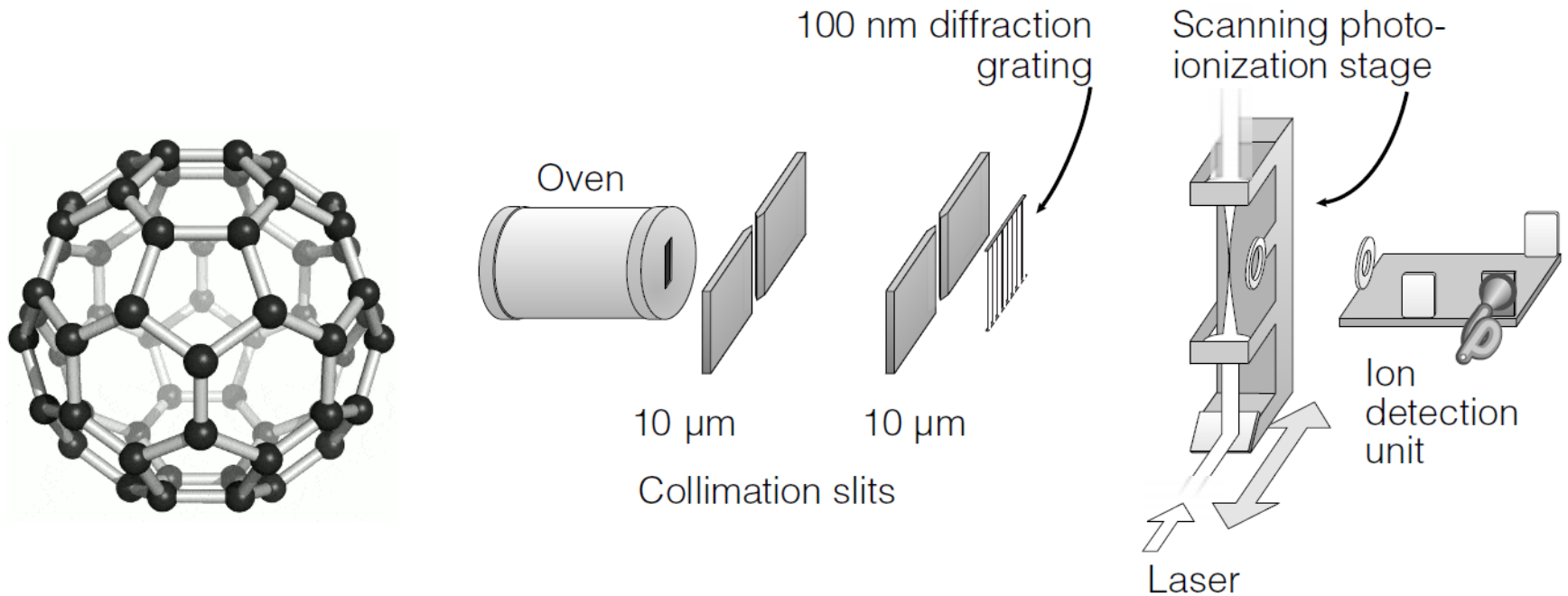
H.V. Halban, P. Preiswerk, Preuve experimentale de la diffraction des neutrons. C.R. Acad. Sci. 203, 73-75, 1936.

## Дифракция кластеров He<sub>2,3</sub> и (H<sub>2</sub>)<sub>2,3,4,6,8</sub> на решётке из Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (d=0,2 мкм)

W. Schollkopf, J.P. Toennies, Nondestructive mass selection of small van der Waals clusters. Science 266, 1345-1348, 1994.

$$\lambda \approx 0,8 \text{Å} \Rightarrow \theta_{\text{диф}} \approx 0,03^\circ$$

# Примеры дифракции других материальных объектов

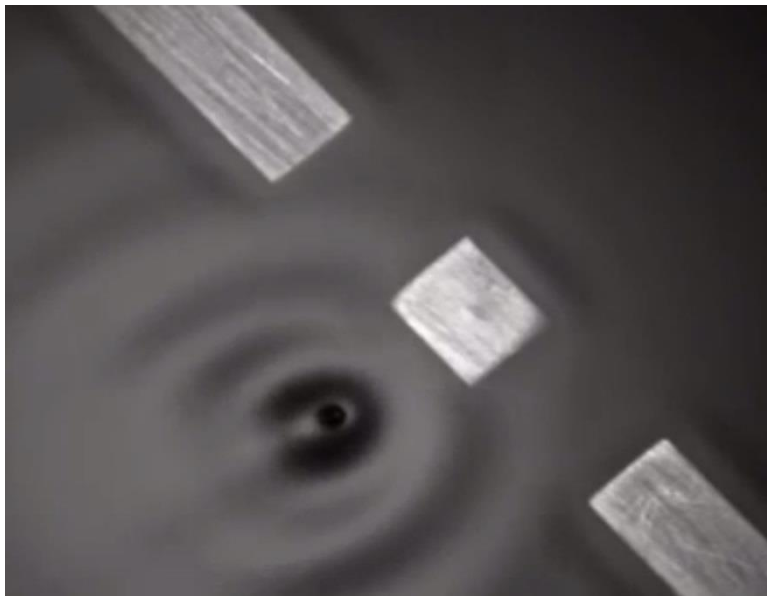
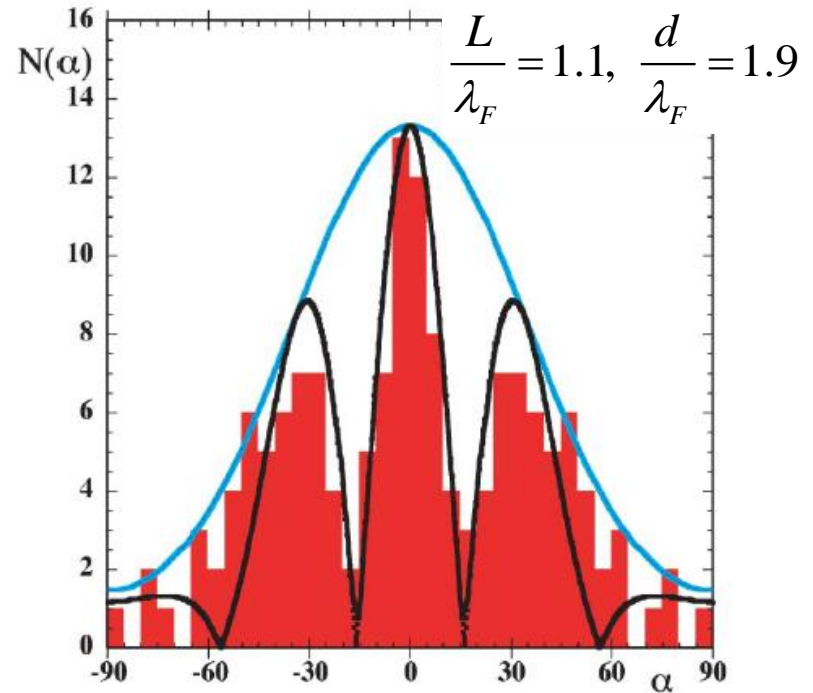
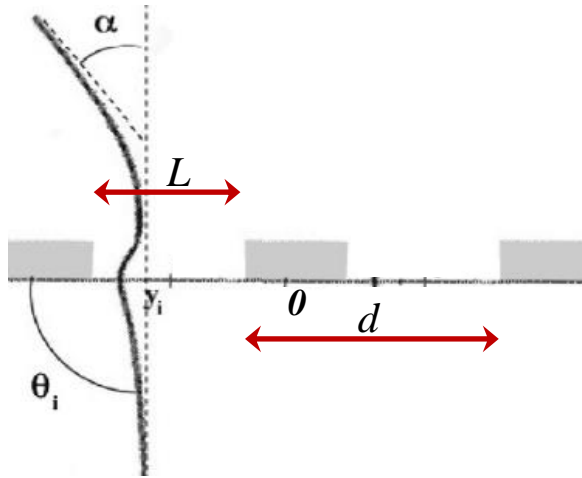


## Дифракция фуллерена $C_{60}$ на решётке из $SiN_x$ ( $d=0,1$ мкм)

М. Arndt, О. Nairz, J. Vos-Andreae, С. Keller, G. Zouw, А. Zeilinger, Wave-particle duality of  $C_{60}$  molecules. Letters to Nature 401, 680-682, 1999.

$$\lambda = \frac{h}{MV} \approx \left\| V_T \approx 200 \frac{M}{c}, T \approx 1000 K \right\| \approx 2,5 \text{ нм} \Rightarrow \theta_{\text{диф}} \approx 0,001^\circ$$

# Волновые свойства «скитальцев». Дифракция



$$f(\alpha) = A \left| \frac{\sin \Psi}{\Psi} \right| \left| \cos \left( \pi \frac{\sin \alpha}{\lambda_F / d} \right) \right|, \quad \Psi = \pi \frac{\sin \alpha}{\lambda_F / L}$$

$$\omega_F = \omega / 2$$

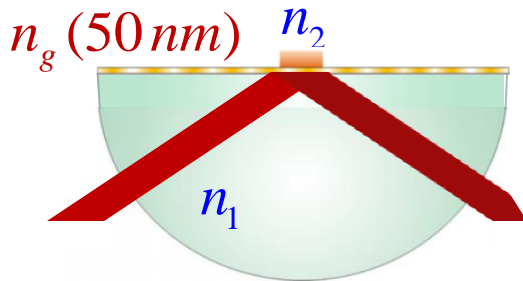
$$\omega^2 = 4 \left( gk + \frac{\sigma}{\rho} k^3 \right) \tanh(kH)$$

$H$  – глубина ванны

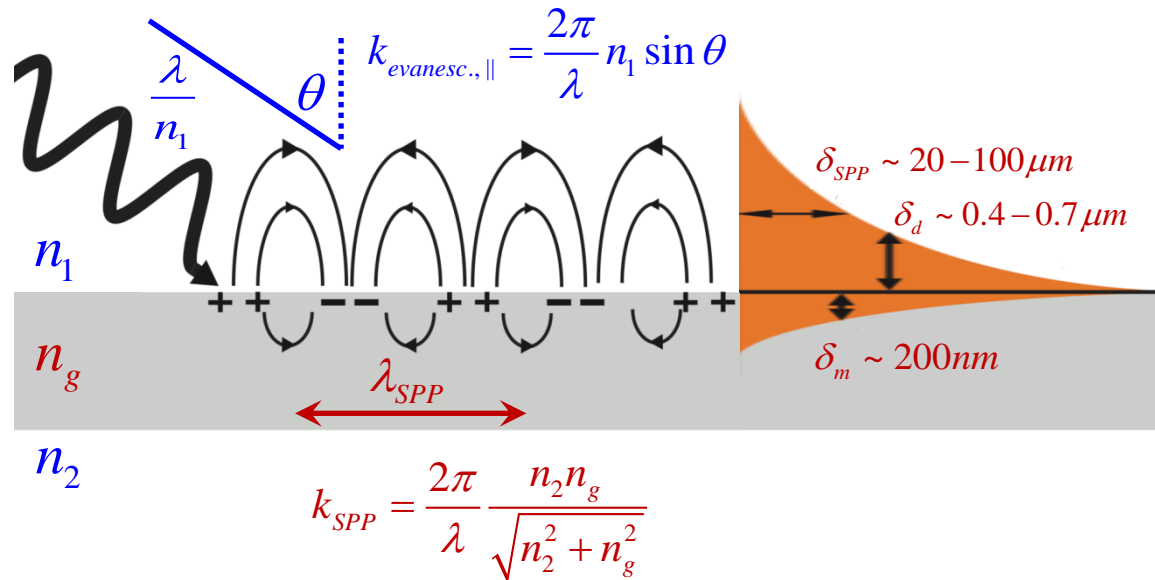
# Поверхностные плазмон-поляритоны

**Плазмон** – квазичастица, отвечающая продольной волне в газе свободных электронов.

При появлении плазмона возникает электромагнитная волна, которой соответствует квазичастица, называемая **поляритоном**.

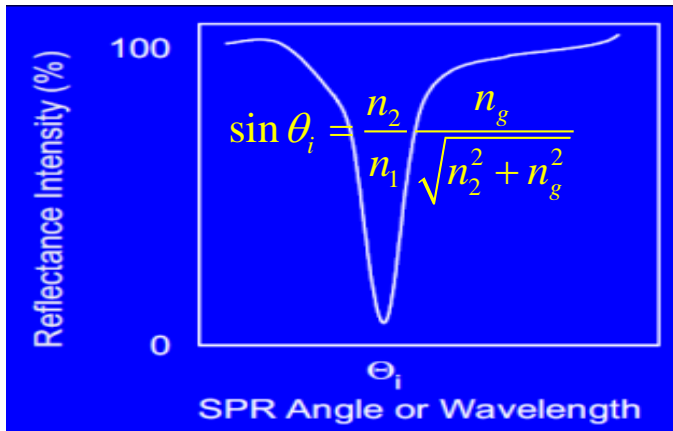


## Поверхностный плазмон-поляритон



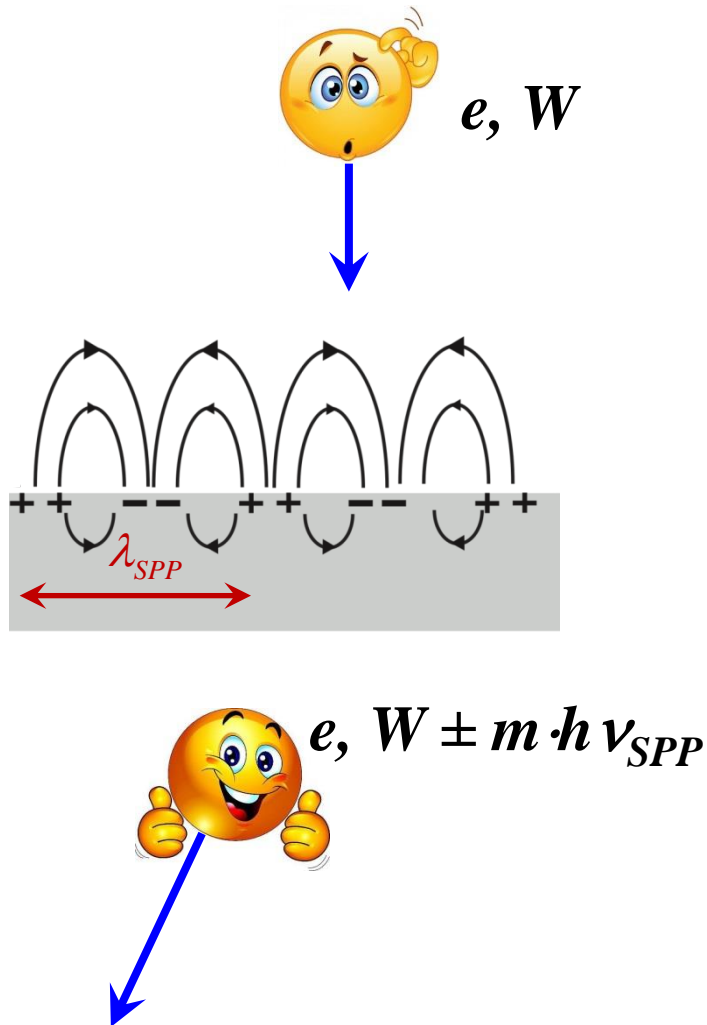
## Основные применения.

1. Измерение толщин тонких металлических плёнок и их показателей преломления (2 нм).
2. Биосенсоры (50 фг ~ 1000000 молекул белка).
3. Микроскопия поверхностного плазмонного резонанса.



# Фотоиндуцированная электронная микроскопия ближнего поля

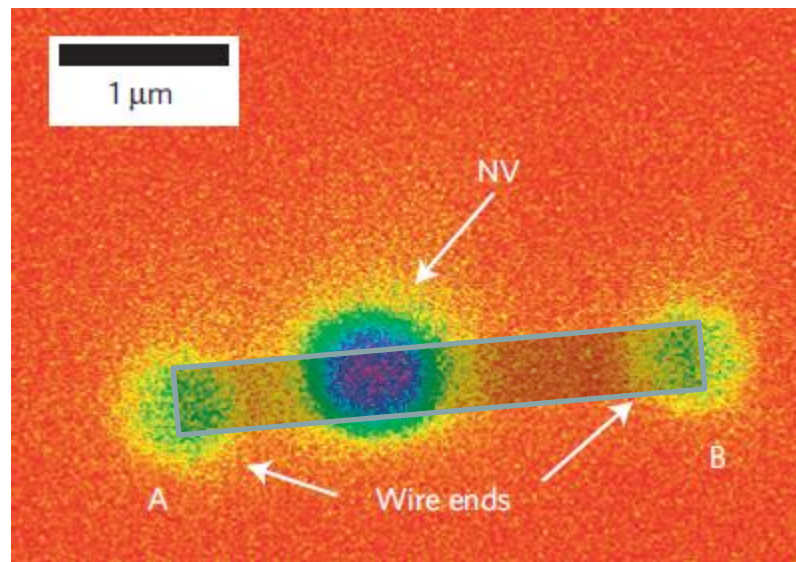
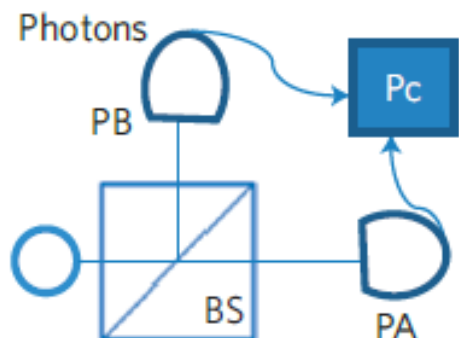
*Photon-Induced Near-field Electron Microscopy*



*L. Piazza et al.,  
Simultaneous observation of the  
quantization and the interference  
pattern of a plasmonic near-field,  
Nature Communications, 6, 6407, 2015.*

This methodology enables visualization of plasmonic fields at the nanoscale, providing a promising tool for understanding the fundamental properties of confined electromagnetic fields and the development of advanced photonic circuits.

# Поверхностный плазмон-поляритон – тоже частица



*R. Kolesov et al.*  
*Wave-particle duality of single*  
*surface plasmon polaritons.*  
*Nature Physics, 5, 470–474, 2009.*

