

100 obrazov fotona

Sergej Faletič, UL FMF

Vprašanje

Kako vpeljete “foton”?
Kako ga “definirate”?



Kaj je foton?

Paket energije v EMV Kvant svetlobe
Delec svetlobe
Valovni paket
Dualnost

Kaj je foton?

Paket energije v EMV Kvant svetlobe
Delec svetlobe
Valovni paket
Dualnost

Okvir ontoloških kategorij (Chi)

Chi et al (1994). From things to processes: A theory of conceptual change for learning science concepts, *Learning and Instruction* **4**, 27. [https://doi.org/10.1016/0959-4752\(94\)90017-5](https://doi.org/10.1016/0959-4752(94)90017-5)

Kaj je foton?

Paket energije v EMV Kvant svetlobe
Delec svetlobe
Valovni paket
Dualnost

Okvir ontoloških kategorij (Chi)

- Snov
 - Ima maso, volumen, lego, oprijemljiva...

Kaj je foton?

Paket energije v EMV Kvant svetlobe
Delec svetlobe
Valovni paket
Dualnost

Okvir ontoloških kategorij (Chi)

- **Snov**
 - Ima maso, volumen, lego, oprijemljiva...
- **Procesi**
 - Niso oprijemljivi. Kavzalnost. Prenos energije, val, interakcija...

Kaj je foton?

Paket energije v EMV Kvant svetlobe
Delec svetlobe
Valovni paket
Dualnost

Okvir ontoloških kategorij (Chi)

- **Snov**
 - Ima maso, volumen, lego, oprijemljiva...
- **Procesi**
 - Niso oprijemljivi. Kavzalnost. Prenos energije, val, interakcija...
- **Umska stanja**
 - (Izven našega kontaksta)

Kaj je foton?

Paket energije v EMV Kvant svetlobe
Delec svetlobe
Valovni paket
Dualnost

Okvir ontoloških kategorij (Chi)

- Snov
 - Ima maso, volumen, lego, oprijemljiva...
- Procesi
 - Niso oprijemljivi. Kavzalnost. Prenos energije, val, interakcija...
- Umska stanja
 - (Izven našega kontaksta)

Kaj je foton?

Paket energije v EMV Kvant svetlobe
Delec svetlobe
Valovni paket
Dualnost

Okvir ontoloških kategorij (Chi)

- **Snov**
 - Ima maso, volumen, lego, oprijemljiva...
- **Procesi**
 - Niso oprijemljivi. Kavzalnost. Prenos energije, val, interakcija...
- **Umska stanja**
 - (Izven našega kontaksta)

Kaj je foton?

Paket energije v EMV Kvant svetlobe
Delec svetlobe
Valovni paket
Dualnost

Okvir ontoloških kategorij (Chi)

- Snov
 - Ima maso, volumen, lego, oprijemljiva...
- Procesi
 - Niso oprijemljivi. Kavzalnost. Prenos energije, val, interakcija...
- Umska stanja
 - (Izven našega kontaksta)

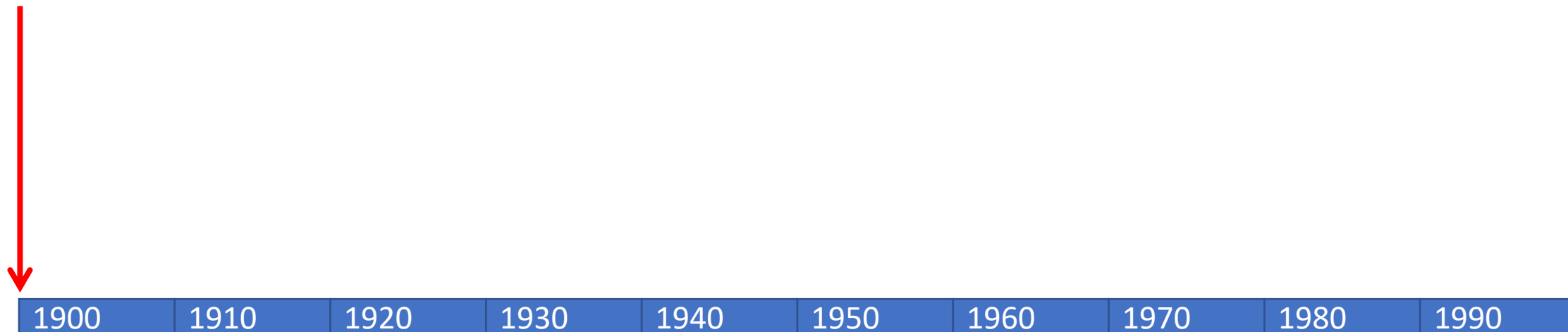
Kaj je foton?

Paket energije v EMV Kvant svetlobe
Delec svetlobe
Valovni paket
Dualnost

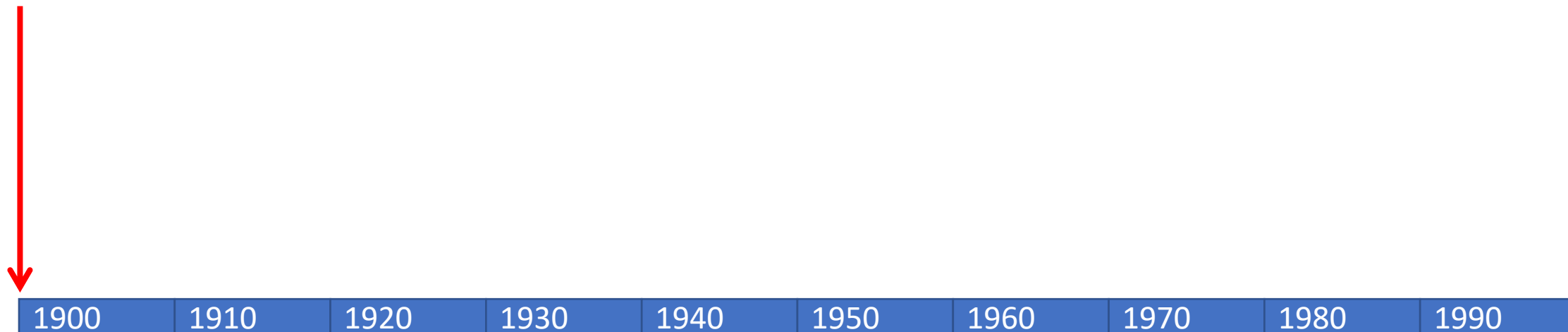
Okvir ontoloških kategorij (Chi)

- Snov
 - Ima maso, volumen, lego, oprijemljiva...
- Procesi
 - Niso oprijemljivi. Kavzalnost. Prenos energije, val, interakcija...
- Umska stanja
 - (Izven našega kontaksta)
- Kvantoni?

Sevaje črnega telesa (Planck)



Sevaje črnega telesa (Planck)



Fotoefekt pojasnjen (Einstein)

Sevaje črnega telesa (Planck)

Dvojna reža s šibko svetlobo (G. I. Taylor)



Fotoefekt pojasnjen (Einstein)

Sevaje črnega telesa (Planck)

Dvojna reža s šibko svetlobo (G. I. Taylor)



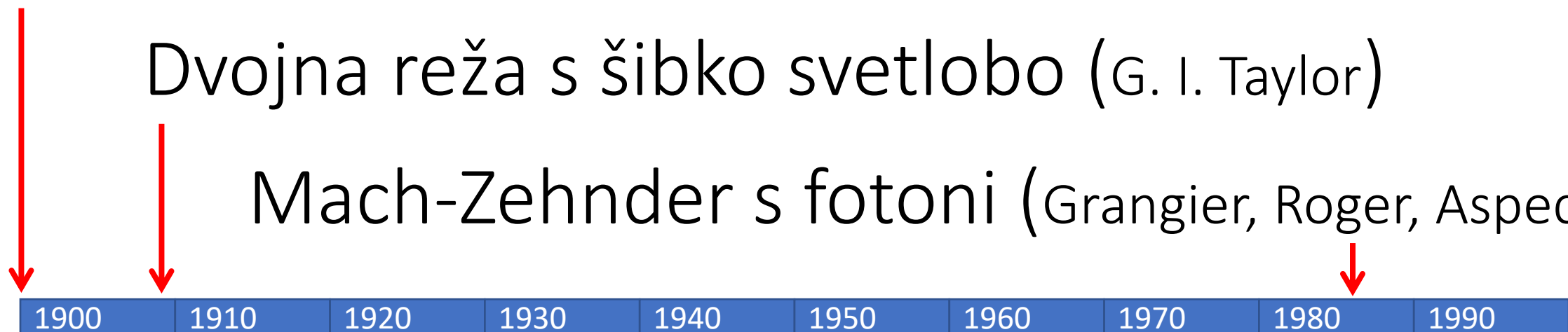
Kvantna elektrodinamika (Dirac)

Fotoefekt pojasnjen (Einstein)

Sevaje črnega telesa (Planck)

Dvojna reža s šibko svetlobo (G. I. Taylor)

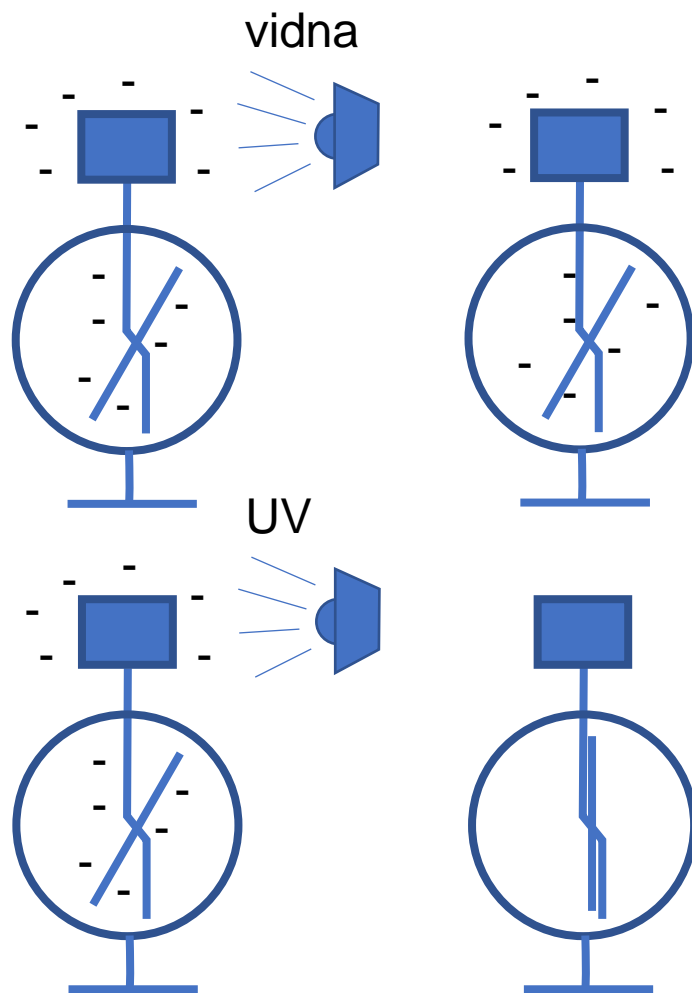
Mach-Zehnder s fotoni (Grangier, Roger, Aspect)



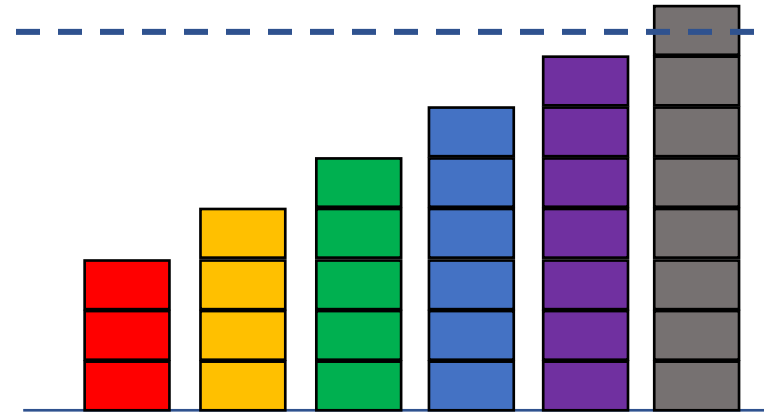
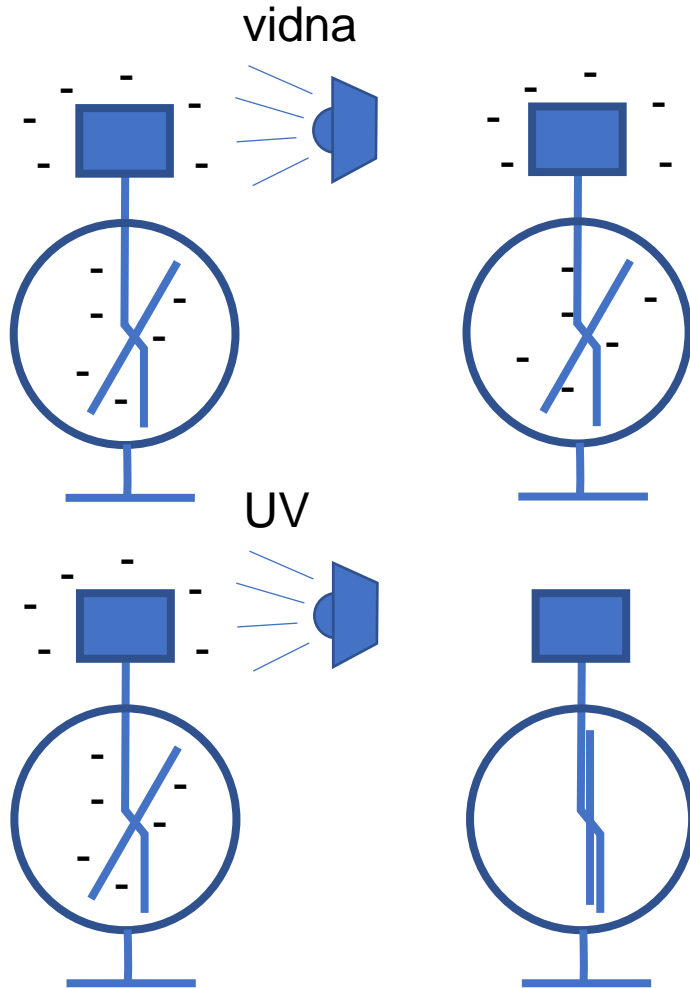
Kvantna elektrodinamika (Dirac)

Fotoefekt pojasnjen (Einstein)

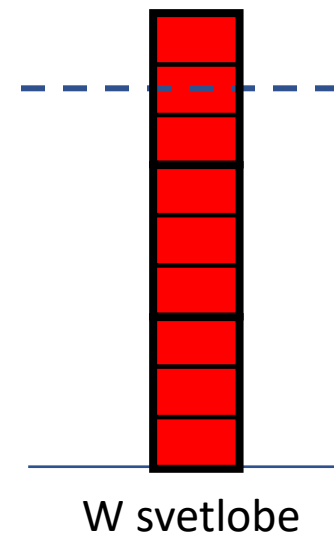
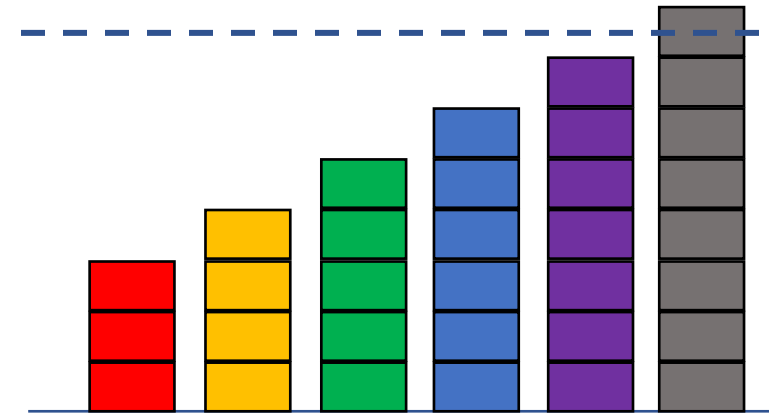
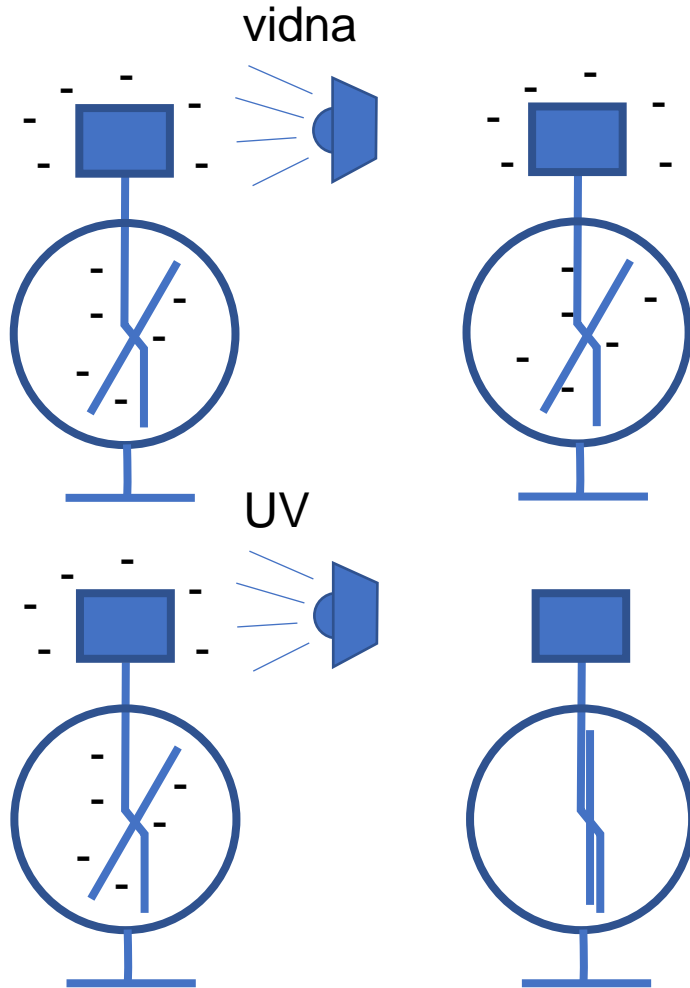
Fotoefekt



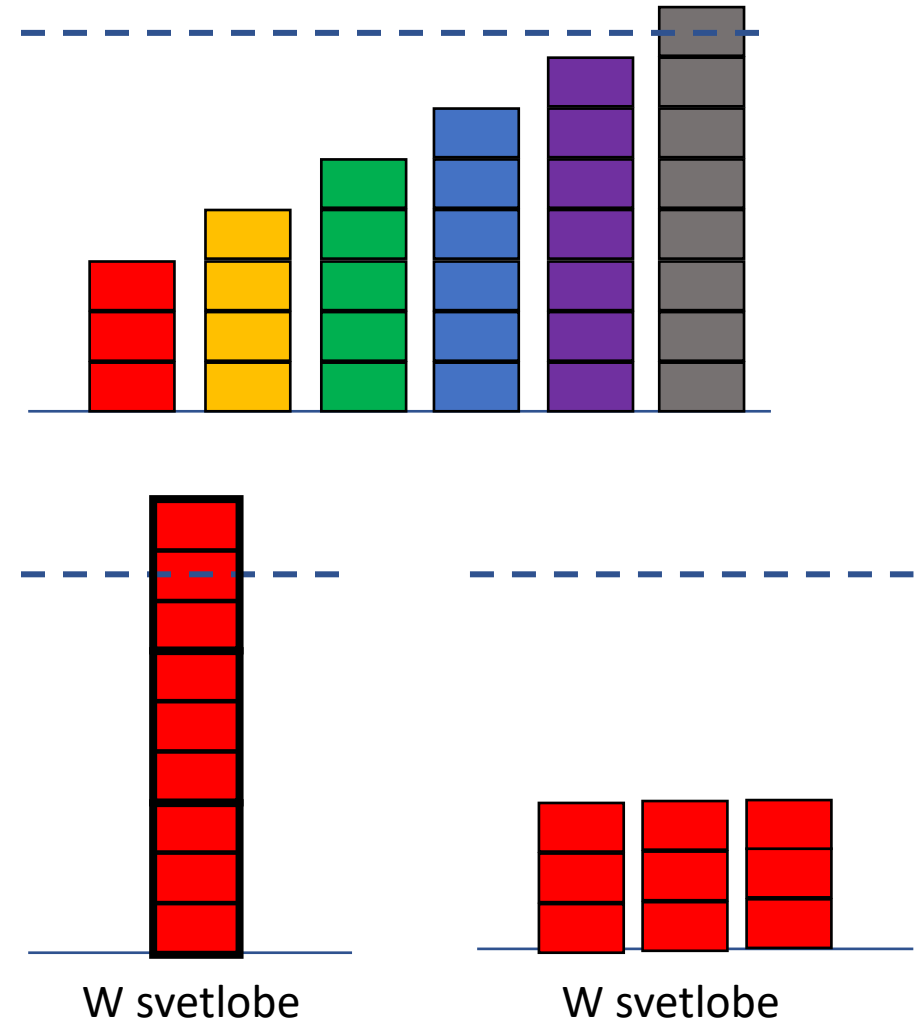
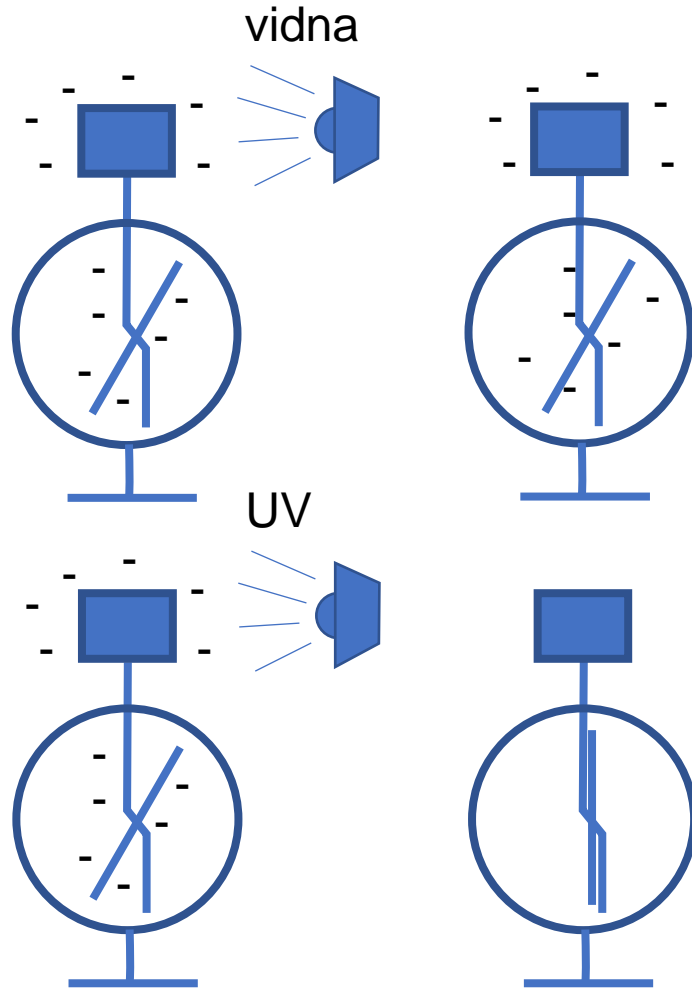
Fotoefekt



Fotoefekt

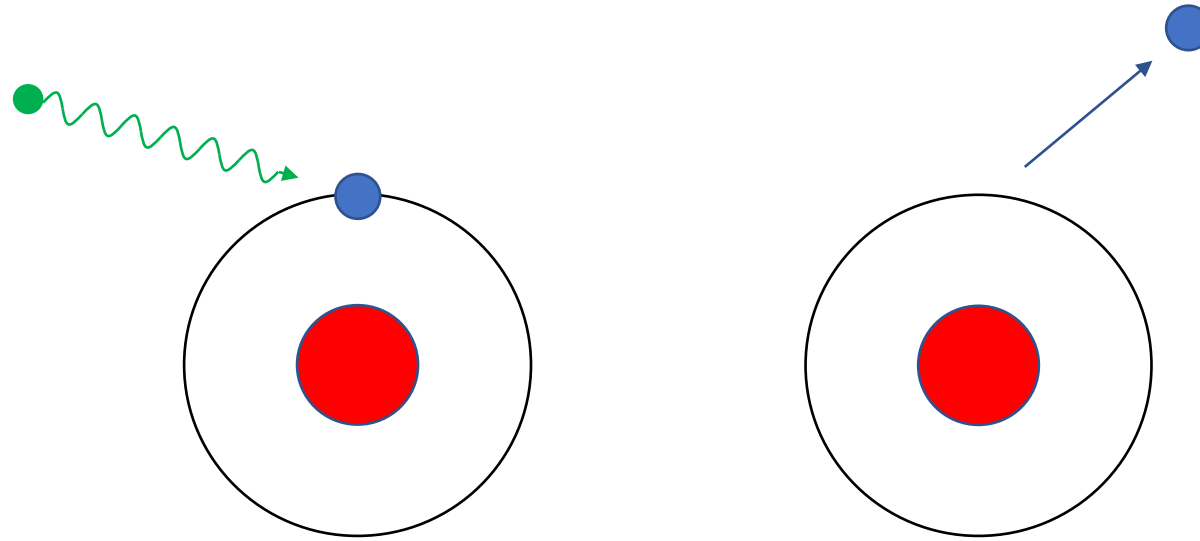


Fotoefekt



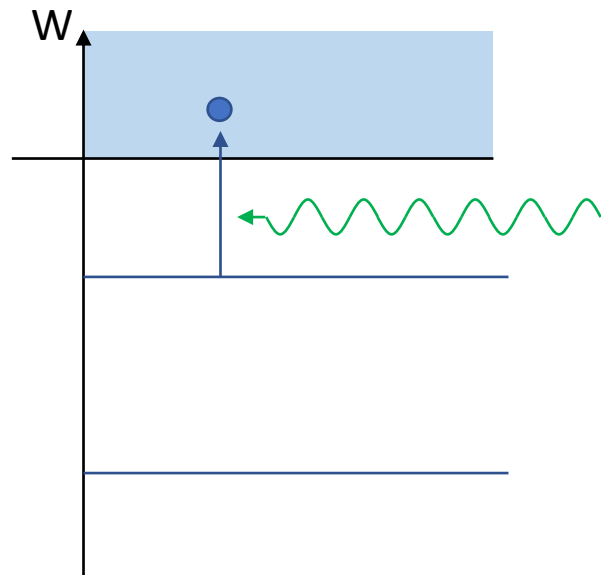
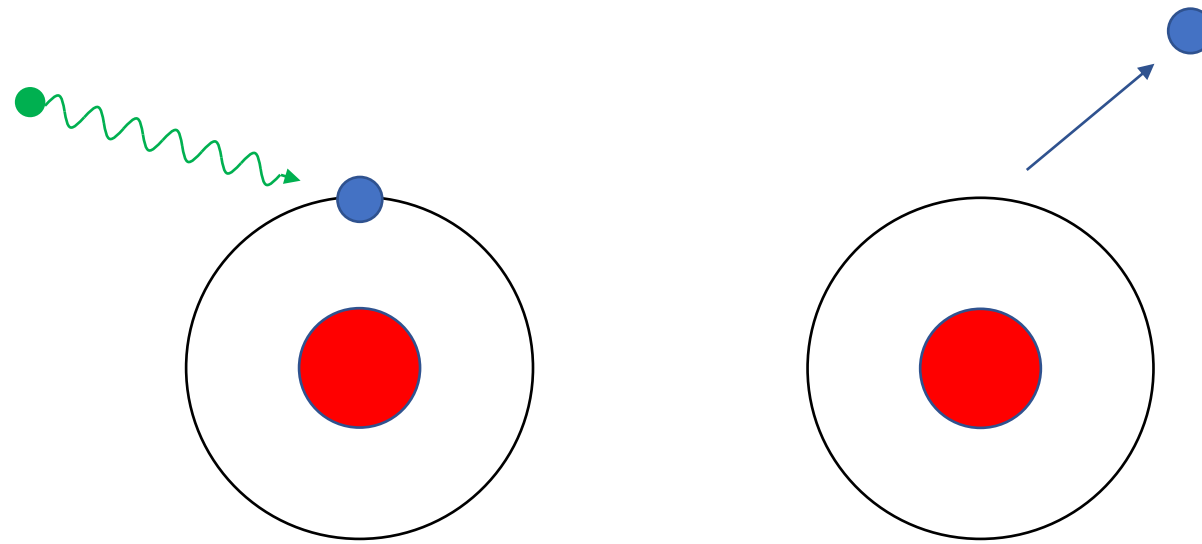
Fotoefekt

Različne upodobitve



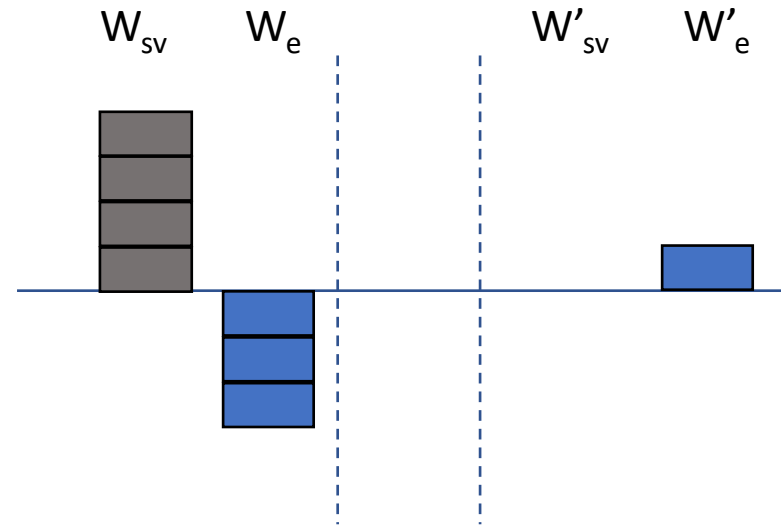
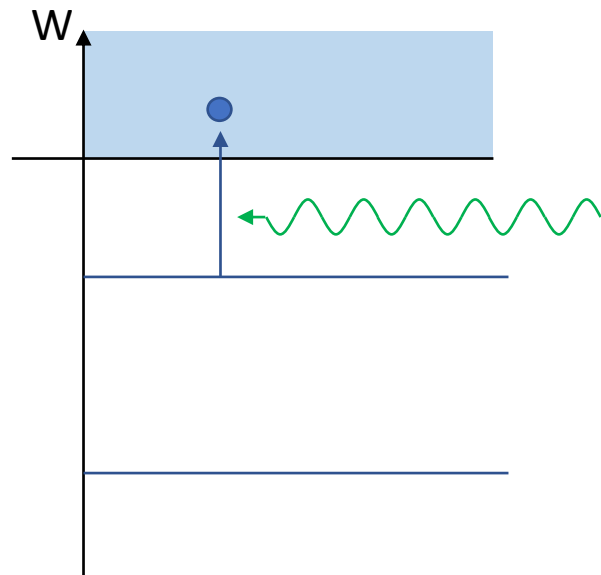
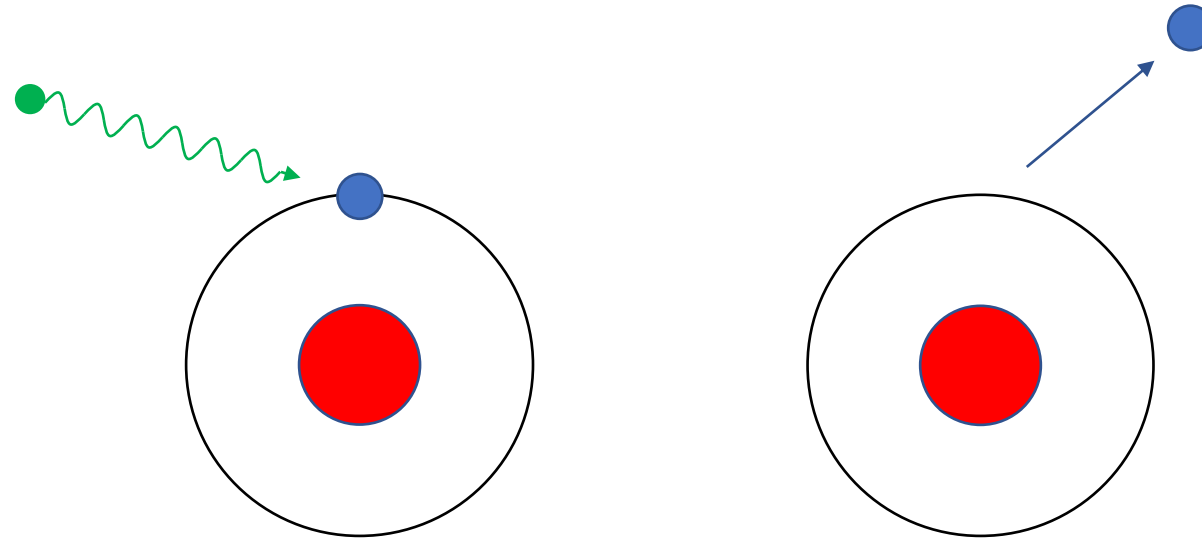
Fotoefekt

Različne upodobitve



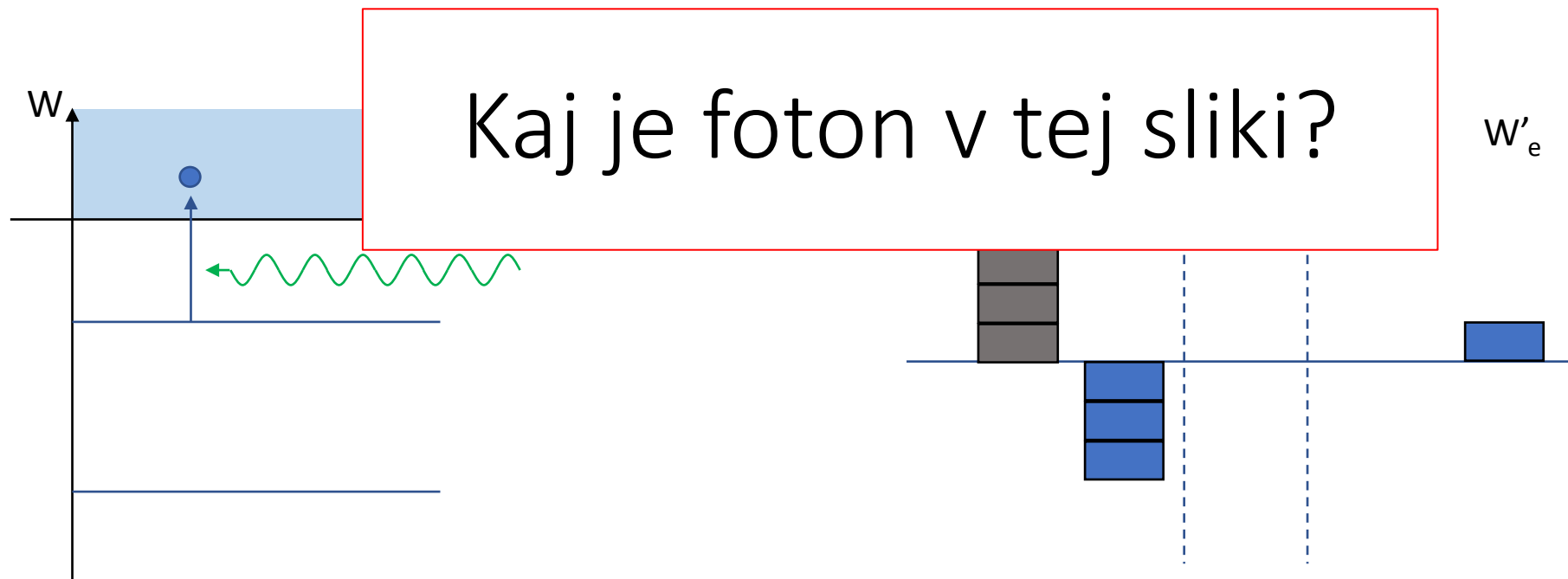
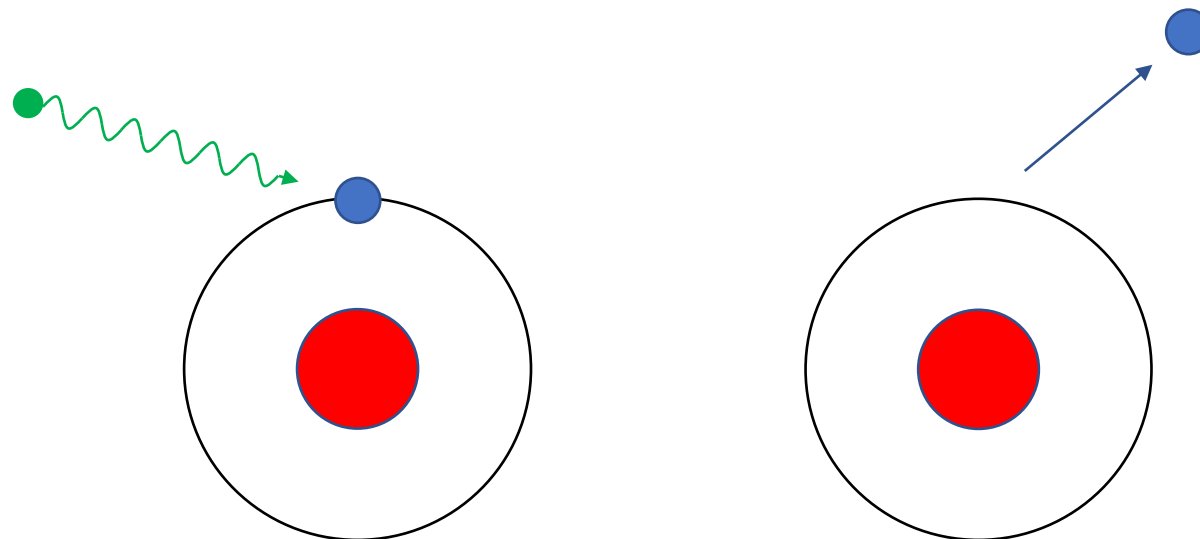
Fotoefekt

Različne upodobitve



Fotoefekt

Različne upodobitve



Planck in Einstein (1900 - 1905)

Planck (1901). Über das Gesetz der Energieverteilung im Normalspectrum (On the Law of Energy Distribution in the Normal Spectrum), *Annalen der Physik* **4**, 553.

<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4e/On the Law of the Energy Distribution in the Normal Spectrum.pdf>

Planck in Einstein (1900 - 1905)

1. Spekter je enolično določen s funkcijo

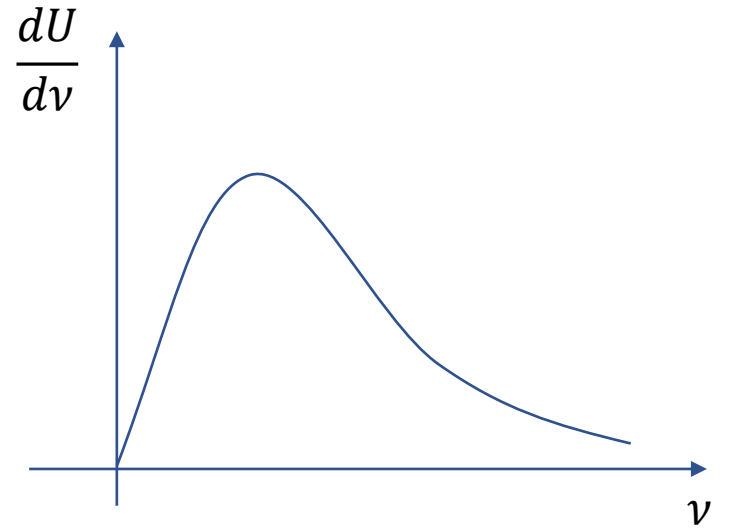
$$S(\nu, U) \Rightarrow \rho(\nu)$$

Planck in Einstein (1900 - 1905)

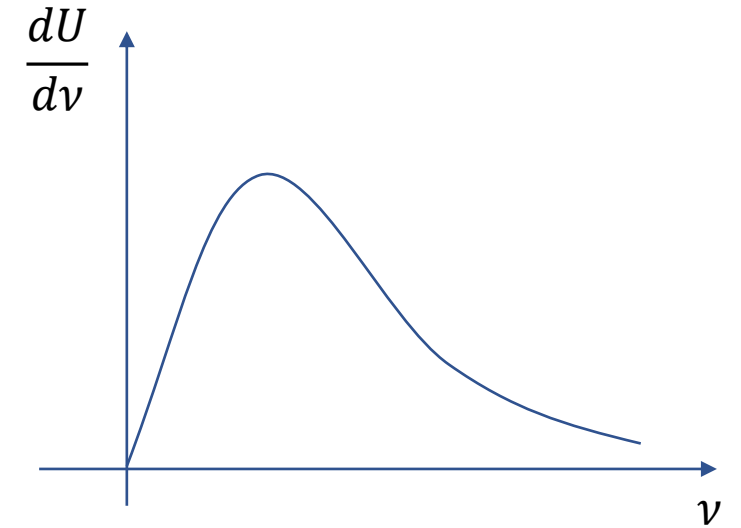
1. Spekter je enolično določen s funkcijo

$$S(\nu, U) \Rightarrow \rho(\nu)$$

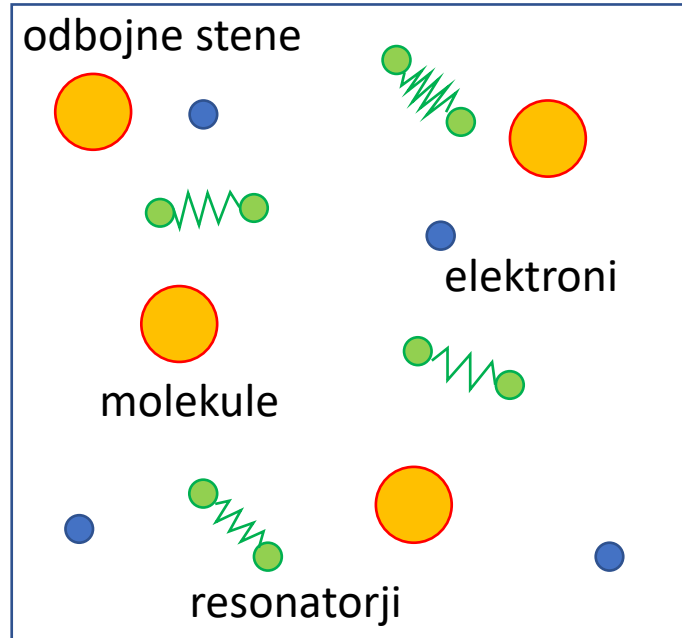
2. Spekter ima obliko na desni (eksperimentalno, enčba je znana).



Planck in Einstein (1900 - 1905)

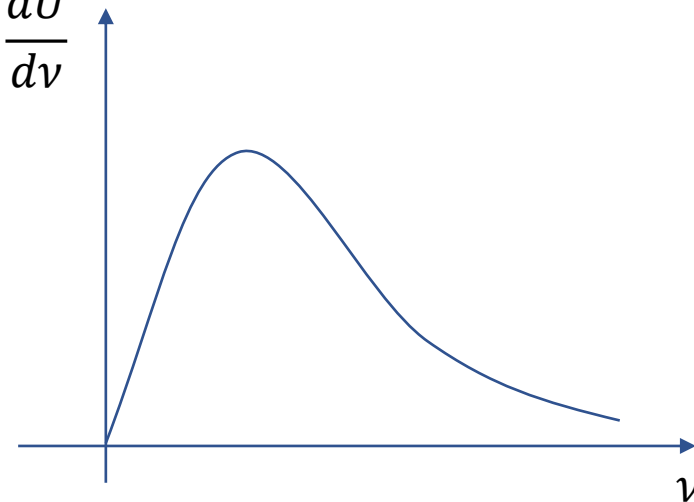


1. Spekter je enolično določen s funkcijo
$$S(\nu, U) \Rightarrow \rho(\nu)$$
2. Spekter ima obliko na desni (eksperimentalno, enčba je znana).
3. V notranjosti črnega telesa so delci in resonatorji.



Planck in Einstein (1900 - 1905)

$$\frac{dU}{d\nu}$$

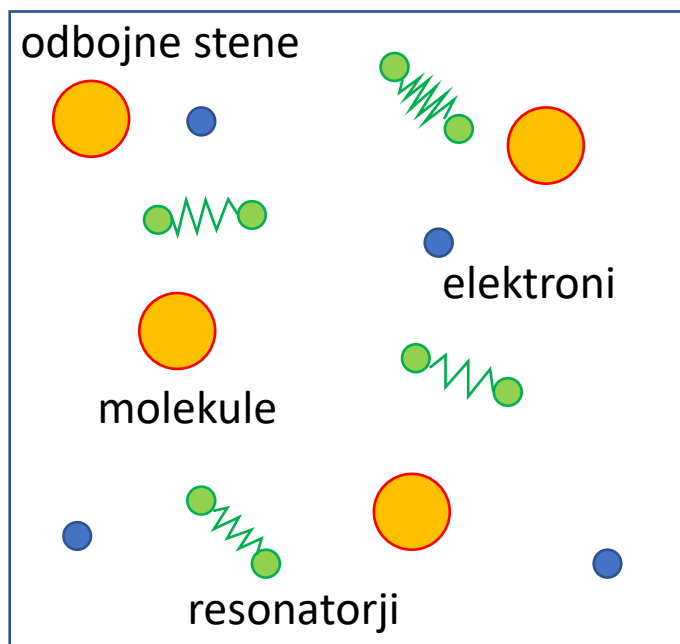


1. Spekter je enolično določen s funkcijo

$$S(\nu, U) \Rightarrow \rho(\nu)$$

2. Spekter ima obliko na desni (eksperimentalno, enčba je znana).

3. V notranjosti črnega telesa so delci in resonatorji.



4. Entropija stanja je povezana z verjetnostjo za to stanje

$$S = k \log W + C$$



Sevanje črnega telesa (1900)

1. Resonatorji imajo različne energije U_i pri isti ν . Sicer bi bil "nered" = 0.

2. Skupna energija pri dani ν :

$$U_N = NU; \quad U = \text{avg}(U_i)$$

3. Skupna entropija:

$$S_N = NS; \quad S = \text{avg}(S_i)$$

4. "Kompleks":

resonator:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U_i (P-ji)	7	38	11	0	9	2	20	4	4	5

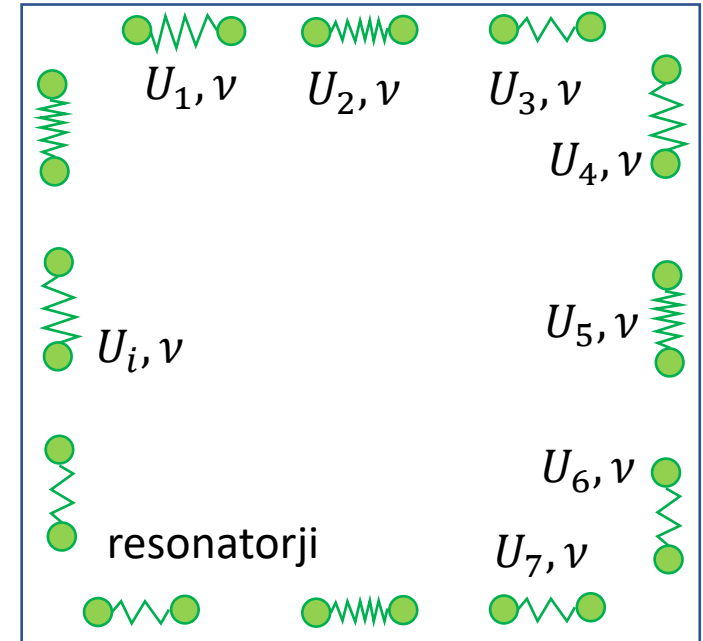
5. Ne sme biti neskončno kompleksov => energija ni deljiva na neskončno načinov:

$$U_N = P\epsilon; \quad U_i = P_i\epsilon; \quad P = \sum P_i$$

ϵ je najmanjša količina energije – energijski kvant.

6. Statistika določa število možnih kompleksov:

$$\frac{(N + P - 1)!}{(N - 1)! P!}$$



$$U_i = \frac{1}{2} k A^2 \quad \nu = 2\pi \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Sevanje črnega telesa (1900)

1. Resonatorji imajo različne energije U_i pri isti ν . Sicer bi bil "nered" = 0.

2. Skupna energija pri dani ν :

$$U_N = NU; \quad U = \text{avg}(U_i)$$

3. Skupna entropija:

$$S_N = NS; \quad S = \text{avg}(S_i)$$

4. "Kompleks":

resonator:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U_i (P-ji)	7	38	11	0	9	2	20	4	4	5

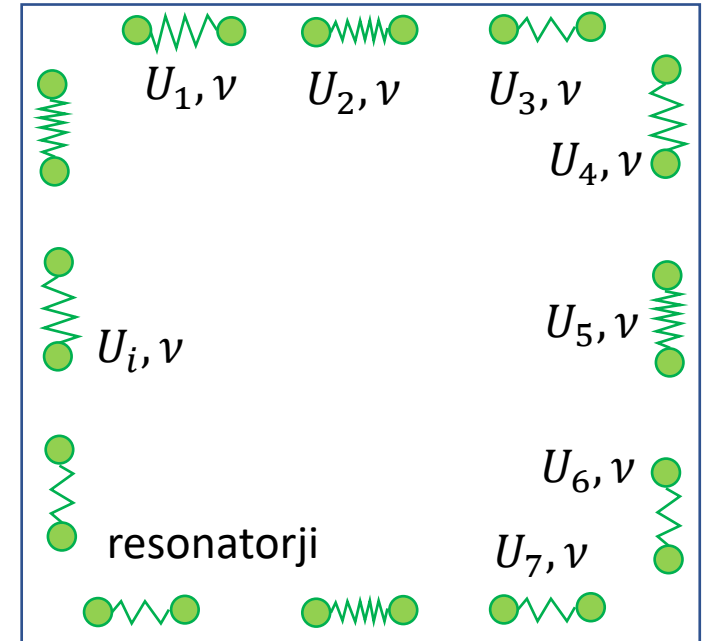
5. Ne sme biti neskončno kompleksov => energija ni deljiva na neskončno načinov:

$$U_N = P\epsilon; \quad U_i = P_i\epsilon; \quad P = \sum P_i$$

ϵ je najmanjša količina energije – energijski kvant.

6. Statistika določa število možnih kompleksov:

$$\frac{(N + P - 1)!}{(N - 1)! P!}$$



$$U_i = \frac{1}{2} kA^2 \quad \nu = 2\pi \sqrt{\frac{k}{m}}$$

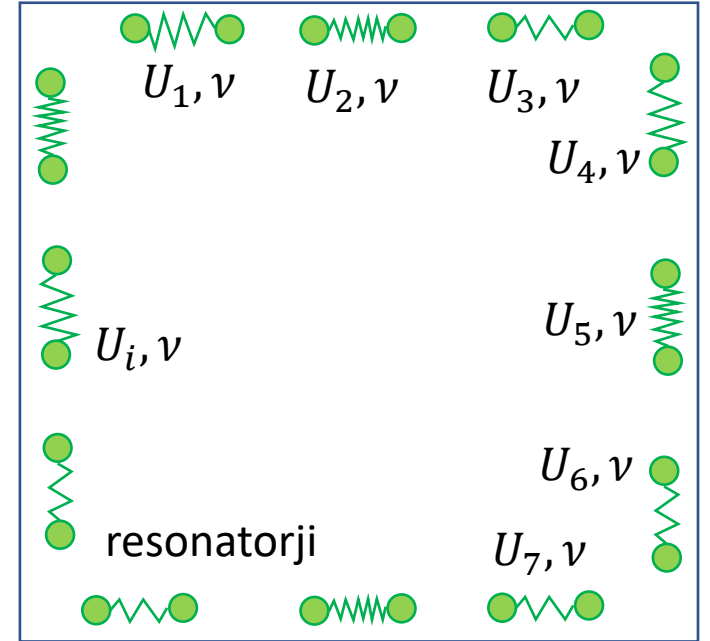
Sevanje črnega telesa (1900)

- Spomnimo se 2. in 5.

$$U_N = NU$$

$$U_N = P\epsilon$$

N je število resonatorjev in P je število kvantov.



Sevanje črnega telesa (1900)

1. Resonatorji imajo različne energije U_i pri isti ν . Sicer bi bil "nered" = 0.

2. Skupna energija pri dani ν :

$$U_N = NU; \quad U = \text{avg}(U_i)$$

3. Skupna entropija:

$$S_N = NS; \quad S = \text{avg}(S_i)$$

4. "Kompleks":

resonator:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U_i (P-ji)	7	38	11	0	9	2	20	4	4	5

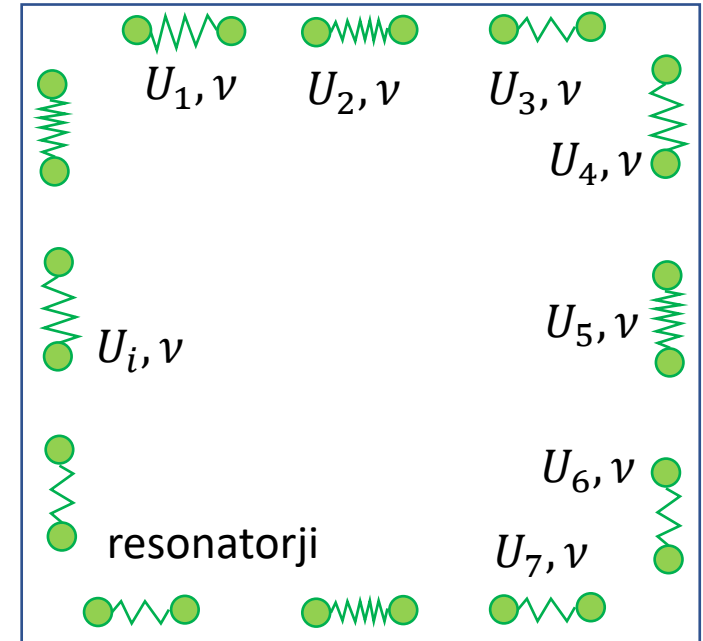
5. Ne sme biti neskončno kompleksov => energija ni deljiva na neskončno načinov:

$$U_N = P\epsilon; \quad U_i = P_i\epsilon; \quad P = \sum P_i$$

ϵ je najmanjša količina energije – energijski kvant.

6. Statistika določa število možnih kompleksov:

$$\frac{(N + P - 1)!}{(N - 1)! P!}$$



$$U_i = \frac{1}{2} kA^2 \quad \nu = 2\pi \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Sevanje črnega telesa (1900)

- Spomnimo se 2. in 5.

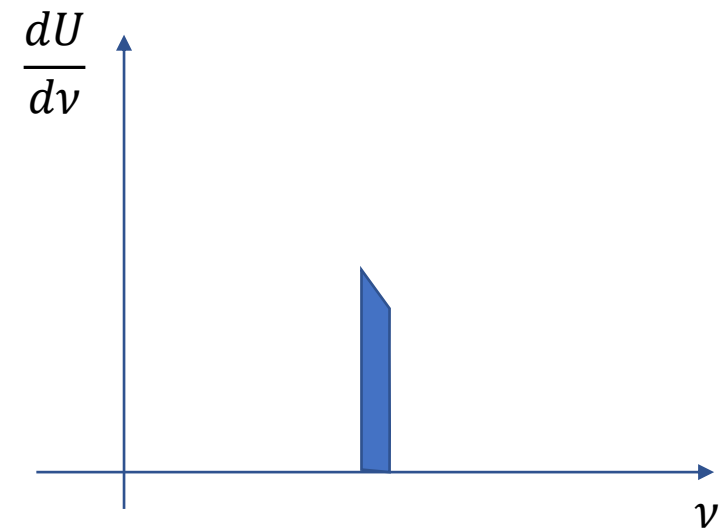
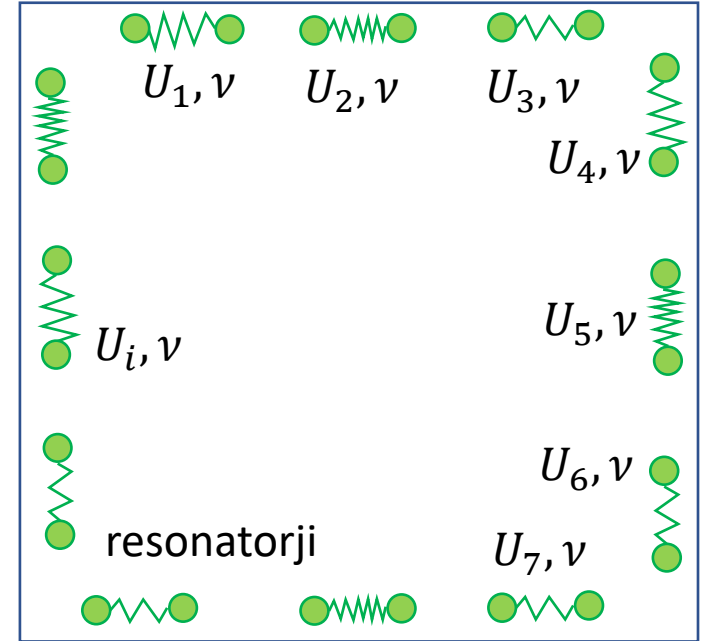
$$U_N = NU$$

$$U_N = P\epsilon$$

N je število resonatorjev in P je število kvantov.

- Spomnimo se 6. Statistika določa število možnih kompleksov:

$$\frac{(N + P - 1)!}{(N - 1)! P!} \Rightarrow W \Rightarrow S_N(\nu, U_N) \Rightarrow \frac{dU}{d\nu}$$



Sevanje črnega telesa (1900)

- Spomnimo se 2. in 5.

$$U_N = NU$$

$$U_N = P\epsilon$$

N je število resonatorjev in P je število kvantov.

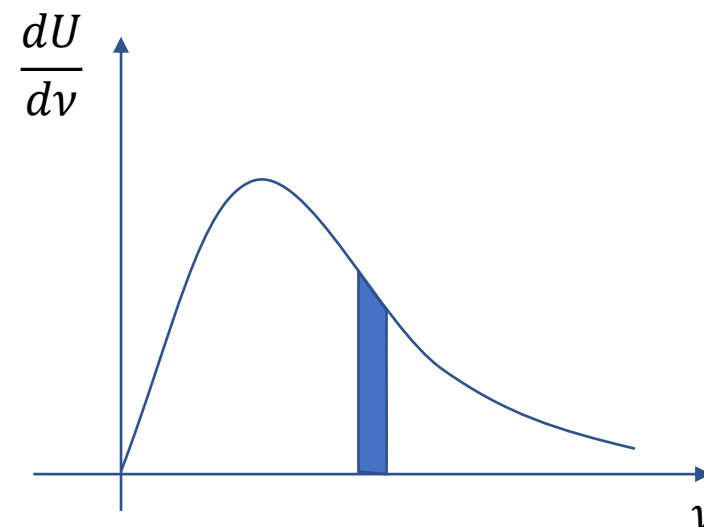
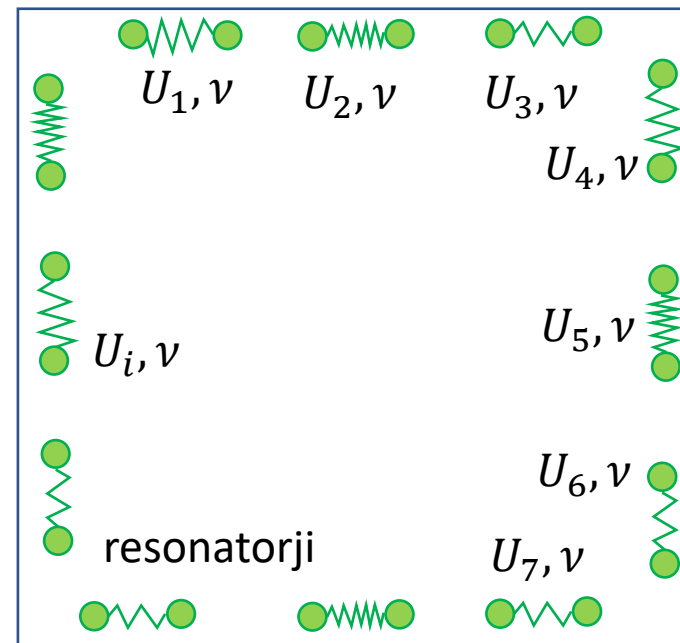
- Spomnimo se 6. Statistika določa število možnih kompleksov:

$$\frac{(N + P - 1)!}{(N - 1)! P!} \Rightarrow W \Rightarrow S_N(\nu, U_N) \Rightarrow \frac{dU}{d\nu}$$

7. Če postavimo

$$\epsilon = h\nu$$

nam statistika reproducira spekter črnega telesa.



Sevanje črnega telesa (1900)

- Spomnimo se 2. in 5.

$$U_N = NU$$

$$U_N = P\epsilon$$

N je število resonatorjev in P je število kvantov.

- Spomnimo se 6. Statistika določa število možnih kompleksov:

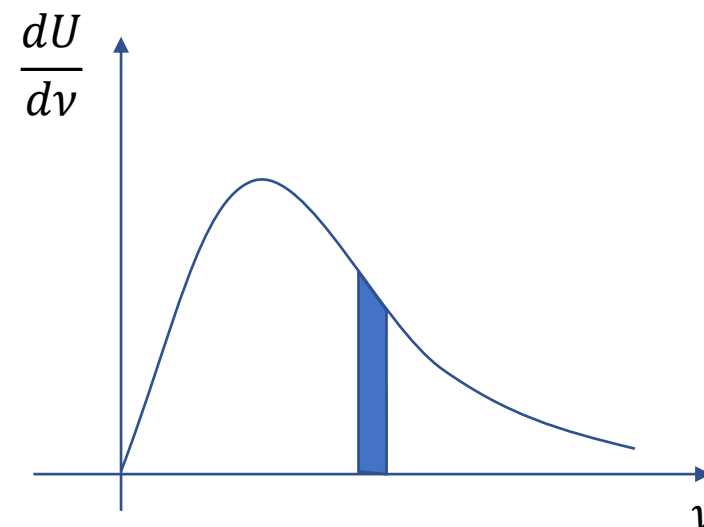
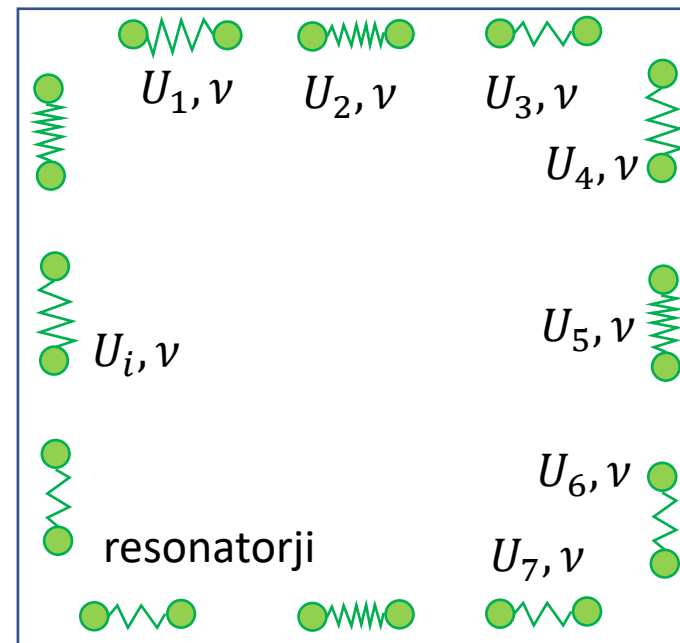
$$\frac{(N + P - 1)!}{(N - 1)! P!} \Rightarrow W \Rightarrow S_N(\nu, U_N) \Rightarrow \frac{dU}{d\nu}$$

- 7. Če postavimo

$$\epsilon = h\nu$$

nam statistika reproducira spekter črnega telesa.

Planck nima koncepta fotona.



Fotoeffekt (1905)

Einstein (1905). Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt (On a Heuristic Point of View Concerning the Production and Transformation of Light), *Annalen der Physik* **17**, 132.

https://astro1.panet.utoledo.edu/~ljc/PE_eng.pdf

Fotoefekt (1905)

Predpostavke:

1. Planck: Sevanje je maksimalno naključen proces.

=> Entropija S je maksimalna.

=> Vsak resonator interagira s poljem samo pri lastni frekvenci.

2. Če poznamo porazdelitev energije po frekvenci $\rho(\nu)$, iz tega enolično sledi entropija EMP S .

3. Ker je proces dodajanja energije reverzibilen, velja $dS = \frac{1}{T} dU$.

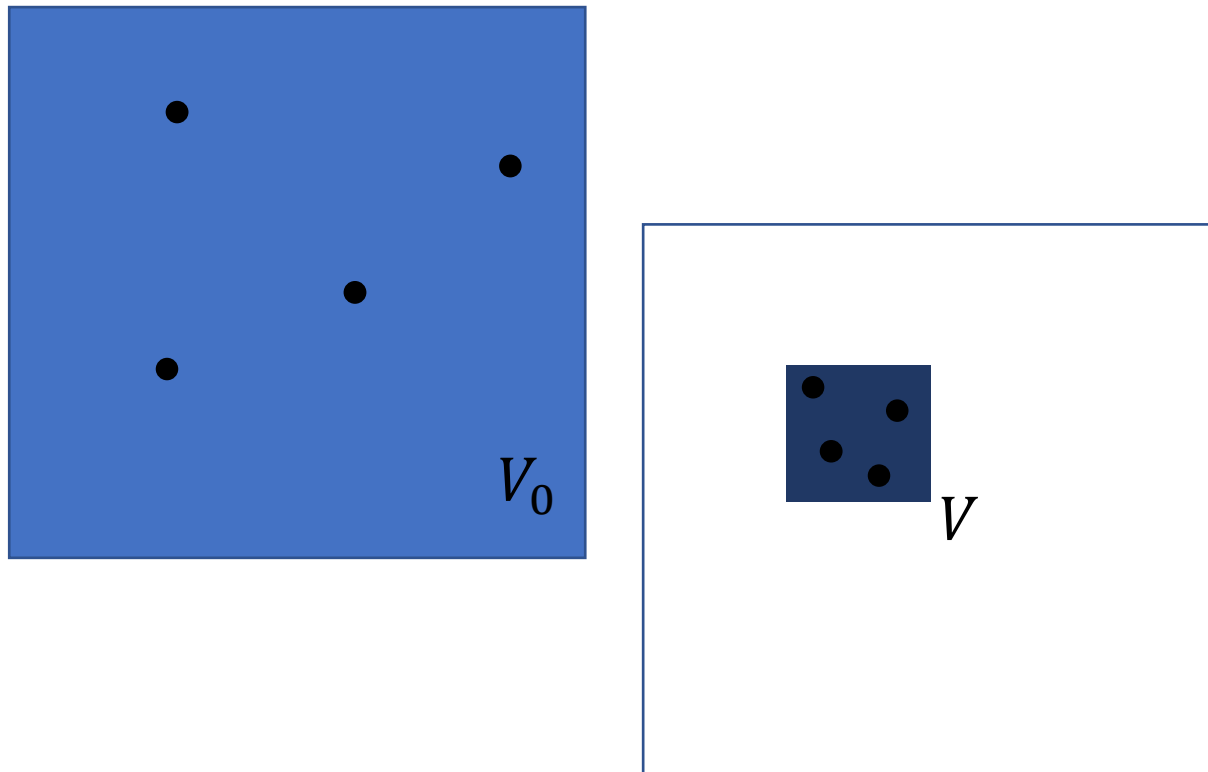
Začetna ugotovitev:

4. Iz Wienovega zakona (zavestno ne upošteva Planckovega popravka) in 1., 2. in 3. sledi

$$S = -\frac{U}{\beta\nu} \left(\ln \left(\frac{U}{V\alpha\nu^3 d\nu} \right) - 1 \right)$$

Fotoefekt (1905)

- Kaj se zgodi z entropijo, če se vsa energija zbere na manjšem volumnu V ?

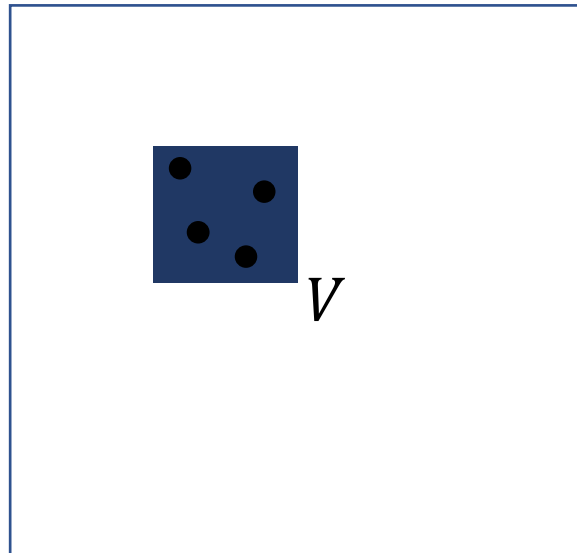
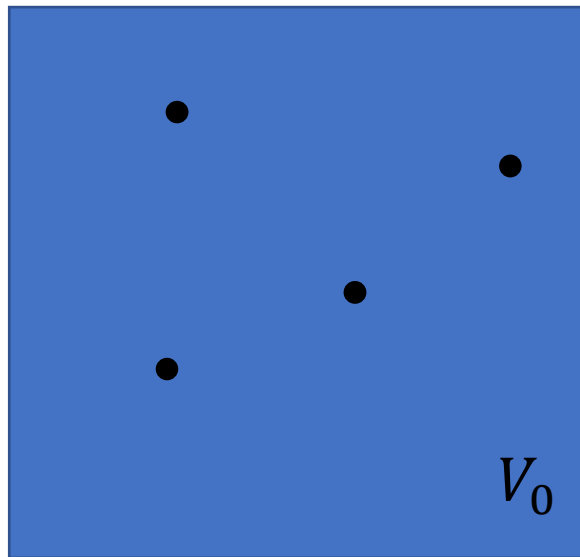


$$S = -\frac{U}{\beta v} \left(\ln \left(\frac{U}{V \alpha v^3 dv} \right) - 1 \right)$$

$$S - S_0 = \frac{U}{\beta v} \ln \left(\frac{V}{V_0} \right)$$

Fotoefekt (1905)

- Zveza je enaka zvezi za idealen plin.
- Od tod naprej upoštevamo koncepte idealnega plina.

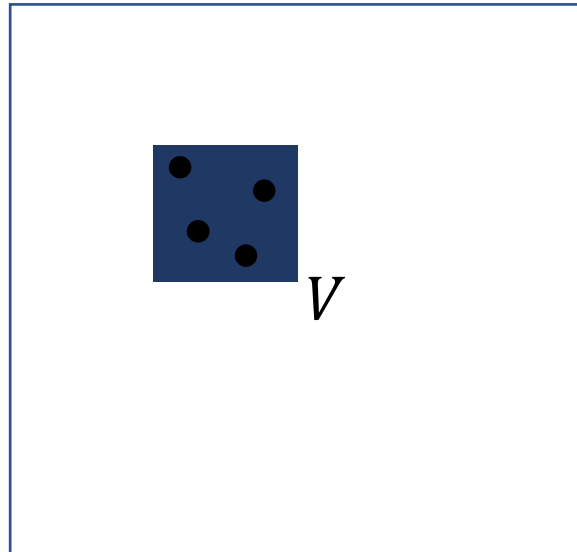
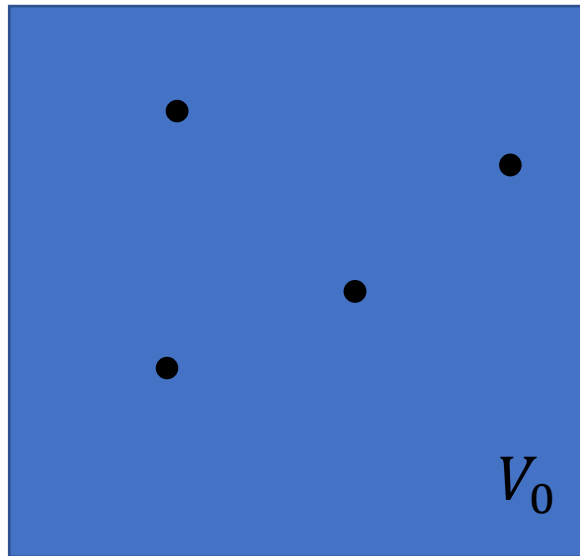


$$S - S_0 = \frac{U}{\beta \nu} \ln \left(\frac{V}{V_0} \right)$$

$$S - S_0 = N \frac{R}{N_A} \ln \left(\frac{V}{V_0} \right)$$

Fotoefekt (1905)

- Entropija je sorazmerna z verjetnostjo za stanje.



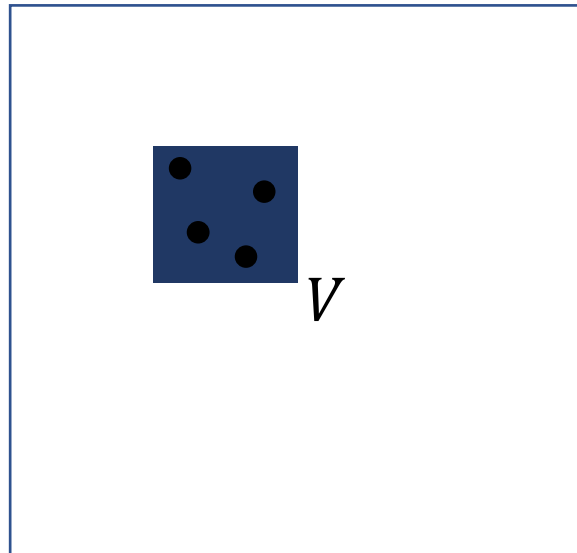
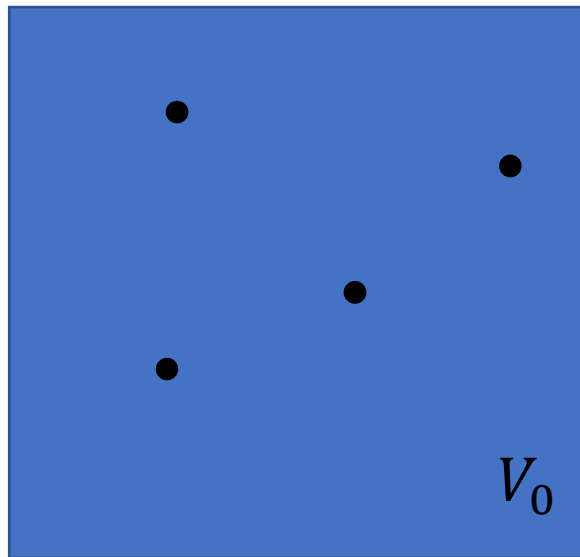
$$S - S_0 = \frac{U}{\beta \nu} \ln \left(\frac{V}{V_0} \right)$$

$$S - S_0 = N \frac{R}{N_A} \ln \left(\frac{V}{V_0} \right)$$

$$S - S_0 = \frac{R}{N_A} \ln \left(\frac{W}{W_0} \right)$$

Fotoefekt (1905)

- Kolikšna je verjetnost, da se vsi delci nahajajo na volumnu V ?



$$S - S_0 = \frac{U}{\beta v} \ln \left(\frac{V}{V_0} \right)$$

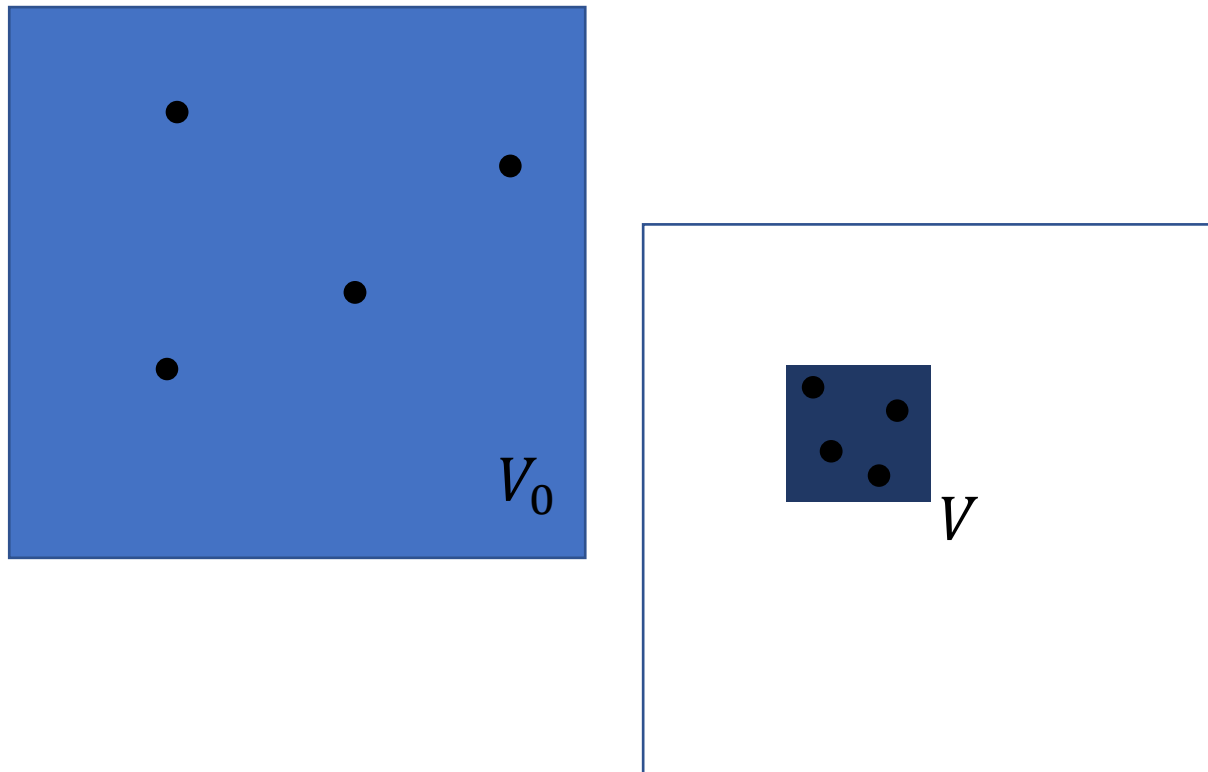
$$S - S_0 = N \frac{R}{N_A} \ln \left(\frac{V}{V_0} \right)$$

$$S - S_0 = \frac{R}{N_A} \ln \left(\frac{W}{W_0} \right)$$

$$\frac{W}{W_0} = \left(\frac{V}{V_0} \right)^n$$

Fotoefekt (1905)

- Izraza za entropijo plina in EMP se ujemata.



$$S - S_0 = \frac{U}{\beta\nu} \ln \left(\frac{V}{V_0} \right)$$

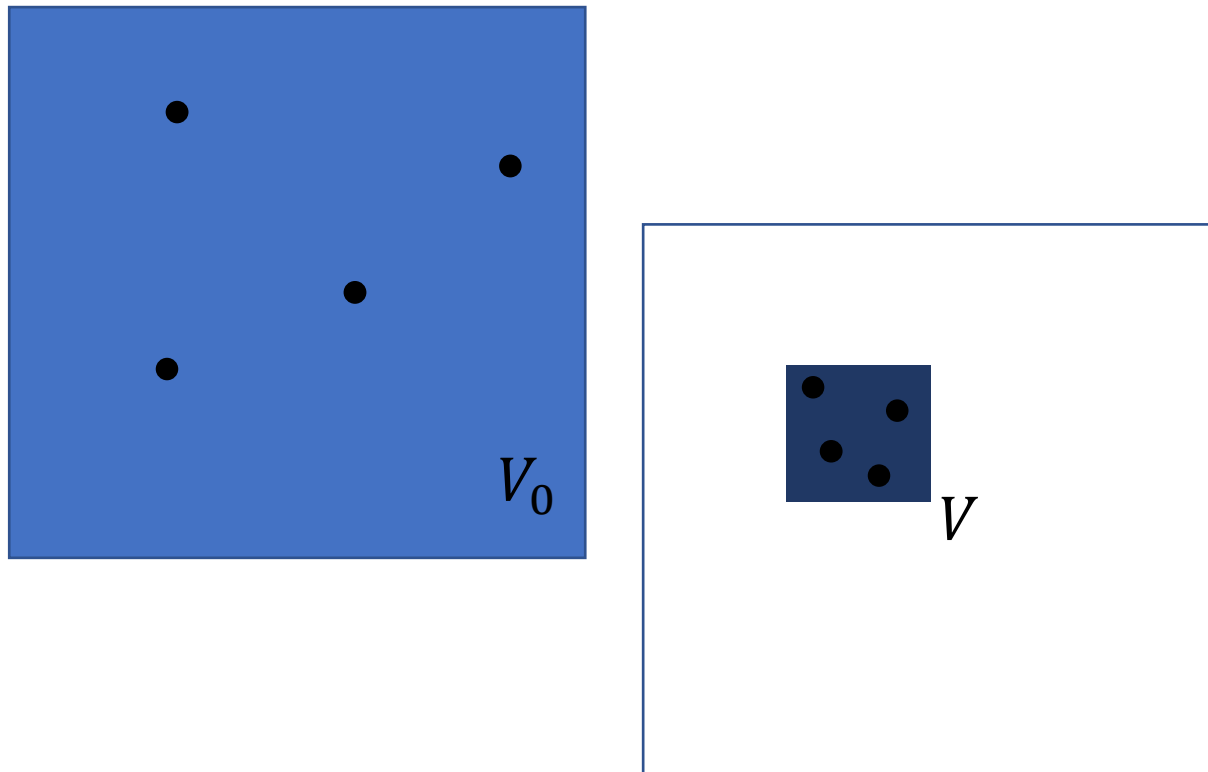
$$S - S_0 = N \frac{R}{N_A} \ln \left(\frac{V}{V_0} \right)$$

$$S - S_0 = \frac{R}{N_A} \ln \left(\frac{W}{W_0} \right)$$

$$S - S_0 = n \frac{R}{N_A} \ln \left(\frac{V}{V_0} \right)$$
$$\frac{W}{W_0} = \left(\frac{V}{V_0} \right)^n$$

Fotoefekt (1905)

- Po analogiji si lahko mislimo EMP sestavljeno iz kvantov, kjer ima vsak energijo...[na desni]



$$S - S_0 = \frac{U}{\beta v} \ln \left(\frac{V}{V_0} \right)$$

$$S - S_0 = N \frac{R}{N_A} \ln \left(\frac{V}{V_0} \right)$$

$$S - S_0 = \frac{R}{N_A} \ln \left(\frac{W}{W_0} \right)$$

$$S - S_0 = n \frac{R}{N_A} \ln \left(\frac{V}{V_0} \right)$$

$$\frac{W}{W_0} = \left(\frac{V}{V_0} \right)^n$$

$$U = n \left(\frac{R}{N_A} \beta v \right)$$

Fotoefekt (1905)

Ugotovitve:

5. fotoni so nekaj ekvivalentnega molekulam idealnega plina, kjer ima vsak energijo $h\nu$.
6. Ničesar ne rabimo vedeti o njihovih zakonih gibanja.
7. Velja samo, če velja Wienov zakon in je fotonov dovolj malo, da ne interagirajo.

Fotoefekt (1905)

Ugotovitve:

5. fotoni so nekaj ekvivalentnega molekulam idealnega plina, kjer ima vsak energijo $h\nu$.
6. Ničesar ne rabimo vedeti o njihovih zakonih gibanja.
7. Velja samo, če velja Wienov zakon in je fotonov dovolj malo, da ne interagirajo.

Sledi:

8. Pojasni fotoefekt.
9. Pojasni fluorescenco.
10. Pojasni ionizacijo.
11. Dopušča možnost za interakcijo več fotonov hkrati, če je njihova gostota dovolj velika.

Kaj je foton?

	Fotoefekt
Paket energije v EMV Kvant svetlobe	
Delec svetlobe	
Valovni paket	
Dualnost	

Kaj je foton?

	Fotoefekt
Paket energije v EMV Kvant svetlobe	Da
Delec svetlobe	
Valovni paket	
Dualnost	

Kaj je foton?

	Fotoefekt
Paket energije v EMV Kvant svetlobe	Da
Delec svetlobe	Nekaj takega
Valovni paket	
Dualnost	

Kaj je foton?

	Fotoefekt
Paket energije v EMV Kvant svetlobe	Da
Delec svetlobe	Nekaj takega
Valovni paket	/
Dualnost	

Kaj je foton?

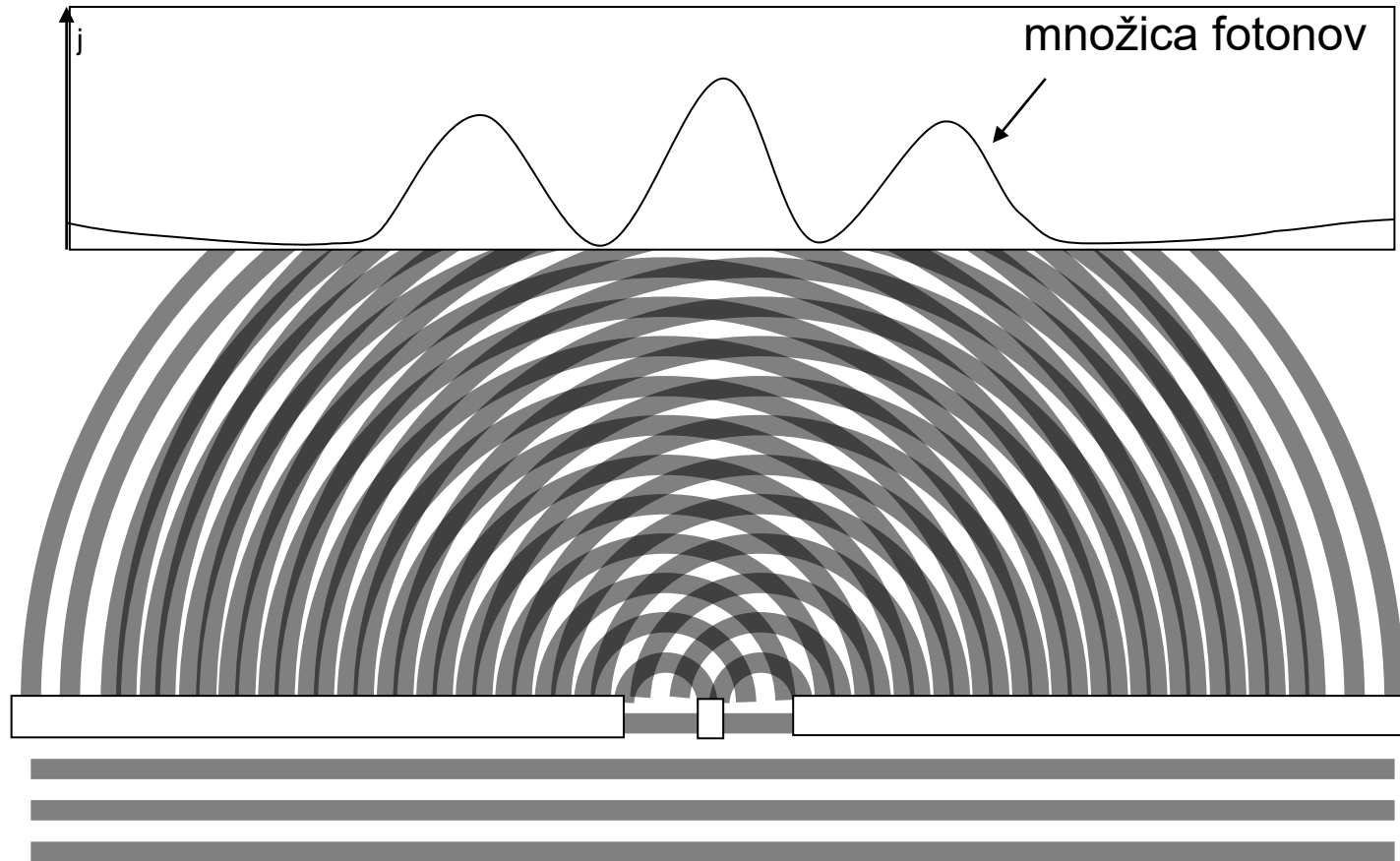
	Fotoefekt
Paket energije v EMV Kvant svetlobe	Da
Delec svetlobe	Nekaj takega
Valovni paket	/
Dualnost	Mogoče?

Dvojna reža s šibko svetlobo (1909)

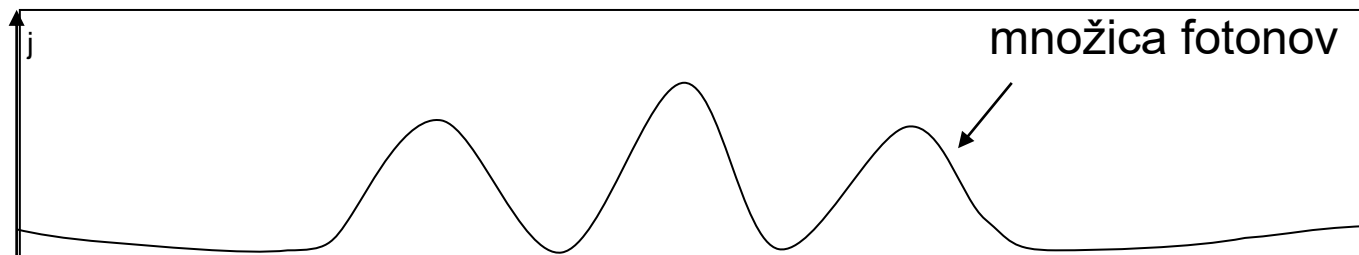
Taylor (1909). Interference fringes with feeble light.

https://www.damtp.cam.ac.uk/user/gold/pdfs/teaching/old_literature/Taylor1909.pdf

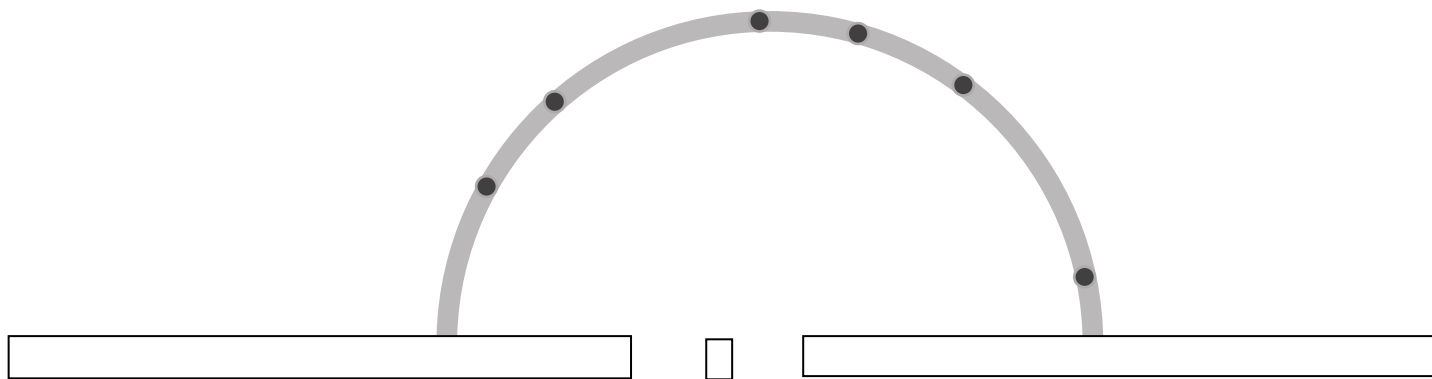
Dvojna reža s šibko svetlobo (1909)



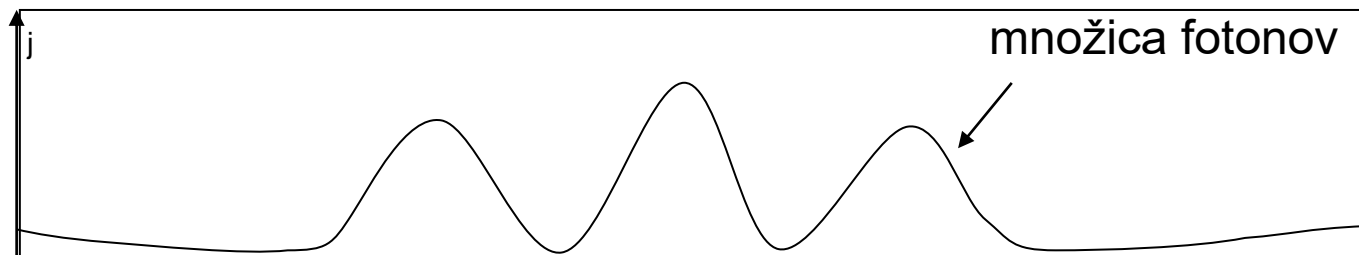
Dvojna reža s šibko svetlobo (1909)



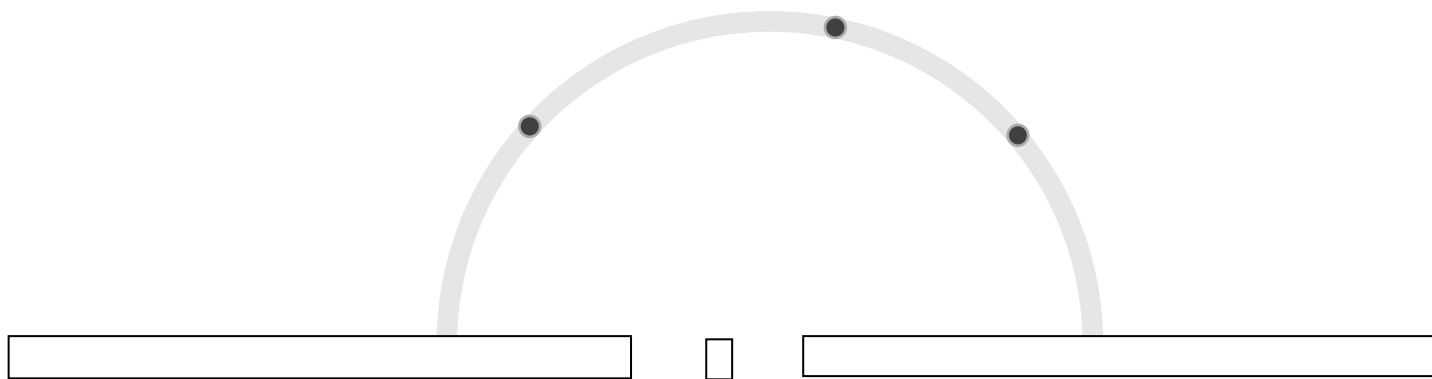
- Energija je v valovni fronti v paketih, med katerimi je prazen prostor (J. J. Thomson, 1907).



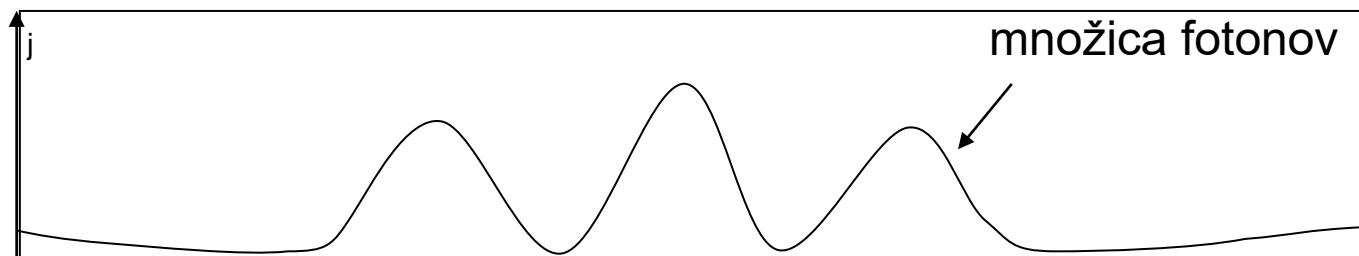
Dvojna reža s šibko svetlobo (1909)



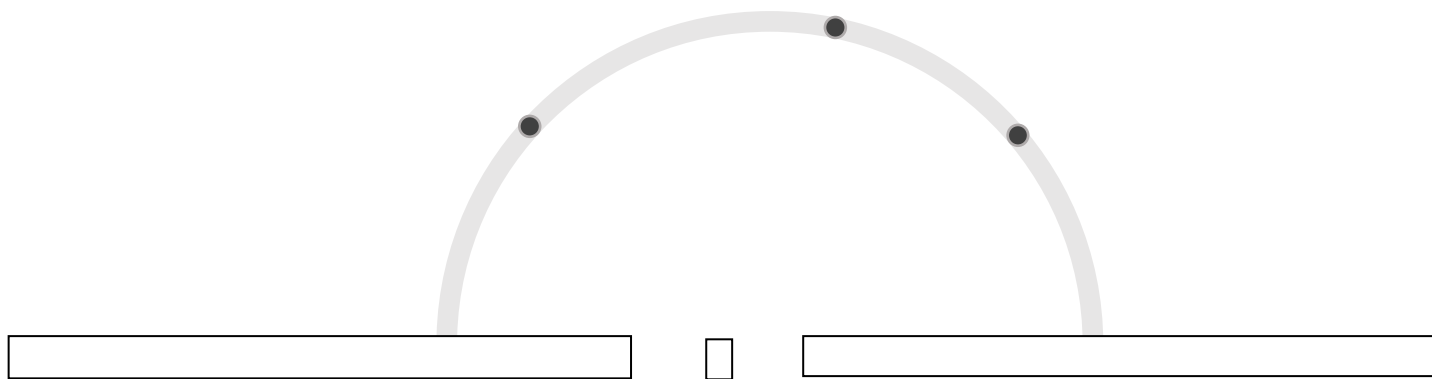
- Energija je v valovni fronti v paketih, med katerimi je prazen prostor (J. J. Thomson, 1907).
- Šibkejša svetloba pomeni več prostora med paketi.



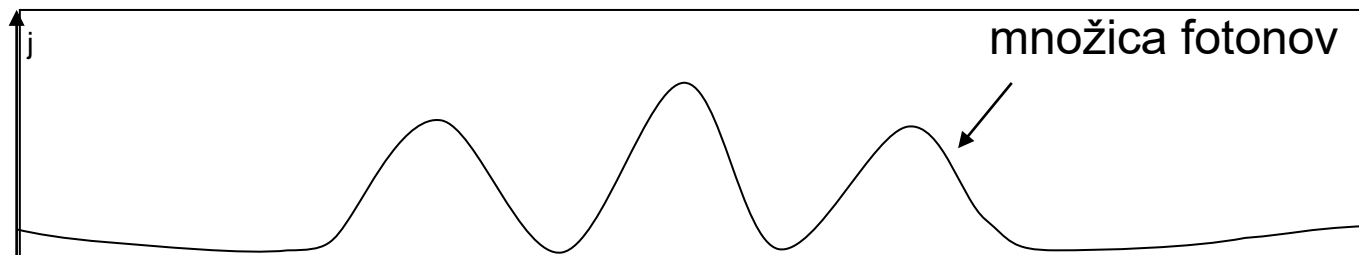
Dvojna reža s šibko svetlobo (1909)



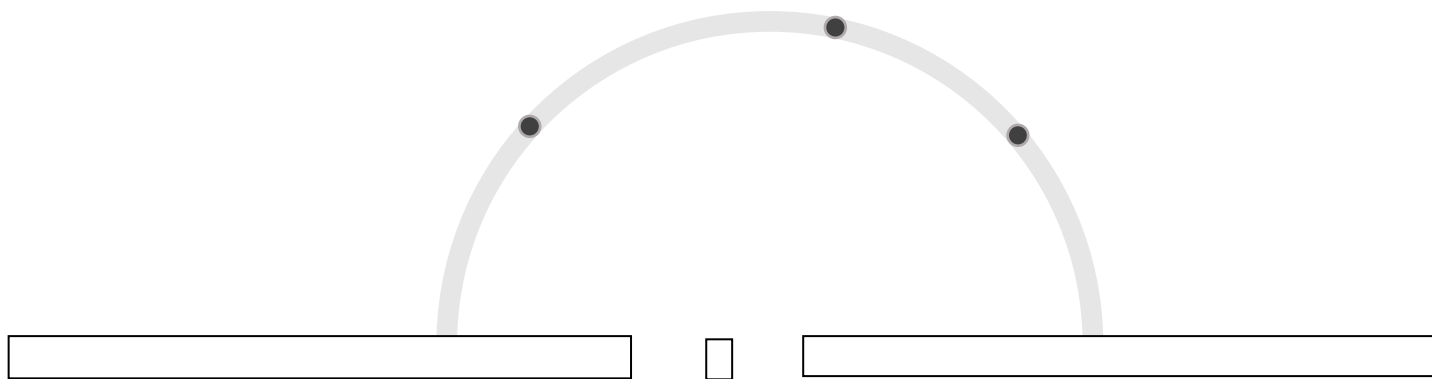
- Energija je v valovni fronti v paketih, med katerimi je prazen prostor (J. J. Thomson, 1907).
- Šibkejša svetloba pomeni več prostora med paketi.
- Taylor zmanjša svetlobo do 1 fotona na cm^3 . Zajema 2000 ur (3 mesece).



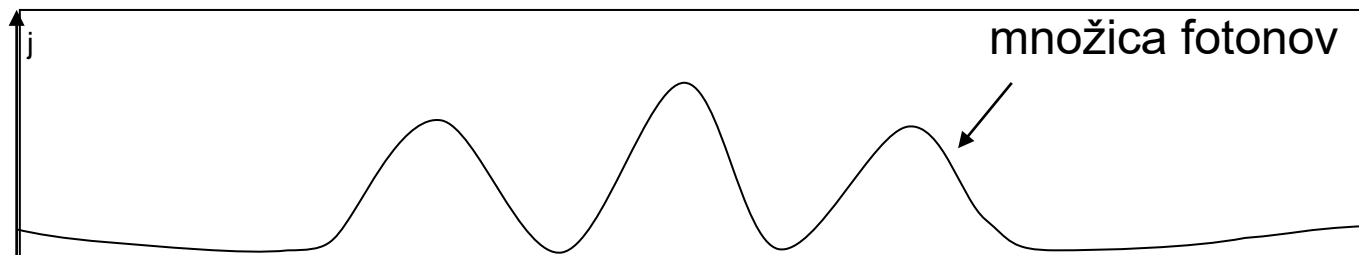
Dvojna reža s šibko svetlobo (1909)



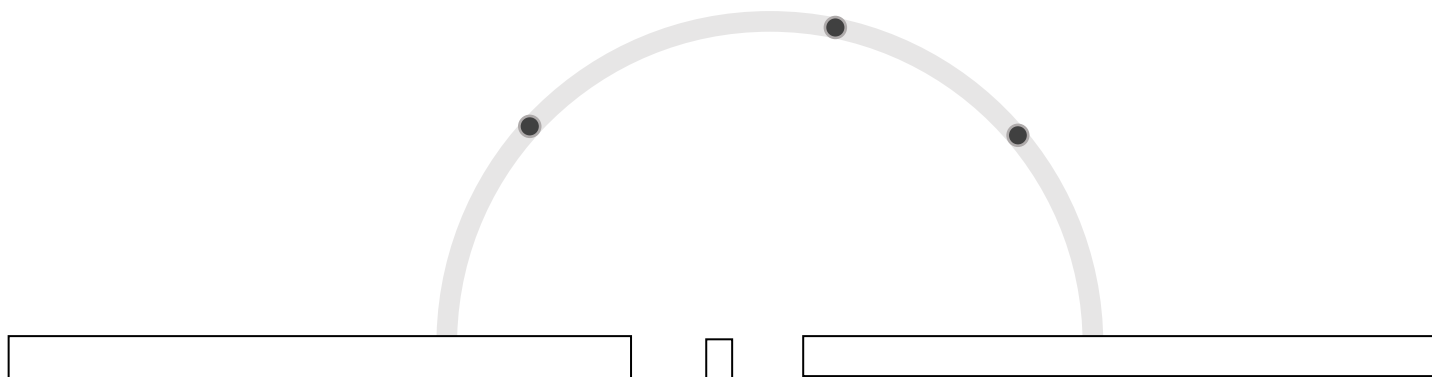
- Energija je v valovni fronti v paketih, med katerimi je prazen prostor (J. J. Thomson, 1907).
- Šibkejša svetloba pomeni več prostora med paketi.
- Taylor zmanjša svetlobo do 1 fotona na cm^3 . Zajema 2000 ur (3 mesece).
- Ne zajema posemeznih fotonov...



Dvojna reža s šibko svetlobo (1909)



- Energija je v valovni fronti v paketih, med katerimi je prazen prostor (J. J. Thomson, 1907).
- Šibkejša svetloba pomeni več prostora med paketi.
- Taylor zmanjša svetlobo do 1 fotona na cm^3 . Zajema 2000 ur (3 mesece).
- Ne zajema posemeznih fotonov...



Foton je količina energije zgoščena na volumnu ΔV .

Kaj je foton?

	Fotoefekt	Dvojna reža
Paket energije v EMV Kvant svetlobe	Da	
Delec svetlobe	Nekaj takega	
Valovni paket	/	
Dualnost	Mogoče?	

Kaj je foton?

	Fotoefekt	Dvojna reža
Paket energije v EMV Kvant svetlobe	Da	Da
Delec svetlobe	Nekaj takega	
Valovni paket	/	
Dualnost	Mogoče?	

Kaj je foton?

	Fotoefekt	Dvojna reža
Paket energije v EMV Kvant svetlobe	Da	Da
Delec svetlobe	Nekaj takega	/
Valovni paket	/	
Dualnost	Mogoče?	

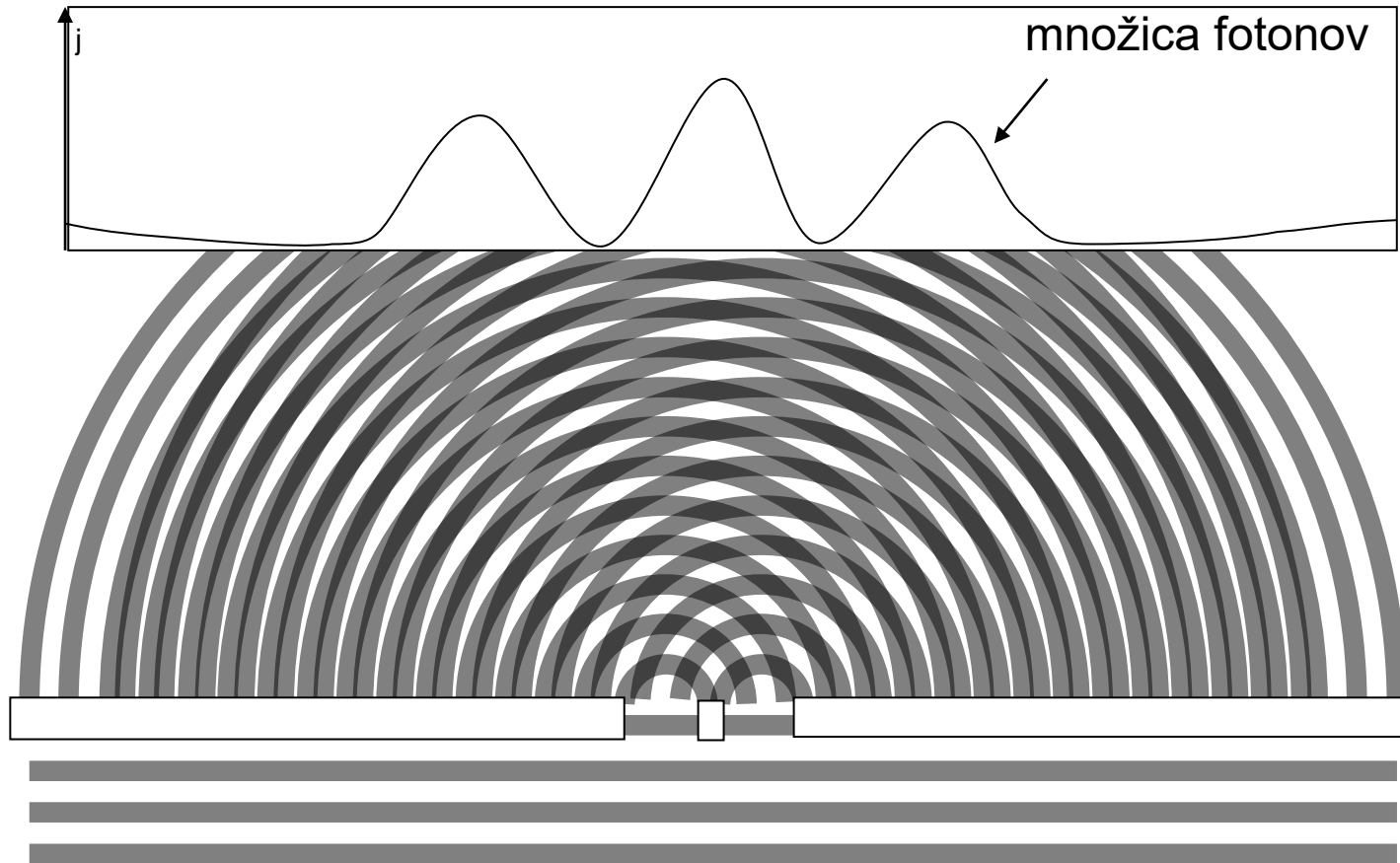
Kaj je foton?

	Fotoefekt	Dvojna reža
Paket energije v EMV Kvant svetlobe	Da	Da
Delec svetlobe	Nekaj takega	/
Valovni paket	/	/
Dualnost	Mogoče?	

Kaj je foton?

	Fotoefekt	Dvojna reža
Paket energije v EMV Kvant svetlobe	Da	Da
Delec svetlobe	Nekaj takega	/
Valovni paket	/	/
Dualnost	Mogoče?	Mogoče?

Valovna funkcija fotona?



Bialynicki-Birula (1996). Photon Wave Function, *Progress in Optics* **36**, 245.

[https://doi.org/10.1016/S0079-6638\(08\)70316-0](https://doi.org/10.1016/S0079-6638(08)70316-0)

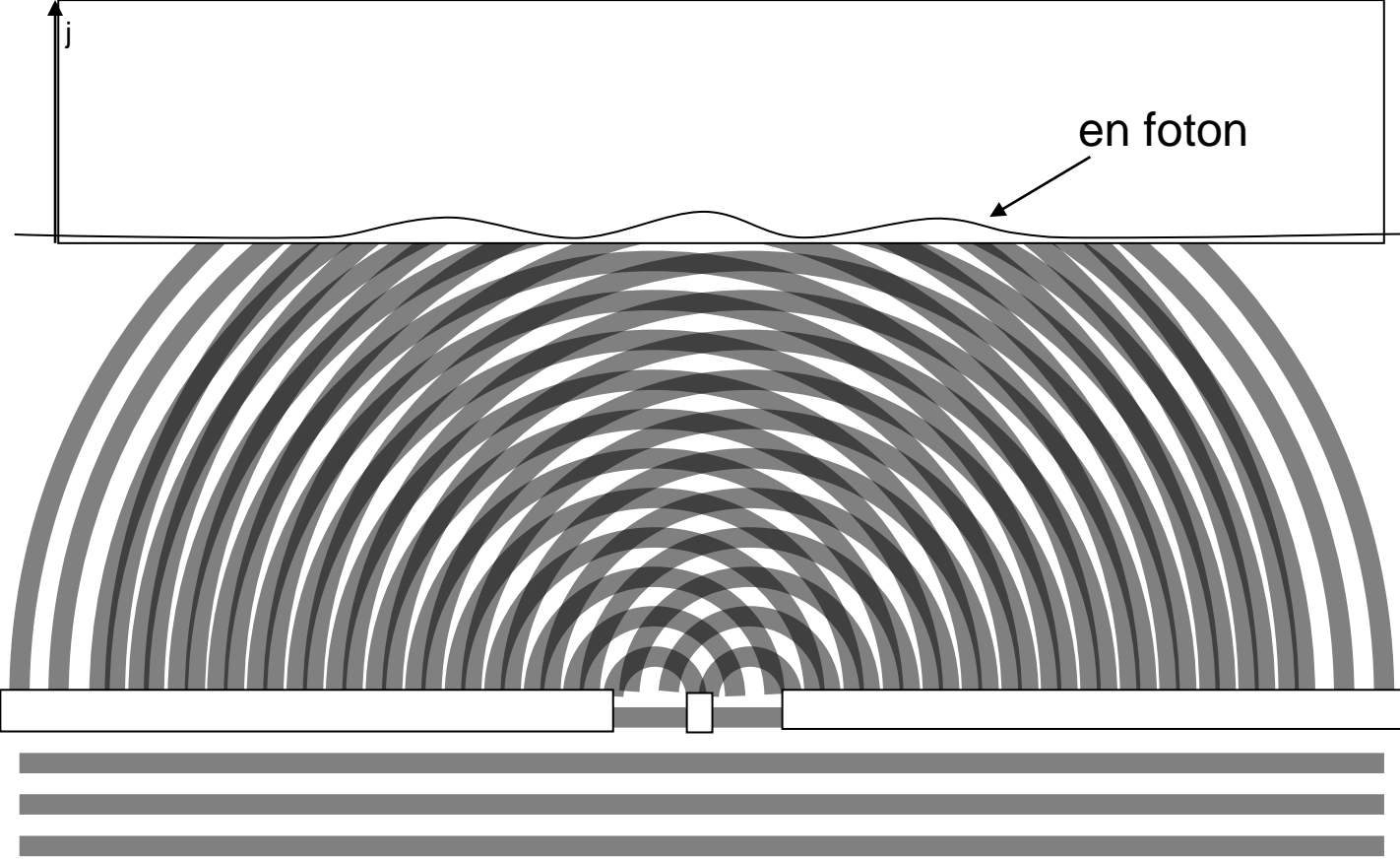
Chandrasekar (2012). Quantum Mechanics of Photons, *Adv. Studies Theor. Phys.* **6**, 391.

<https://www.m-hikari.com/astp/astp2012/astp5-8-2012/chandrasekarASTP5-8-2012.pdf>

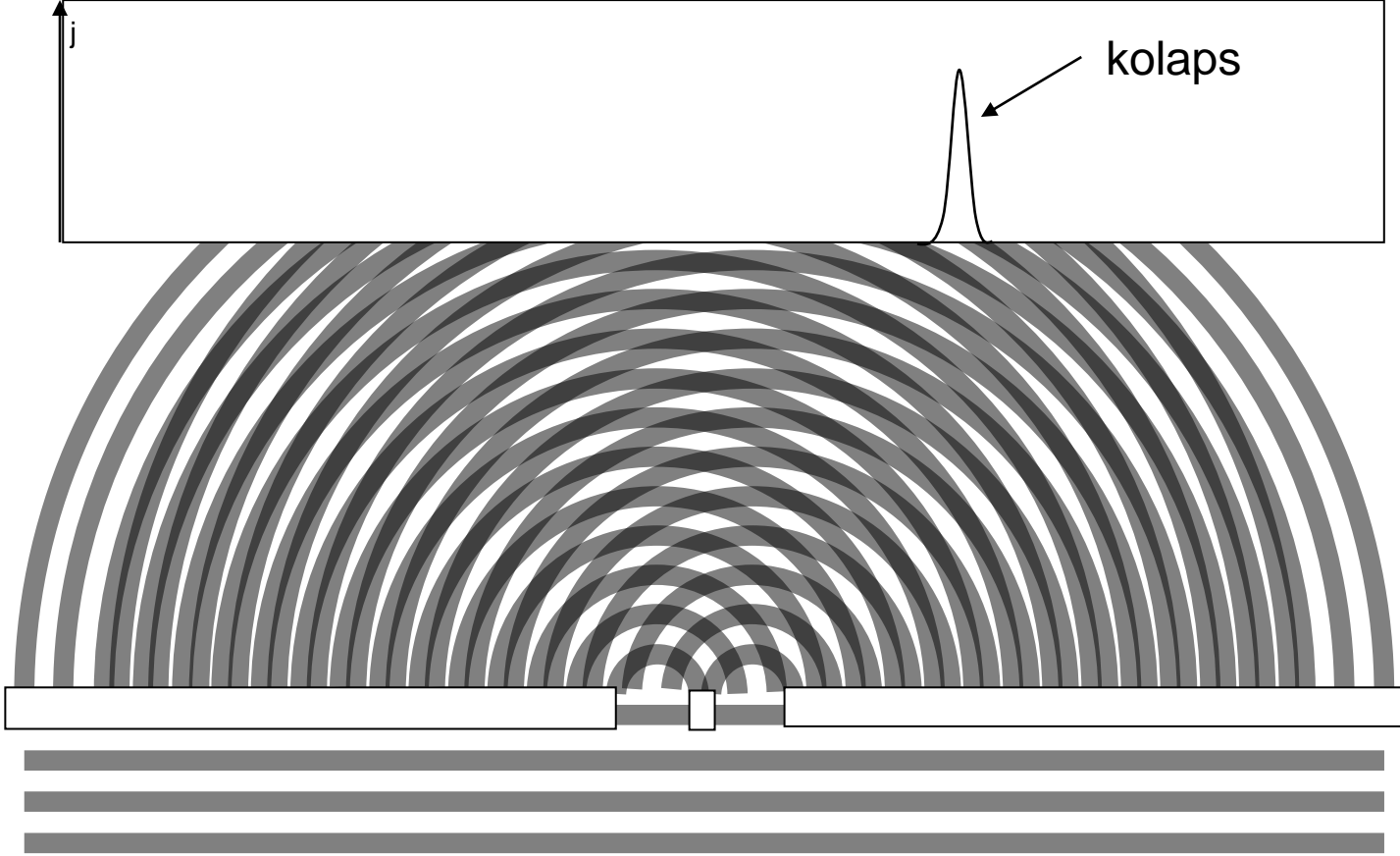
Smith, Raymer (2007). Photon wave functions, wave-packet quantization of light, and coherence theory, *New J. Phys.* **9**, 414.

<https://doi.org/10.1088/1367-2630/9/11/414>

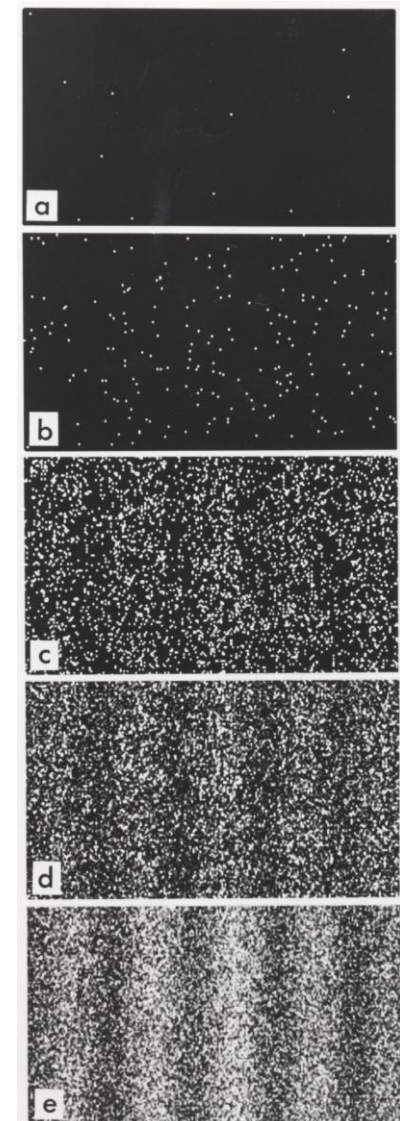
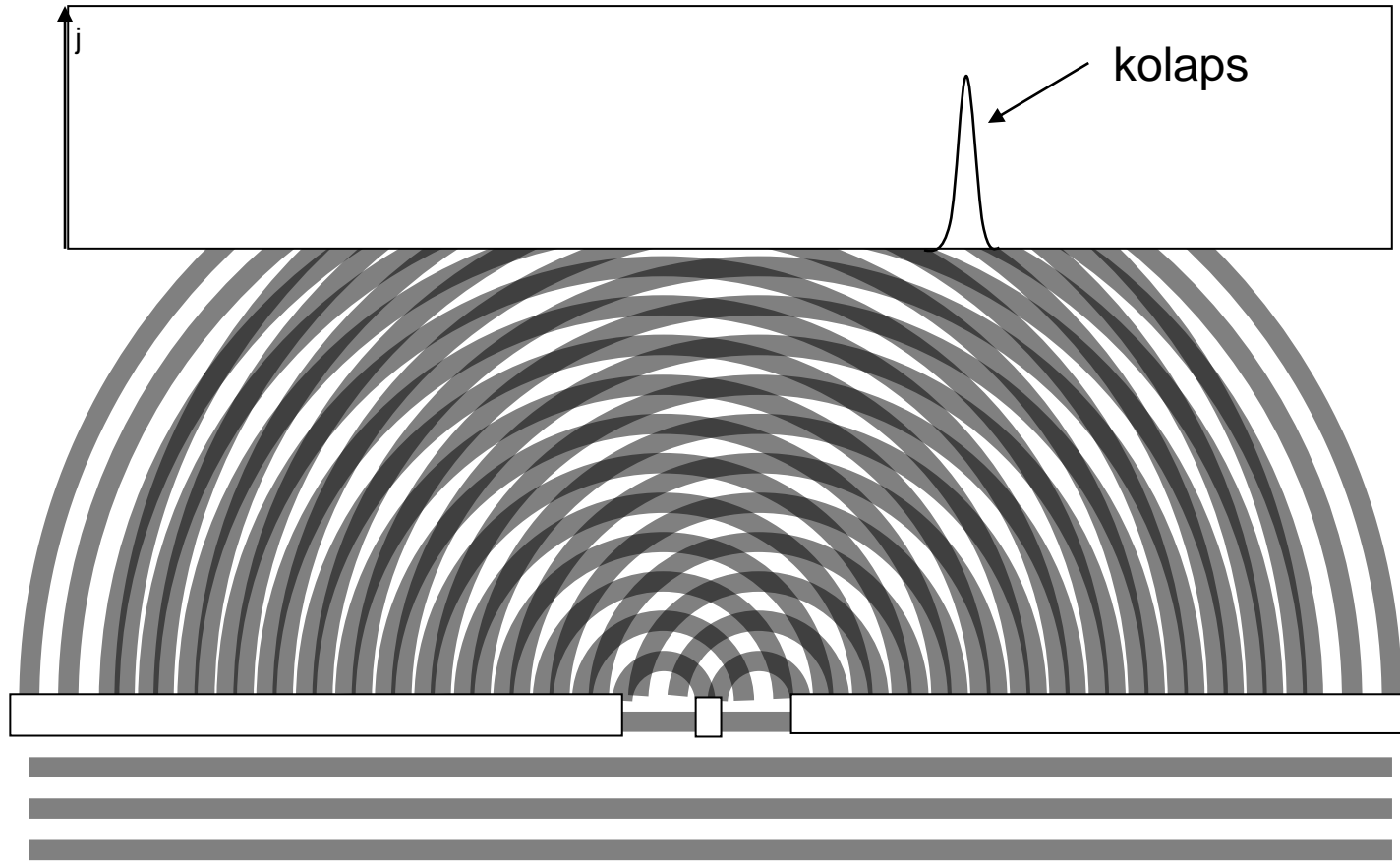
Valovna funkcija fotona?



Valovna funkcija fotona?



Valovna funkcija fotona?



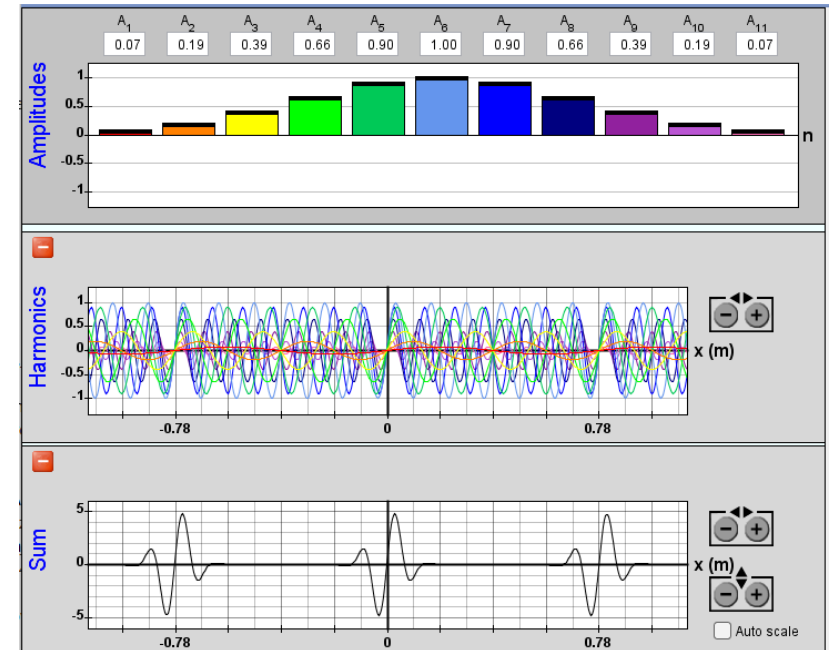
Valovna funkcija fotona?

Valovna funkcija enega fotona je problem, ker foton nima antidelcev, zato manjkajo funkcije z negativnimi ν . Kljub temu se da smiselno zapisati:

$$\vec{F}(\vec{r}, t) = \frac{\vec{D}(\vec{r}, t)}{\sqrt{2\epsilon_0}} + i \frac{\vec{B}(\vec{r}, t)}{\sqrt{2\mu_0}}$$

Iz tega kompleksnega vektorja tvorimo valovno funkcijo tako:

$$\Phi(\vec{r}, t) = \begin{bmatrix} \frac{\vec{D}(\vec{r}, t)}{\sqrt{2\epsilon_0}} + i \frac{\vec{B}(\vec{r}, t)}{\sqrt{2\mu_0}} \\ \frac{\vec{D}(\vec{r}, t)}{\sqrt{2\epsilon_0}} - i \frac{\vec{B}(\vec{r}, t)}{\sqrt{2\mu_0}} \end{bmatrix}$$



<https://phet.colorado.edu/en/simulations/fourier-making-waves>

Valovna funkcija fotona?

Enačba za lastne vrednosti

$$c \left(\vec{s} \frac{h}{2\pi i} \nabla \right) \vec{F}(\vec{r}) = h\nu \vec{F}(\vec{r})$$

Lastne vrednosti so energije $h\nu$.

Gostota verjetnosti za nahajanje fotona ima integral, kar pomeni, da **ni lokalizirana**. Različne lokacije prispevajo k vrednosti za eno lokacijo.

$$\rho(\vec{r}, t) = \psi^*(\vec{r}, t)\psi(\vec{r}, t) \qquad \rho(\vec{r}, t) = \int \dots \Phi^*(\vec{r}, t)\Phi(\vec{r}, t)$$

Nasprotno je izraz za gostoto energije brez integrala, kot bi pričakovali za gostoto verjetnosti. Zato lahko vpeljemo **verjetnost za nahajanje energije fotona** na področju ΔV .

$$p_E(\Delta V) = \frac{1}{\langle E \rangle} \int_{\Delta V} d^3r \Phi^*(\vec{r})\Phi(\vec{r})$$
$$\rho_E(\vec{r}, t) = \frac{1}{\langle E \rangle} \Phi^*(\vec{r}, t)\Phi(\vec{r}, t)$$

Kaj je foton?

	Fotoefekt	Dvojna reža
Paket energije v EMV Kvant svetlobe	Da	Da
Delec svetlobe	Nekaj takega	/
Valovni paket	/	/
Dualnost	Mogoče?	Mogoče?

Kaj je foton?

	Fotoefekt	Dvojna reža
Paket energije v EMV Kvant svetlobe	Da	Da
Delec svetlobe	Nekaj takega	Niti ne
Valovni paket	/	/
Dualnost	Mogoče?	Mogoče?

Kaj je foton?

	Fotoefekt	Dvojna reža
Paket energije v EMV Kvant svetlobe	Da	Da
Delec svetlobe	Nekaj takega	Niti ne
Valovni paket	/	Omejena valovna funkcija
Dualnost	Mogoče?	Mogoče?

Kvantna elektrodinamika (1927, 1940-a)

Dirac (1927). The quantum theory of the emission and absorption of radiation, *Proc. R. Soc. Lond. A* **114**, 243.

<https://doi.org/10.1098/rspa.1927.0039>

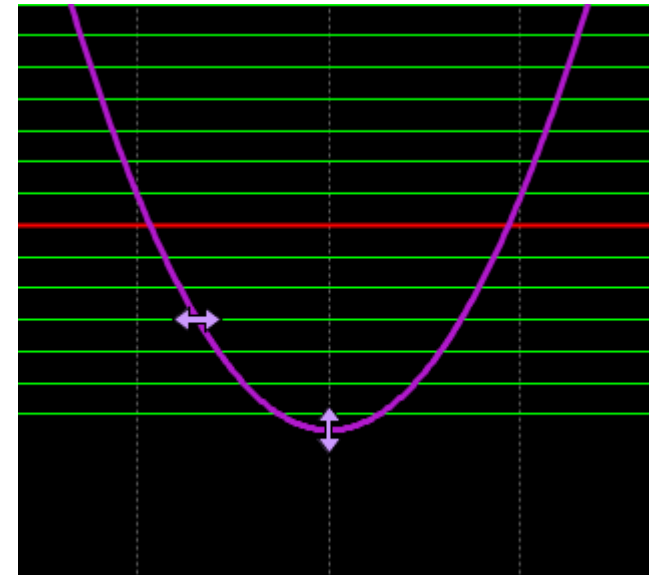
Šunjić (2002). Kvantna fizika mnoštva častica. Zagreb: Školska knjiga.

Kvantna elektrodinamika (1927, 1940-a)

Vrnimo se nazaj na ideje Plancka in Einsteina.

Snov opišemo z nihali:

$$H = \frac{mv^2}{2} + \frac{Kx^2}{2}; \quad (2\pi\nu)^2 = \frac{K}{m}; \quad p = mv$$
$$\hat{H} = \frac{1}{2m}\hat{p}^2 + \frac{m}{2}(2\pi\nu)^2\hat{x}^2$$



<https://phet.colorado.edu/en/simulations/bound-states>

Kvantna elektrodinamika (1927, 1940-a)

Vrnimo se nazaj na ideje Plancka in Einsteina.

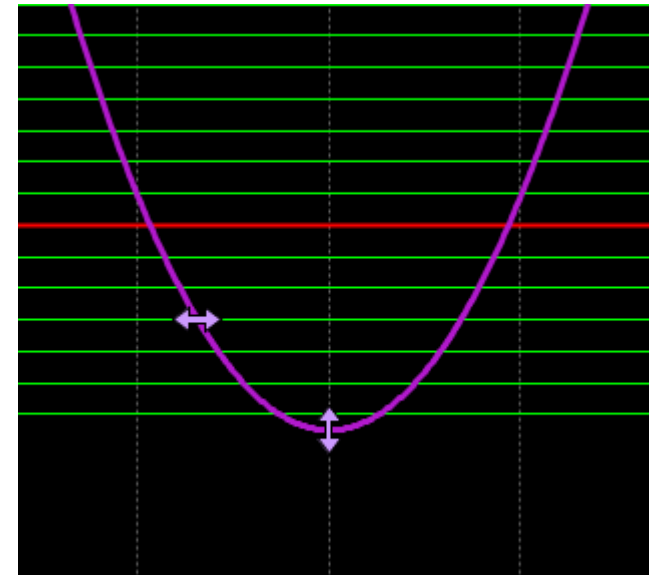
Snov opišemo z nihali:

$$H = \frac{mv^2}{2} + \frac{Kx^2}{2}; \quad (2\pi\nu)^2 = \frac{K}{m}; \quad p = mv$$
$$\hat{H} = \frac{1}{2m}\hat{p}^2 + \frac{m}{2}(2\pi\nu)^2\hat{x}^2$$

Vemo za rešitve stacionarne Schrödingerjeve enačbe in za vrednosti lastnih energij:

$$\hat{H}|\psi_n\rangle = E_n|\psi_n\rangle$$

$$E_n = h\nu\left(n + \frac{1}{2}\right); \quad E_n = E_{n-1} + h\nu; \quad E_0 = \frac{1}{2}h\nu$$



Kvantna elektrodinamika (1927, 1940-a)

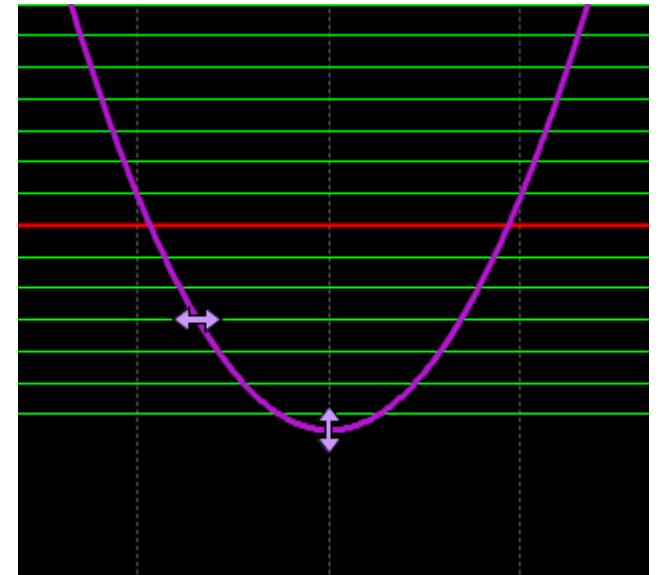
Vpeljemo nove, zvito premišljene operatorje...

$$\hat{H} = \frac{1}{2m} \hat{p}^2 + \frac{m}{2} (2\pi\nu)^2 \hat{x}^2$$

$$\hat{a} = \sqrt{\frac{m}{2h\nu}} (2\pi\nu) \hat{x} + i \sqrt{\frac{1}{2m h \nu}} \hat{p}$$

$$\hat{a}^+ = \sqrt{\frac{m}{2h\nu}} (2\pi\nu) \hat{x} - i \sqrt{\frac{1}{2m h \nu}} \hat{p}$$

$$\hat{H} = h\nu \left(\hat{a}^+ \hat{a} + \frac{1}{2} \right)$$



Kvantna elektrodinamika (1927, 1940-a)

Vpeljemo nove, zvito premišljene operatorje...

$$\hat{H} = \frac{1}{2m} \hat{p}^2 + \frac{m}{2} (2\pi\nu)^2 \hat{x}^2$$

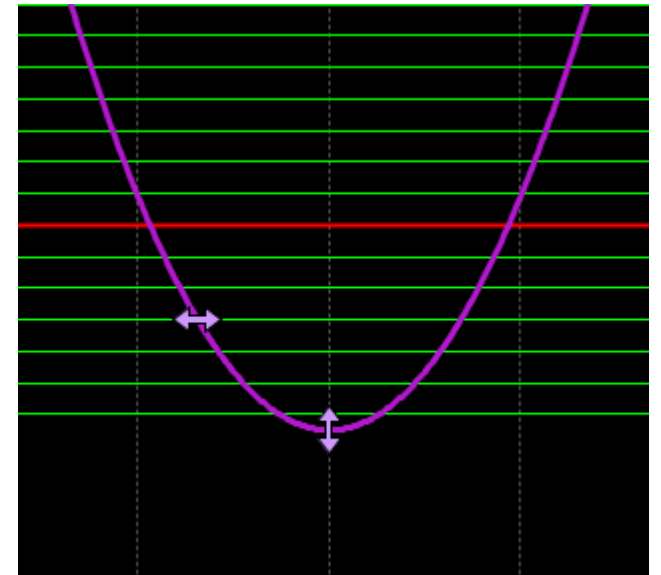
$$\hat{a} = \sqrt{\frac{m}{2h\nu}} (2\pi\nu) \hat{x} + i \sqrt{\frac{1}{2mh\nu}} \hat{p}$$

$$\hat{a}^+ = \sqrt{\frac{m}{2h\nu}} (2\pi\nu) \hat{x} - i \sqrt{\frac{1}{2mh\nu}} \hat{p}$$

$$\hat{H} = h\nu \left(\hat{a}^+ \hat{a} + \frac{1}{2} \right)$$

Spomnimo se lastnih energij:

$$E_n = h\nu \left(n + \frac{1}{2} \right)$$



Kvantna elektrodinamika (1927, 1940-a)

Vpeljemo nove, zvito premišljene operatorje...

$$\hat{H} = \frac{1}{2m} \hat{p}^2 + \frac{m}{2} (2\pi\nu)^2 \hat{x}^2$$

$$\hat{a} = \sqrt{\frac{m}{2h\nu}} (2\pi\nu) \hat{x} + i \sqrt{\frac{1}{2mh\nu}} \hat{p}$$

$$\hat{a}^+ = \sqrt{\frac{m}{2h\nu}} (2\pi\nu) \hat{x} - i \sqrt{\frac{1}{2mh\nu}} \hat{p}$$

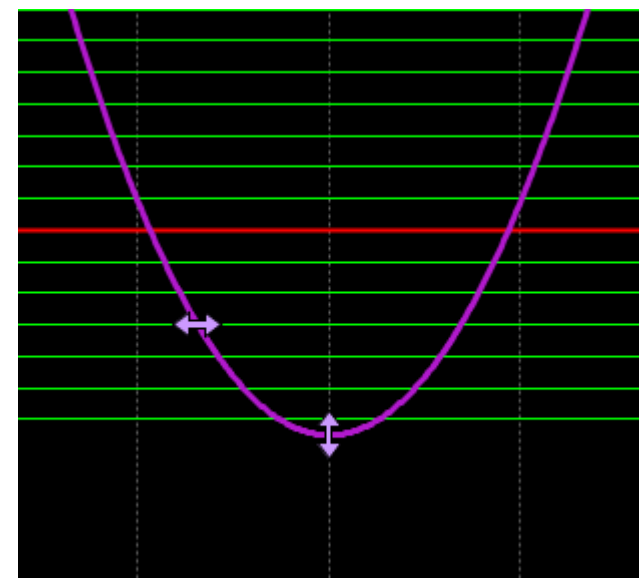
$$\hat{H} = h\nu \left(\hat{a}^+ \hat{a} + \frac{1}{2} \right)$$

Spomnimo se lastnih energij:

$$E_n = h\nu \left(n + \frac{1}{2} \right)$$

Iz primerjave sledi:

$$\hat{a}^+ \hat{a} |\psi_n\rangle = n |\psi_n\rangle$$

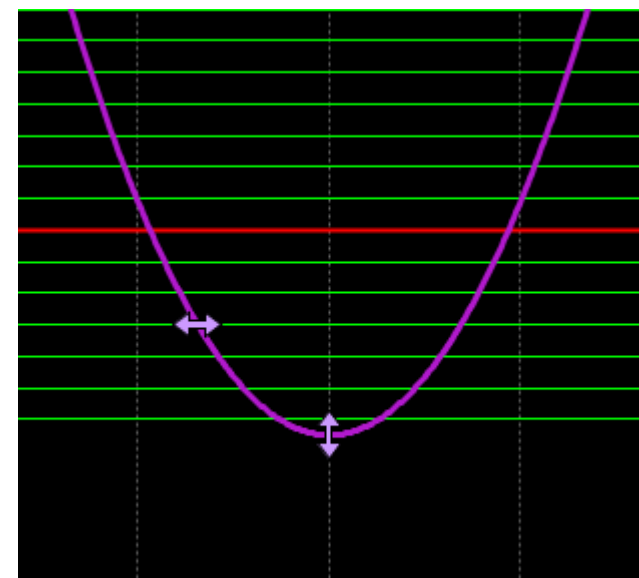


Kvantna elektrodinamika (1927, 1940-a)

Spodnjemu opratorju pravimo operator števila delcev...

$$\hat{a}^+ \hat{a} |\psi_n\rangle = n |\psi_n\rangle$$

Kaj so torej delci v tej sliki?



Kvantna elektrodinamika (1927, 1940-a)

Spodnjemu opratorju pravimo operator števila delcev...

$$\hat{a}^+ \hat{a} |\psi_n\rangle = n |\psi_n\rangle$$

Kaj so torej delci v tej sliki?

Poigrajmo se malo s tem izrazom

$$\hat{H} \hat{a}^+ |\psi_n\rangle = h\nu \left(\hat{a}^+ \hat{a} + \frac{1}{2} \right) \hat{a}^+ |\psi_n\rangle$$

Ko upoštevamo definicije \hat{a} in \hat{a}^+ , dobimo

$$\hat{H} \hat{a}^+ |\psi_n\rangle = (E_n + h\nu) \hat{a}^+ |\psi_n\rangle$$

$$\hat{H} \hat{a}^+ |\psi_n\rangle = (E_n + h\nu) \hat{a}^+ |\psi_n\rangle$$

$$\hat{H} \hat{a}^+ |\psi_n\rangle = E_{n+1} \hat{a}^+ |\psi_n\rangle$$

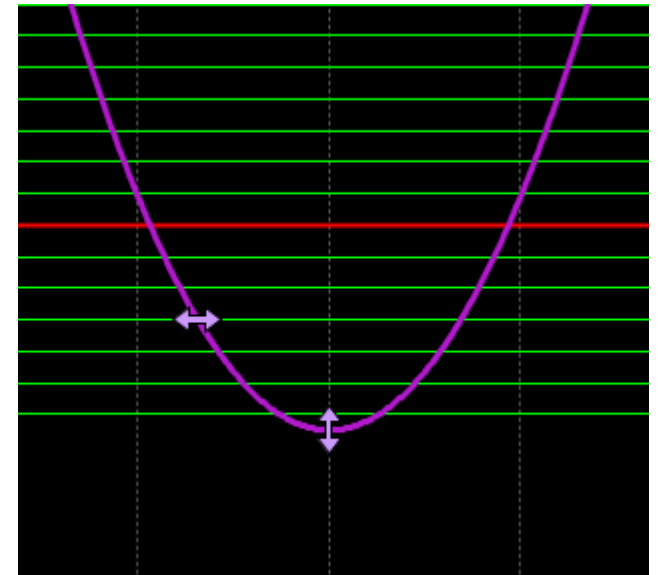
$$\hat{H} \hat{a}^+ |\psi_n\rangle = E_{n+1} \hat{a}^+ |\psi_n\rangle$$

$$\hat{H} \hat{a}'_n |\psi_{n+1}\rangle = E_{n+1} \hat{a}'_n |\psi_{n+1}\rangle$$

Dobimo pravilo za učinek operatorja \hat{a}^+ in s podobnim računom dobimo še pravilo za učinek operatorja \hat{a} :

$$\hat{a}^+ |\psi_n\rangle = \hat{a}'_n |\psi_{n+1}\rangle;$$

$$\hat{a} |\psi_n\rangle = \hat{a}_n |\psi_{n-1}\rangle$$



Kvantna elektrodinamika (1927, 1940-a)

Zdaj imamo tri nove, zanimive operatorje (faktorje določimo z normalizacijo):

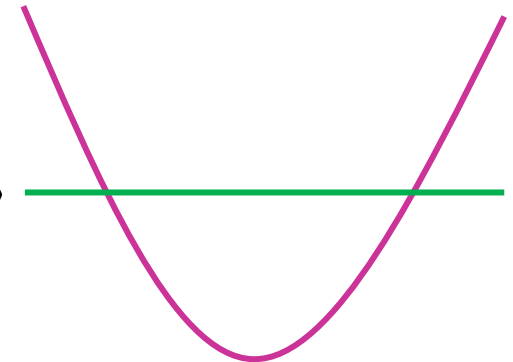
Operator števila delcev:

$$\hat{a}^+ \hat{a} |\psi_n\rangle = n |\psi_n\rangle$$

$$\hat{a}^+ \hat{a} |4\rangle = 4 |4\rangle$$



Običajno zapisujemo
kar $|\psi_n\rangle = |n\rangle$.



Kvantna elektrodinamika (1927, 1940-a)

Zdaj imamo tri nove, zanimive operatorje (faktorje določimo z normalizacijo):

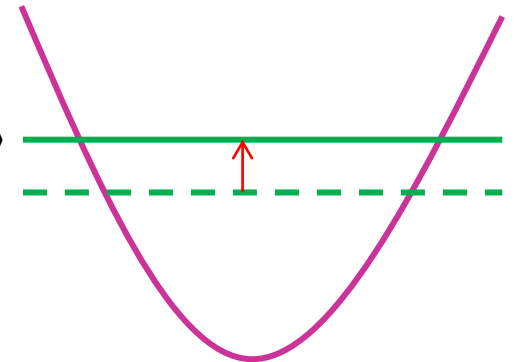
Operator števila delcev:

$$\hat{a}^+ \hat{a} |\psi_n\rangle = n |\psi_n\rangle$$

Operator ustvarjanja (delcev):

$$\hat{a}^+ |\psi_n\rangle = \sqrt{n+1} |\psi_{n+1}\rangle$$

$$\hat{a}^+ |4\rangle = \sqrt{5} |5\rangle$$



Kvantna elektrodinamika (1927, 1940-a)

Zdaj imamo tri nove, zanimive operatorje (faktorje določimo z normalizacijo):

Operator števila delcev:

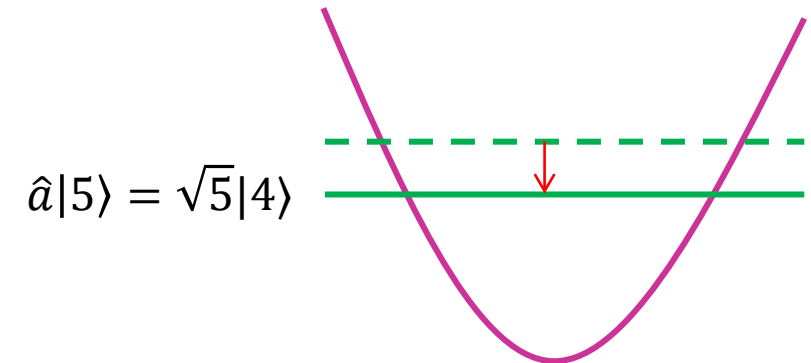
$$\hat{a}^+ \hat{a} |\psi_n\rangle = n |\psi_n\rangle$$

Operator ustvarjanja (delcev):

$$\hat{a}^+ |\psi_n\rangle = \sqrt{n+1} |\psi_{n+1}\rangle$$

Operator uničenja (delcev):

$$\hat{a} |\psi_n\rangle = \sqrt{n} |\psi_{n-1}\rangle$$



Kvantna elektrodinamika (1927, 1940-a)

Zdaj imamo tri nove, zanimive operatorje (faktorje določimo z normalizacijo):

Operator števila delcev:

$$\hat{a}^+ \hat{a} |\psi_n\rangle = n |\psi_n\rangle$$

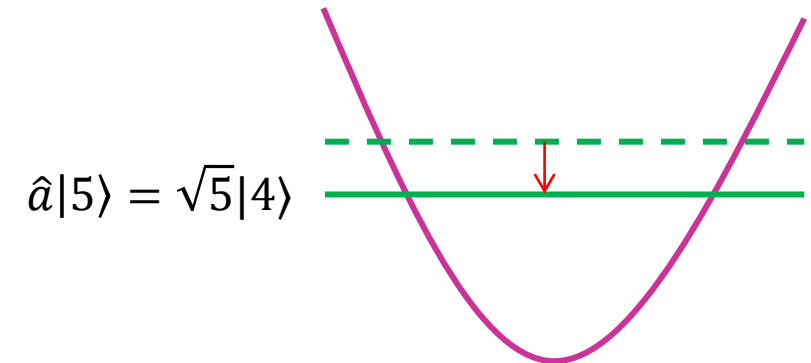
Operator ustvarjanja (delcev):

$$\hat{a}^+ |\psi_n\rangle = \sqrt{n+1} |\psi_{n+1}\rangle$$

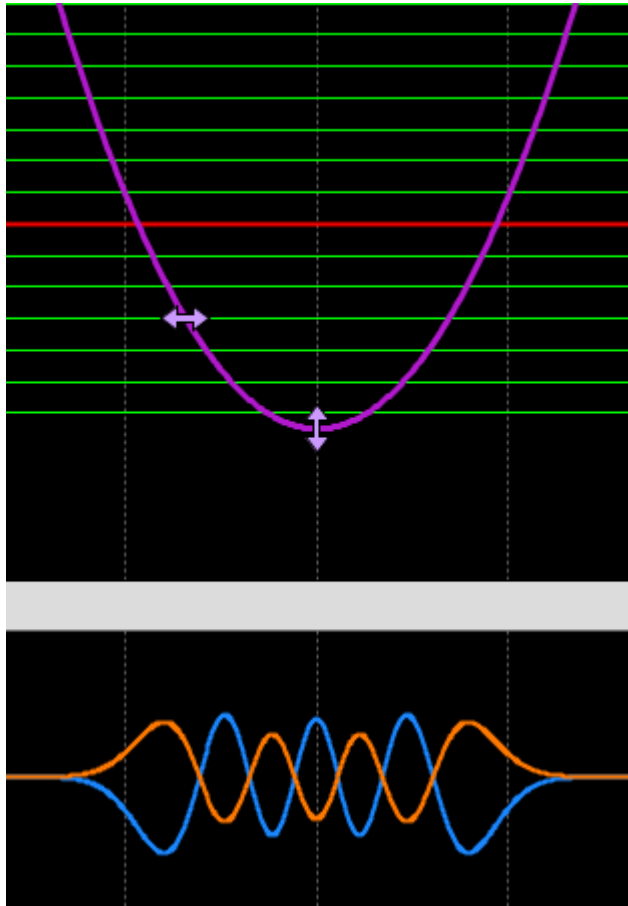
Operator uničenja (delcev):

$$\hat{a} |\psi_n\rangle = \sqrt{n} |\psi_{n-1}\rangle$$

Kaj so torej delci v tej sliki?



Kaj je delec?



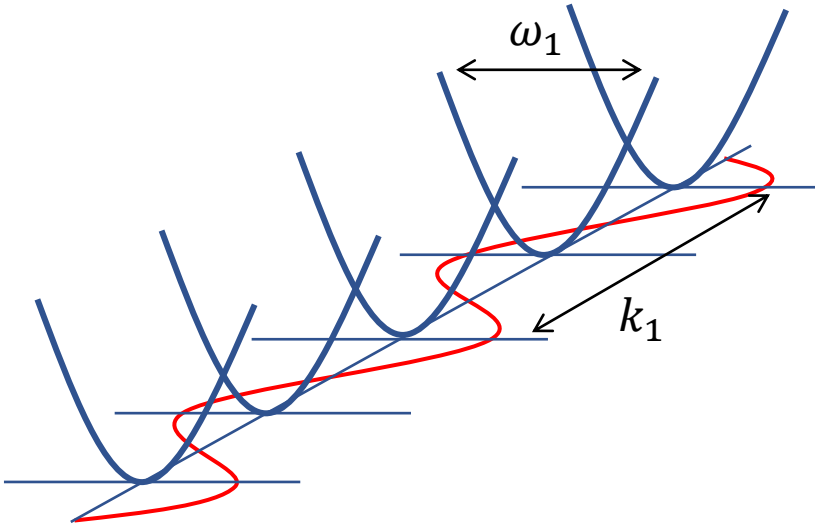
$$\hat{H} = \frac{1}{2m} \hat{p}^2 + \frac{m}{2} (2\pi\nu)^2 \hat{x}^2$$

- Kaj zares niha?
 - Klasično: lega, x .
 - Kvantno: pravzaprav nič. Stacionarna stanja so stacionarna.
- Kaj je ν ?
 - Frekvenca, s katero bi nihali klasični oscillator: $(2\pi\nu)^2 = K/m$.
- Kaj je $E_n = nh\nu$?
 - Je količina energije, ki jo ima oscillator. Povezana je z amplitudo nihanja: od kod do kod po osi x seže valovna funkcija.
 - Povezana je tudi s časovnim nihanjem valovne funkcije ψ_n .
- Kaj je torej delec?
 - Vsaka **količina energije $h\nu$** je interpretirana kot delec.
 - Harmonski oscillator v stanju n je interpretiran kot **n delcev z energijo $h\nu$** .
- Delec je (spet) količina energije shranjena v nihajoči stvari.

Kaj je foton?

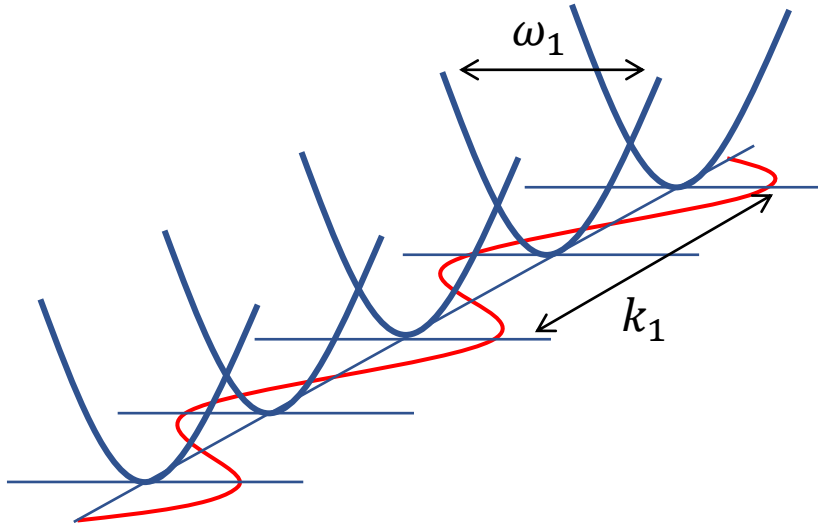
$$\hat{H}(z) = \frac{\epsilon_0}{2} \hat{E}^2(z) + \frac{\epsilon_0}{2k^2} (2\pi\nu)^2 \hat{B}^2(z); \quad \hat{H} = \int \hat{H}(z) dz$$

- V enačbi prepoznamo, da je energija v EMV odvisna od kvadrata amplitude => harmonski oscilator (HO).



Kaj je foton?

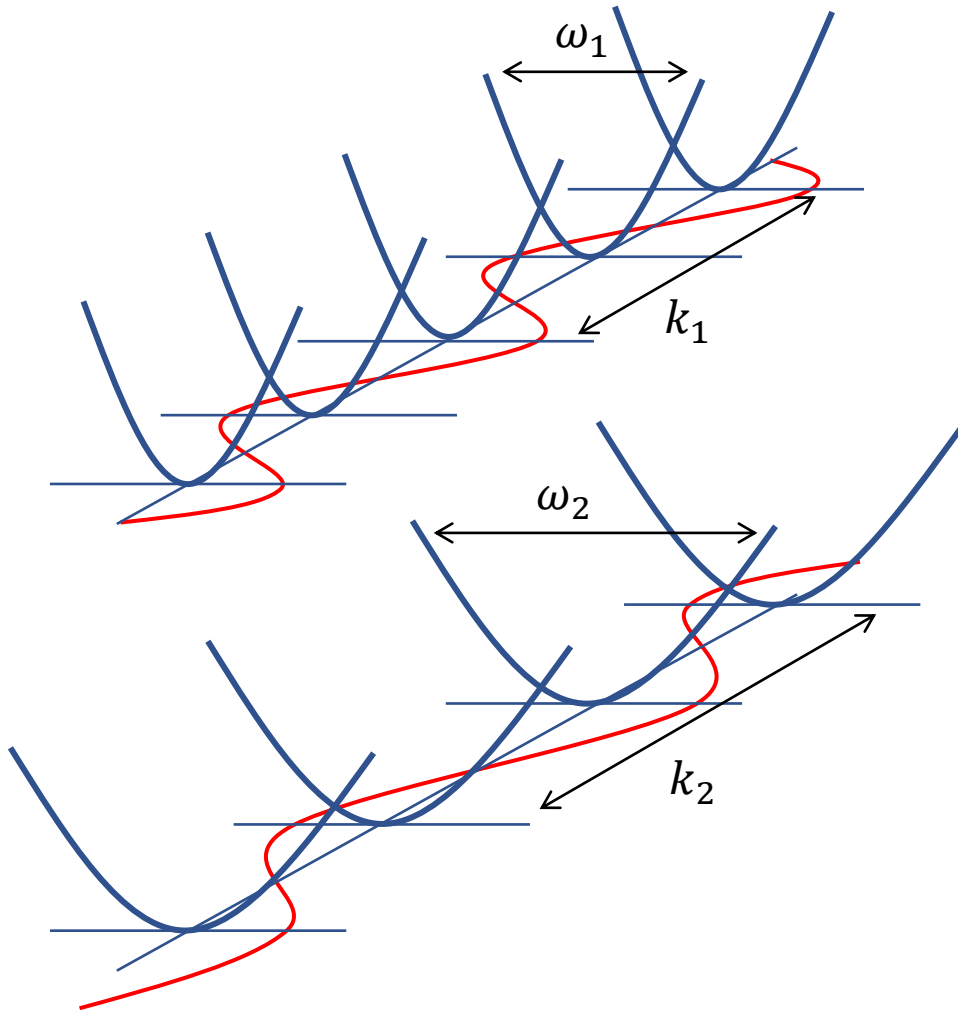
$$\hat{H}(z) = \frac{\epsilon_0}{2} \hat{E}^2(z) + \frac{\epsilon_0}{2k^2} (2\pi\nu)^2 \hat{B}^2(z); \quad \hat{H} = \int \hat{H}(z) dz$$



- V enačbi prepoznamo, da je energija v EMV odvisna od kvadrata amplitude => harmonski oscilator (HO).
- EMP kvantiziramo kot serijo nesklopljenih harmonskih oscilatorjev.
 - Vsi imajo isto ν .
 - Fazno so zamaknjeni ravno toliko, kolikor je potrebno za vtis potujočega vala.
- Celotna serija zdaj predstavlja EMV z dano ν in tej skladnim valovnim vektorjem/številom $k = 2\pi\nu/c$.

Kaj je foton?

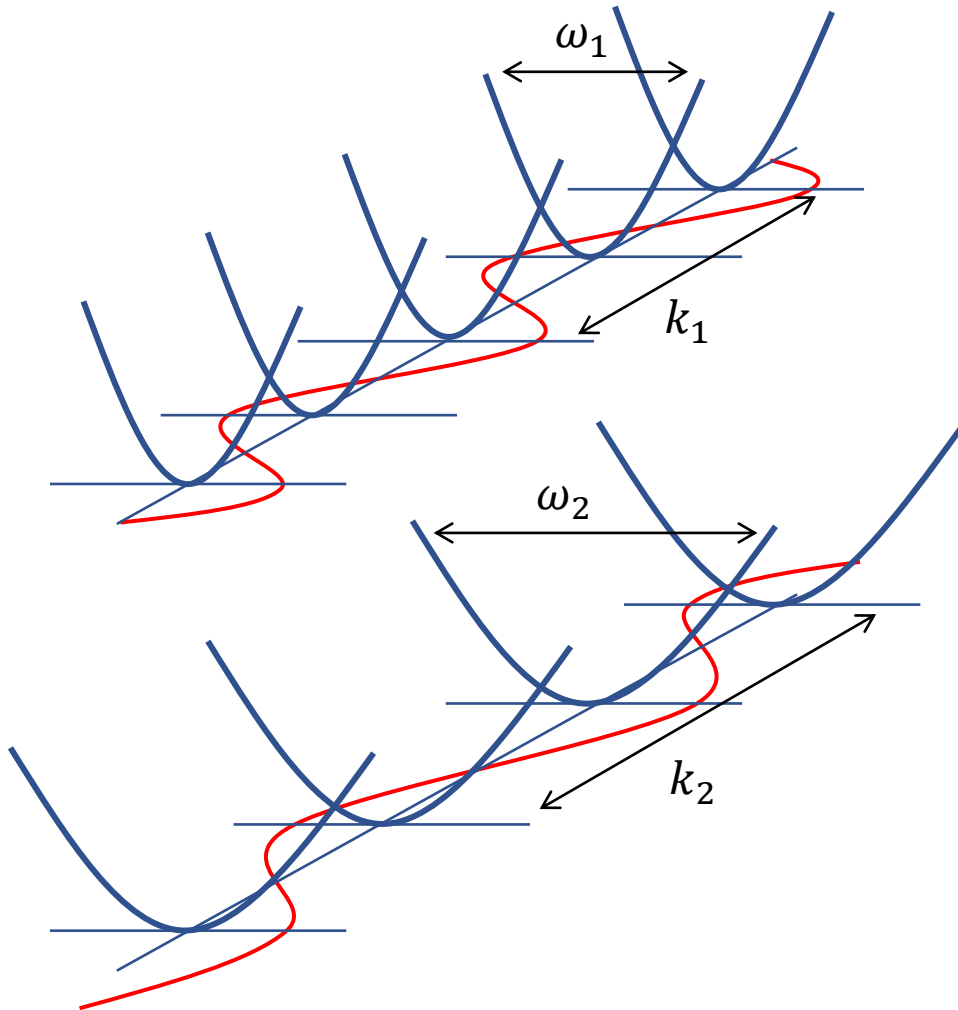
$$\hat{H}(z) = \frac{\epsilon_0}{2} \hat{E}^2(z) + \frac{\epsilon_0}{2k^2} (2\pi\nu)^2 \hat{B}^2(z); \quad \hat{H} = \int \hat{H}(z) dz$$



- V enačbi prepoznamo, da je energija v EMV odvisna od kvadrata amplitude => harmonski oscilator (HO).
- EMP kvantiziramo kot serijo neslopljenih harmonskih oscilatorjev.
 - Vsi imajo isto ν .
 - Fazno so zamaknjeni ravno toliko, kolikor je potrebno za vtis potujočega vala.
- Celotna serija zdaj predstavlja EMV z dano ν in tej skladnim valovnim vektorjem/številom $k = 2\pi\nu/c$.
- Ker so možne vse frekvence, naredimo neskončno takih serij HO.
 - Vsaka serija ima svoja ν in k .
 - Vse obstajajo istočasno na istem mestu.
 - Vse to predstavlja razvoj EMV v Fourjejevo vrsto oz. Fourierjevo transformacijo.

Kaj je foton?

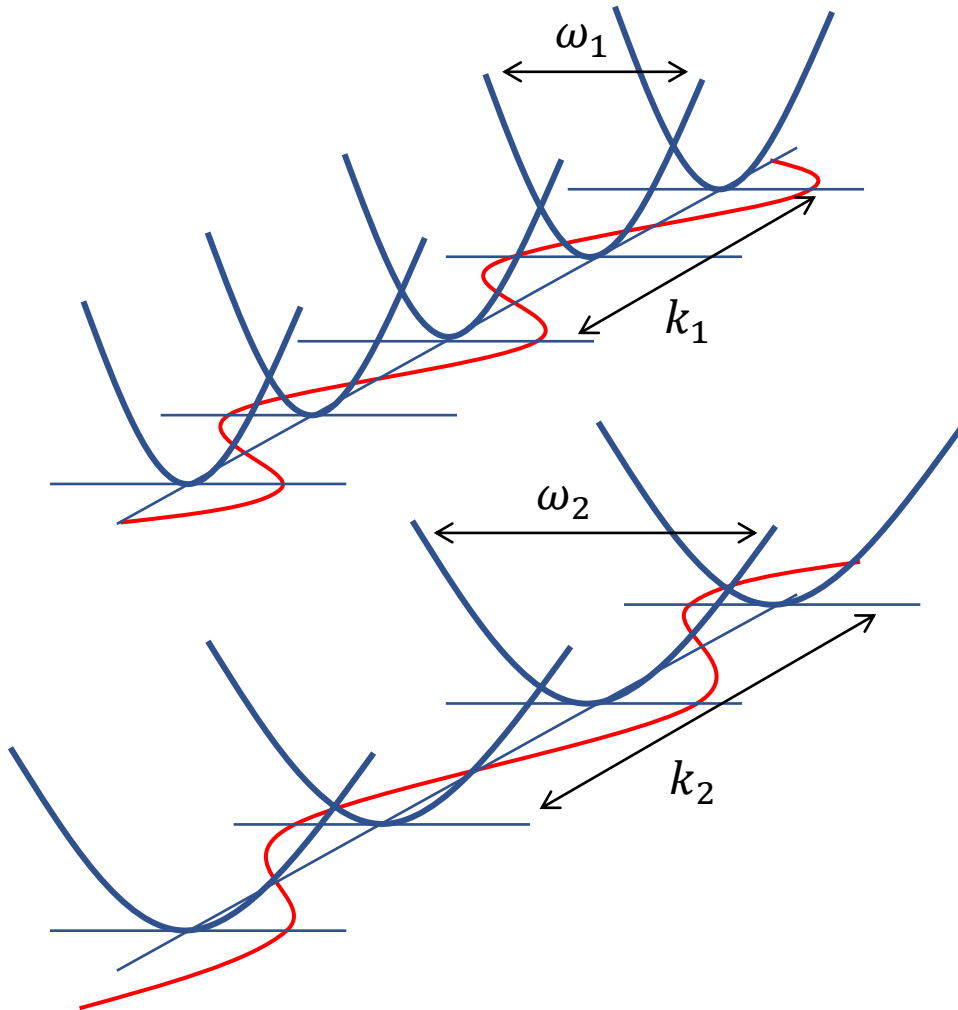
$$\hat{H}(z) = \frac{\epsilon_0}{2} \hat{E}^2(z) + \frac{\epsilon_0}{2k^2} (2\pi\nu)^2 \hat{B}^2(z); \quad \hat{H} = \int \hat{H}(z) dz$$



- V enačbi prepoznamo, da je energija v EMV odvisna od kvadrata amplitude => harmonski oscilator (HO).
- EMP kvantiziramo kot serijo neslopljenih harmonskih oscilatorjev.
 - Vsi imajo isto ν .
 - Fazno so zamaknjeni ravno toliko, kolikor je potrebno za vtis potujočega vala.
- Celotna serija zdaj predstavlja EMV z dano ν in tej skladnim valovnim vektorjem/številom $k = 2\pi\nu/c$.
- Ker so možne vse frekvence, naredimo neskončno takih serij HO.
 - Vsaka serija ima svoja ν in k .
 - Vse obstajajo istočasno na istem mestu.
 - Vse to predstavlja razvoj EMV v Fourjejevo vrsto oz. Fourierjevo transformacijo.
- Vsi HO v eni serije se vzbudijo istočasno z energijo $h\nu$, kar interpretiramo kot en foton z ustreznima ν in k .
- Še en foton pomeni vzbuditev iste serije HO do energije $2h\nu$ itd.

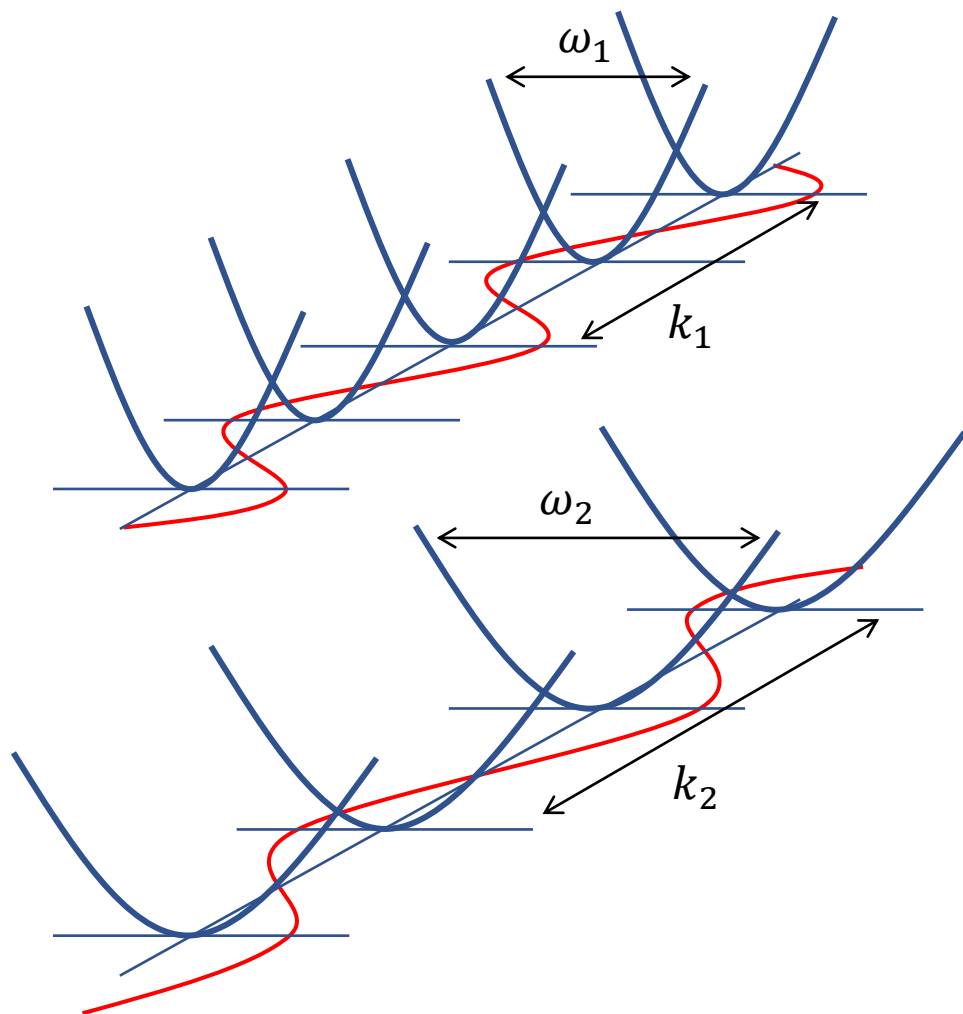
Kaj je foton?

$$\hat{H}(z) = \frac{\epsilon_0}{2} \hat{E}^2(z) + \frac{\epsilon_0}{2k^2} (2\pi\nu)^2 \hat{B}^2(z); \quad \hat{H} = \int \hat{H}(z) dz$$



- Kaj zares niha?
 - Klasično: polje E in polje B .
 - Kvantno: pravzaprav nič. Stacionarna stanja so stacionarna.
 - Kvadratni potencial dobimo **abstraktno**, ker za večjo amplitude potrebujemo **kvadratno več energije**.
- Kaj je ν ?
 - Katerakoli od možnih frekvenc, s katero lahko nihata polji.
- Kaj je $E_n = nh\nu$?
 - Je količina energije, ki jo ima **vrsta nesklapljenih oscillatorjev**, ki predstavljajo nihanje polj. Za večjo amplitude potrebujemo kvadratno več energije.
- Kaj je torej foton?
 - Vsaka **količina energije $h\nu$** v valu s frekvenco ν je interpretirana kot foton.
- Foton je (spet) količina energije shranjena v valovanju.

Primer sipanja

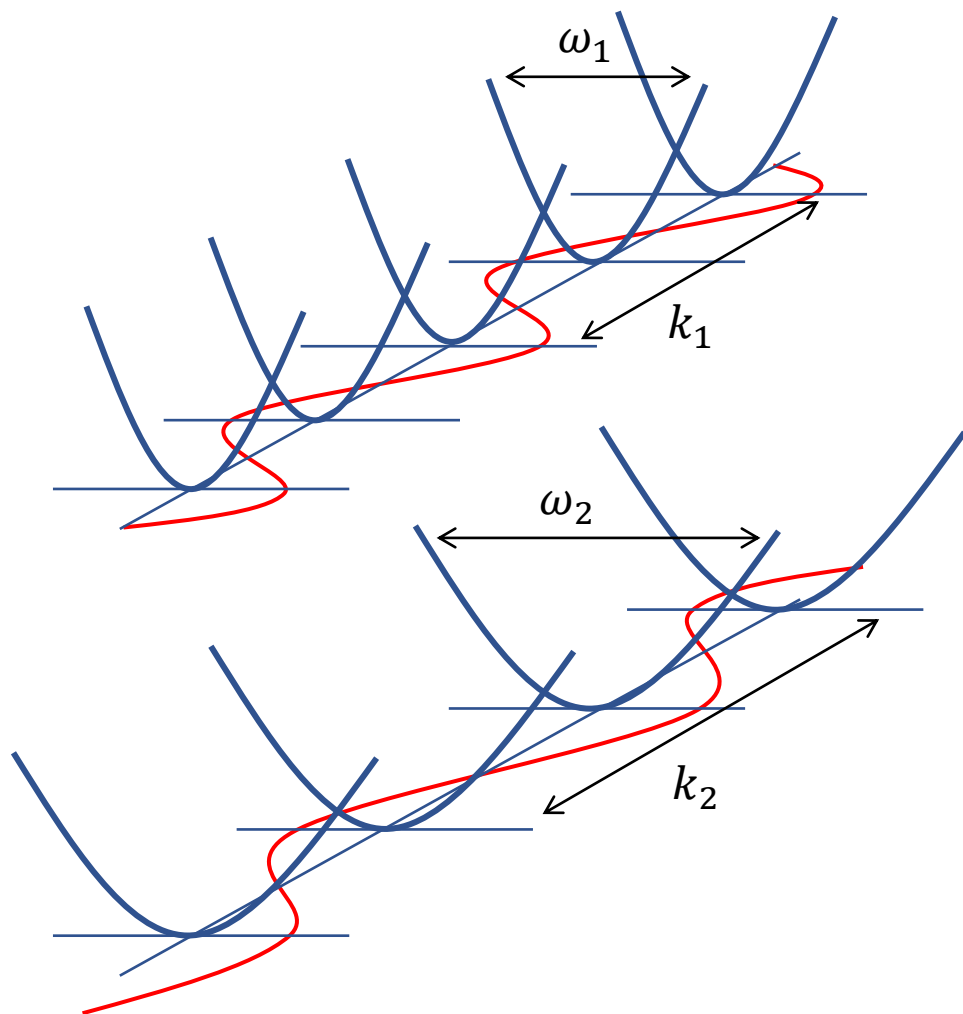


$$\hat{a}^+|n\rangle = \sqrt{n+1}|n+1\rangle$$

$$\hat{a}|n\rangle = \sqrt{n}|n-1\rangle$$

$$\hat{a}_{k_1} \hat{a}_{k_2}^+ |\dots, 3, \dots, 5, \dots\rangle =$$

Primer sipanja

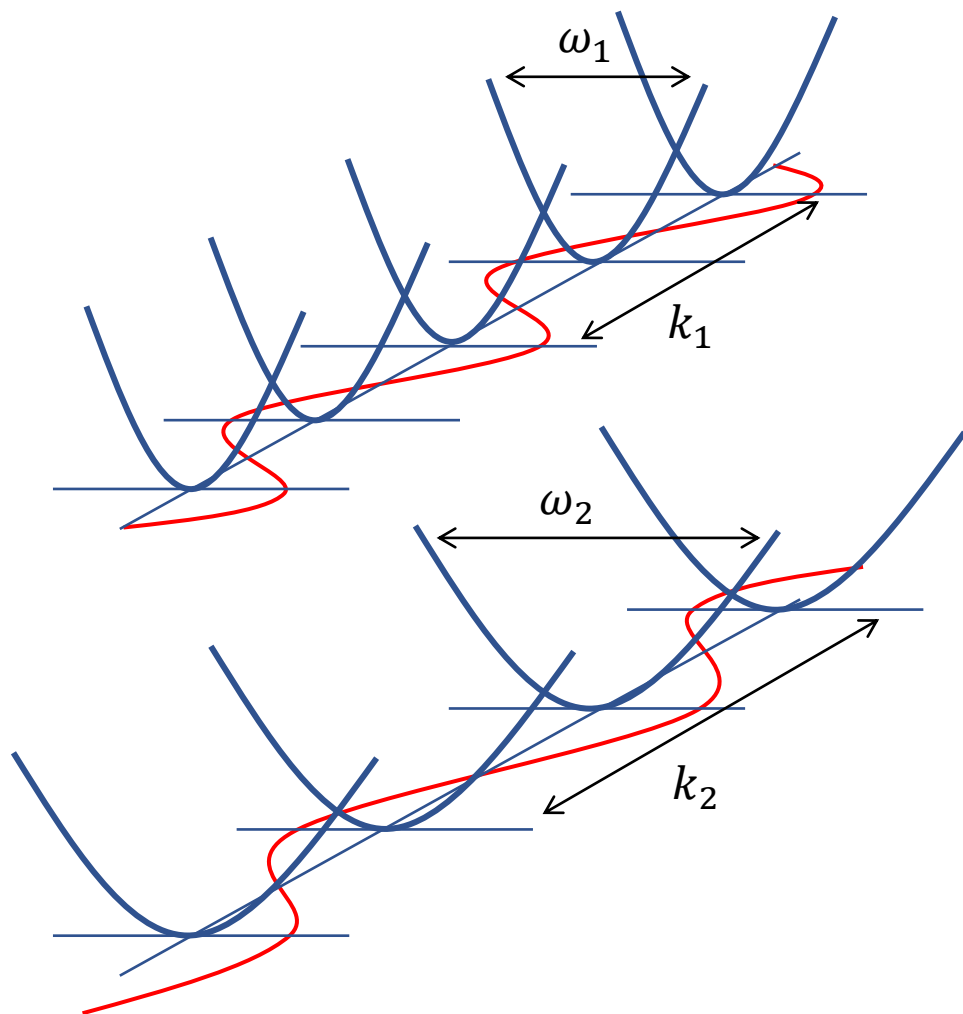


$$\hat{a}^+|n\rangle = \sqrt{n+1}|n+1\rangle$$

$$\hat{a}|n\rangle = \sqrt{n}|n-1\rangle$$

$$\hat{a}_{k_1} \hat{a}_{k_2}^+ |\dots, 3, \dots, 5, \dots\rangle = |\dots, 2, \dots, 6, \dots\rangle$$

Primer sipanja



$$\hat{a}^+|n\rangle = \sqrt{n+1}|n+1\rangle$$

$$\hat{a}|n\rangle = \sqrt{n}|n-1\rangle$$

$$\hat{a}_{k_1} \hat{a}_{k_2}^+ |\dots, 3, \dots, 5, \dots\rangle = \sqrt{3}\sqrt{6} |\dots, 2, \dots, 6, \dots\rangle$$

Kaj je foton?

	Fotoefekt	Dvojna reža	QED
Paket energije v EMV Kvant svetlobe	Da	Da	
Delec svetlobe	Nekaj takega	Niti ne	
Valovni paket	/	Omejena valovna funkcija	
Dualnost	Mogoče?	Mogoče?	

Kaj je foton?

	Fotoefekt	Dvojna reža	QED
Paket energije v EMV Kvant svetlobe	Da	Da	Da
Delec svetlobe	Nekaj takega	Niti ne	
Valovni paket	/	Omejena valovna funkcija	
Dualnost	Mogoče?	Mogoče?	

Kaj je foton?

	Fotoefekt	Dvojna reža	QED
Paket energije v EMV Kvant svetlobe	Da	Da	Da
Delec svetlobe	Nekaj takega	Niti ne	Tako ime dajo
Valovni paket	/	Omejena valovna funkcija	
Dualnost	Mogoče?	Mogoče?	

Kaj je foton?

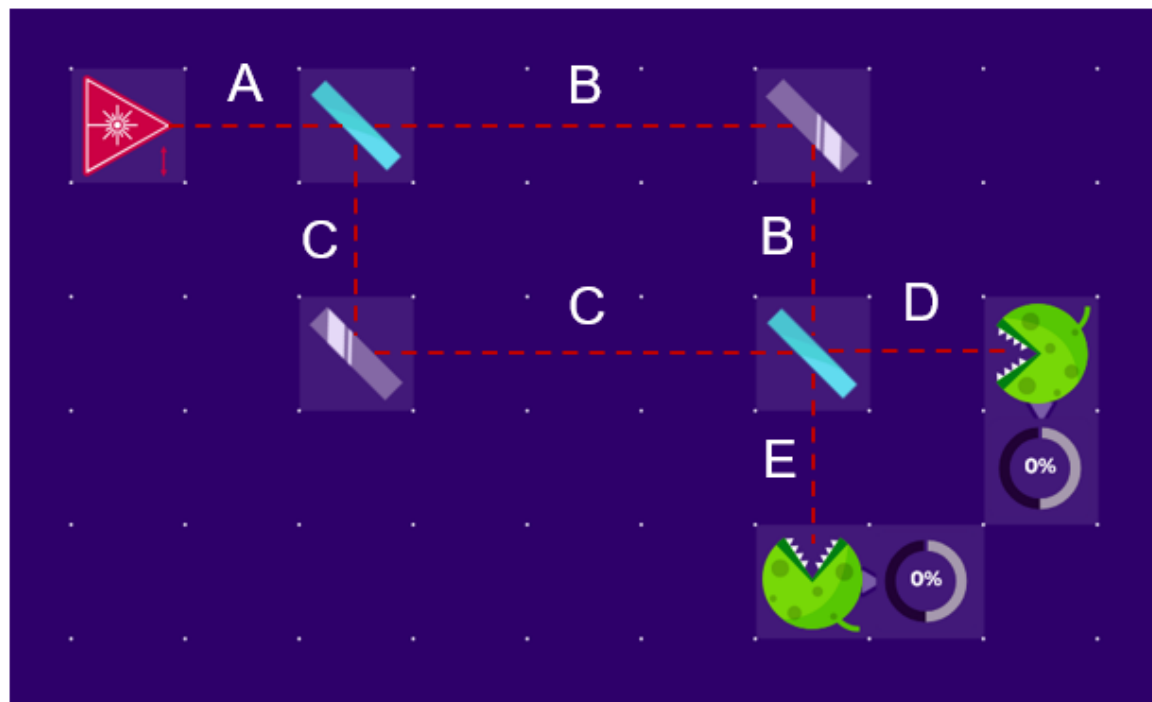
	Fotoefekt	Dvojna reža	QED
Paket energije v EMV Kvant svetlobe	Da	Da	Da
Delec svetlobe	Nekaj takega	Niti ne	Tako ime dajo
Valovni paket	/	Omejena valovna funkcija	Raven val in valovni paketi
Dualnost	Mogoče?	Mogoče?	

Kaj je foton?

	Fotoefekt	Dvojna reža	QED
Paket energije v EMV Kvant svetlobe	Da	Da	Da
Delec svetlobe	Nekaj takega	Niti ne	Tako ime dajo
Valovni paket	/	Omejena valovna funkcija	Raven val in valovni paketi
Dualnost	Mogoče?	Mogoče?	Mogoče?

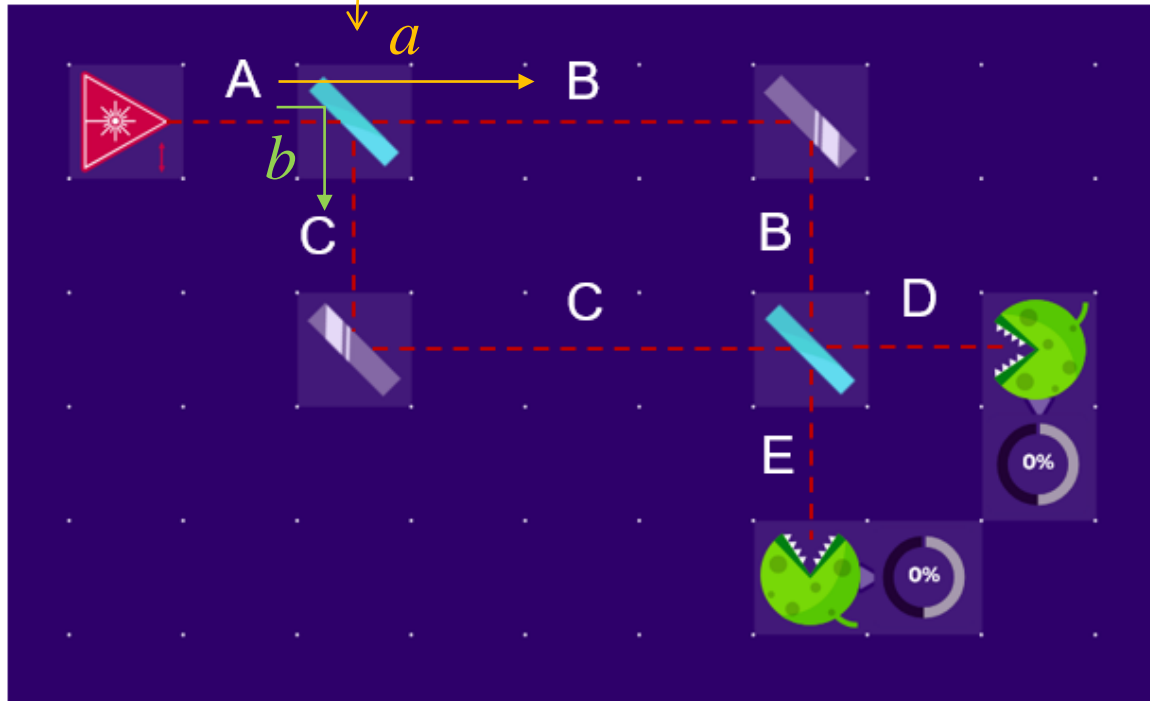
Mach-Zehnder s posameznimi fotoni (1986)

Mach-Zehnder s posameznimi fotoni (1986)



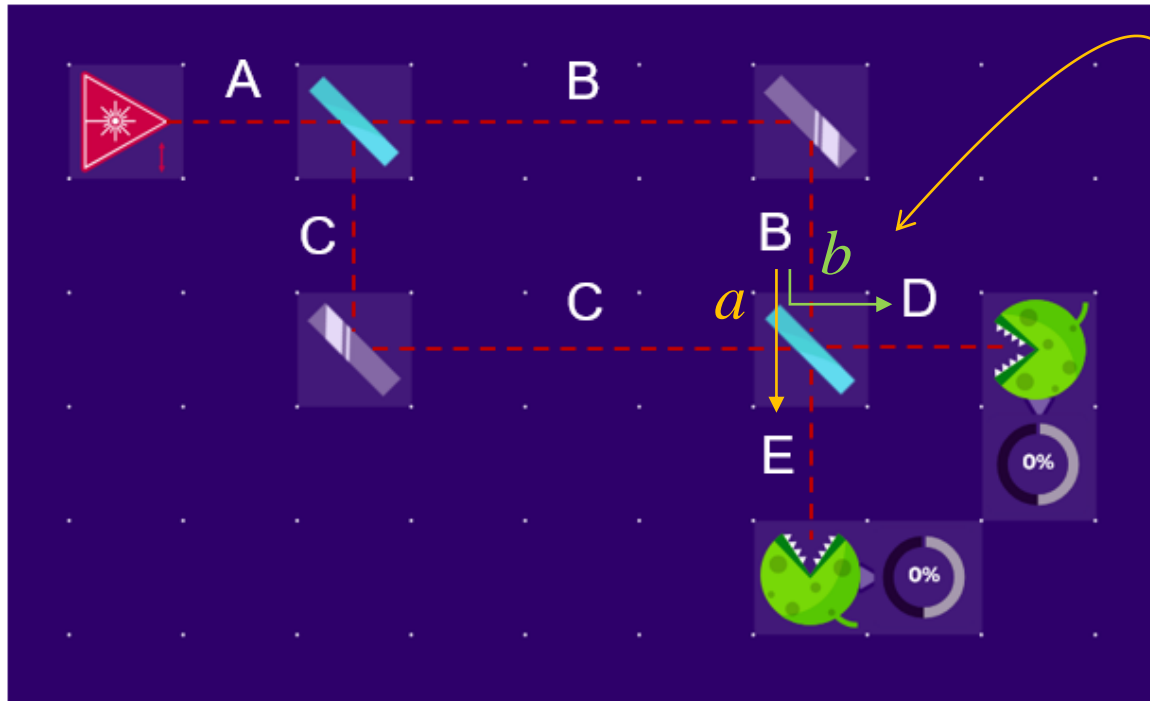
<https://lab.quantumflytrap.com/lab?mode=waves>

$$|A\rangle \rightarrow a|B\rangle + b|C\rangle$$



$$|A\rangle \rightarrow a|B\rangle + b|C\rangle$$

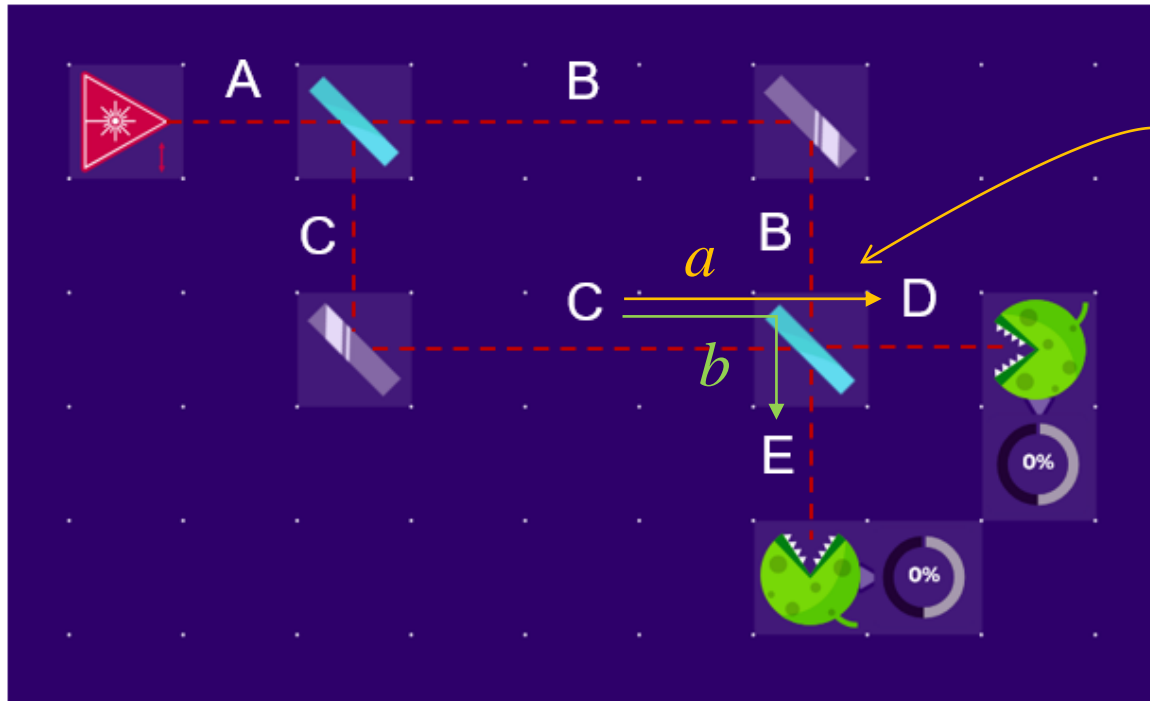
$$|B\rangle \rightarrow a|E\rangle + b|D\rangle$$



$$|A\rangle \rightarrow a|B\rangle + b|C\rangle$$

$$|B\rangle \rightarrow a|E\rangle + b|D\rangle$$

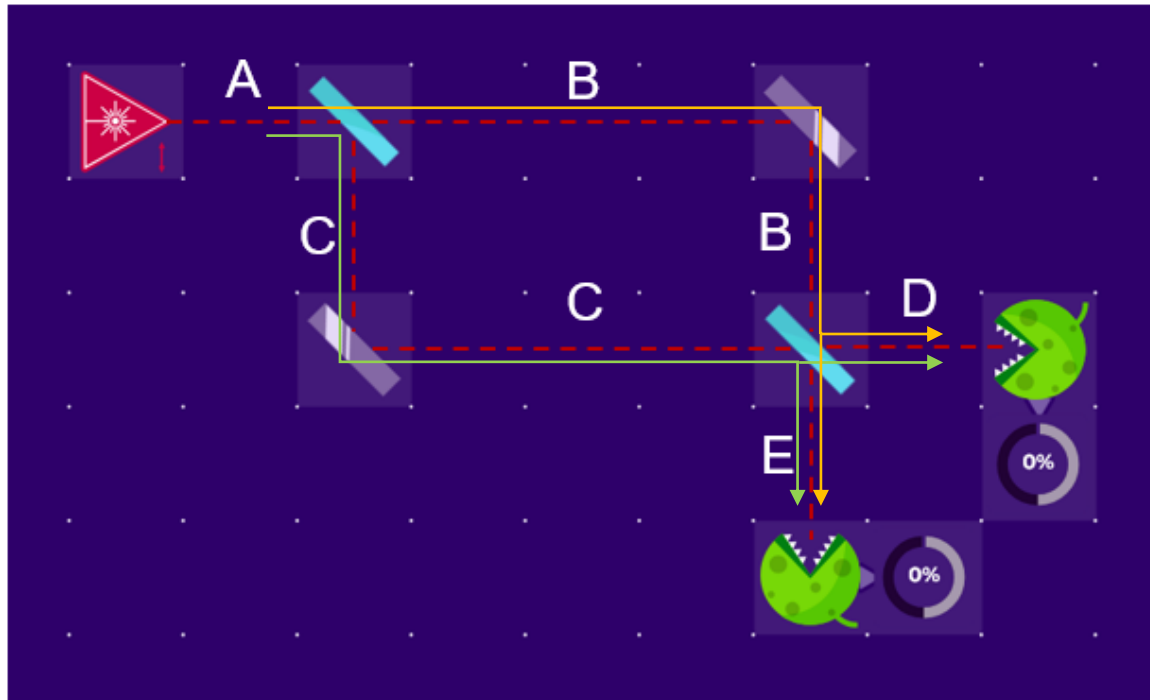
$$|C\rangle \rightarrow a|D\rangle + b|E\rangle$$



$$|A\rangle \rightarrow a|B\rangle + b|C\rangle$$

$$|B\rangle \rightarrow a|E\rangle + b|D\rangle$$

$$|C\rangle \rightarrow a|D\rangle + b|E\rangle$$



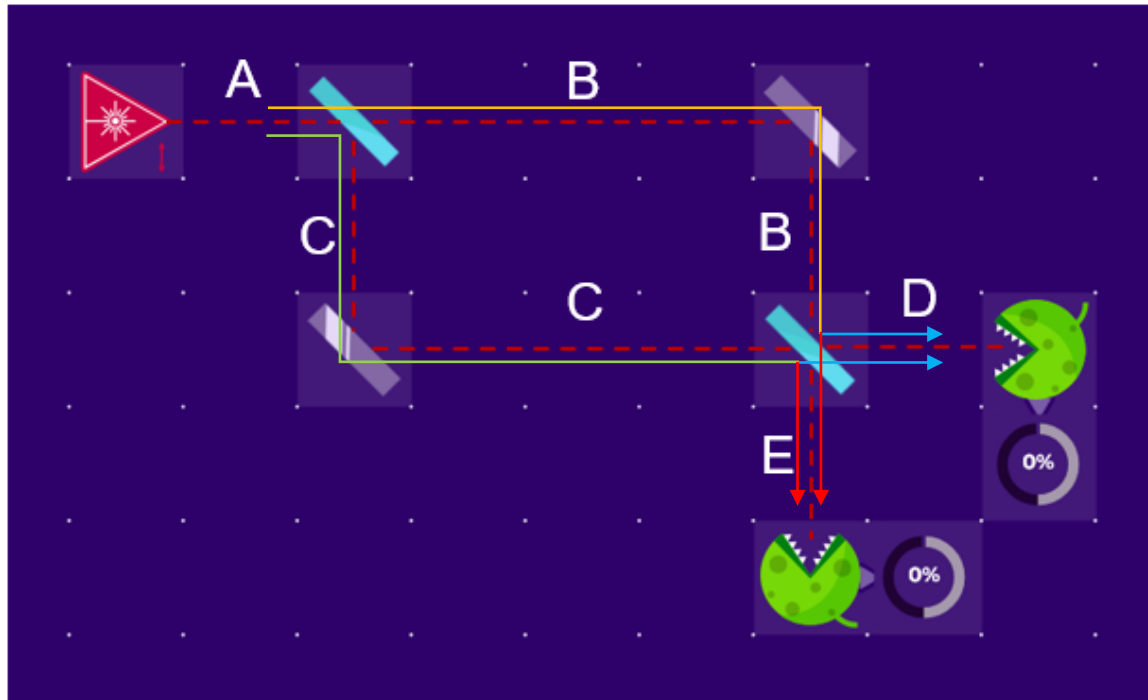
$$|A\rangle \rightarrow a|B\rangle + b|C\rangle$$

$$(a^2|E\rangle + ab|D\rangle) + (ba|D\rangle + b^2|E\rangle)$$

$$|A\rangle \rightarrow a|B\rangle + b|C\rangle$$

$$|B\rangle \rightarrow a|E\rangle + b|D\rangle$$

$$|C\rangle \rightarrow a|D\rangle + b|E\rangle$$



$$|A\rangle \rightarrow a|B\rangle + b|C\rangle$$

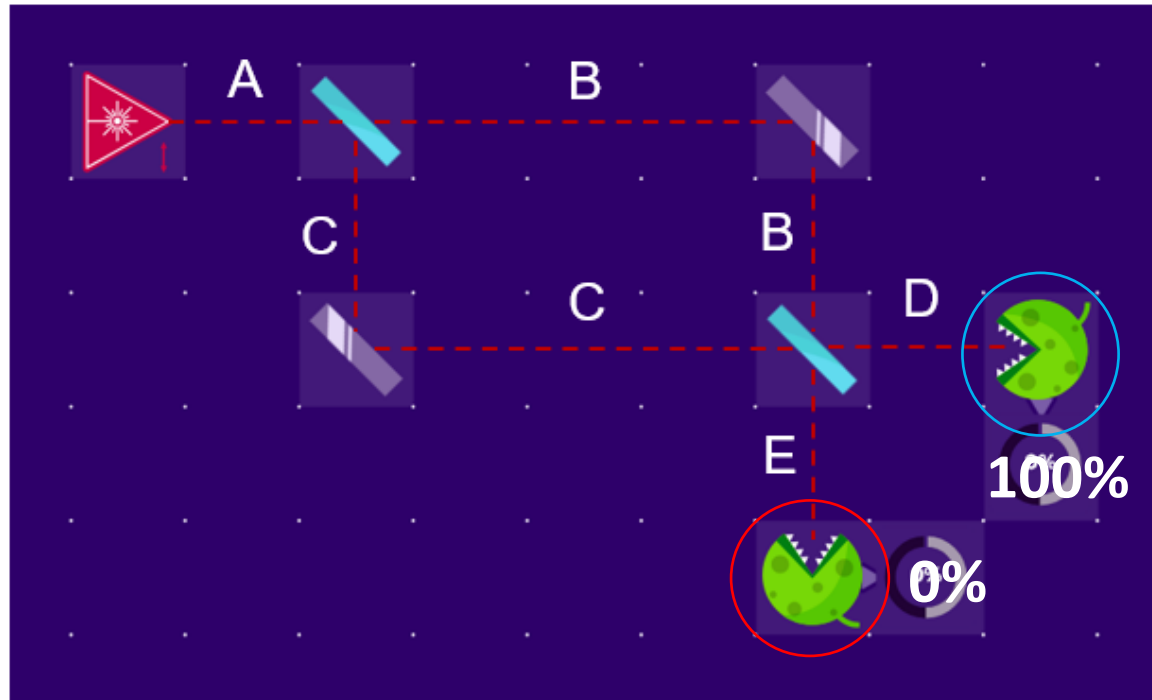
$$\underbrace{(a^2|E\rangle + ab|D\rangle)}_{\substack{\downarrow \\ |B\rangle}} + \underbrace{(ba|D\rangle + b^2|E\rangle)}_{\substack{\downarrow \\ |C\rangle}}$$

$$(2ab)|D\rangle + (a^2 + b^2)|E\rangle$$

$$|A\rangle \rightarrow a|B\rangle + b|C\rangle$$

$$|B\rangle \rightarrow a|E\rangle + b|D\rangle$$

$$|C\rangle \rightarrow a|D\rangle + b|E\rangle$$



$$|A\rangle \rightarrow \underbrace{a|B\rangle}_{\downarrow} + \underbrace{b|C\rangle}_{\downarrow}$$

$$\overbrace{(a^2|E\rangle + ab|D\rangle)} + \overbrace{(ba|D\rangle + b^2|E\rangle)}$$

$$(2ab)|D\rangle + (a^2 + b^2)|E\rangle$$

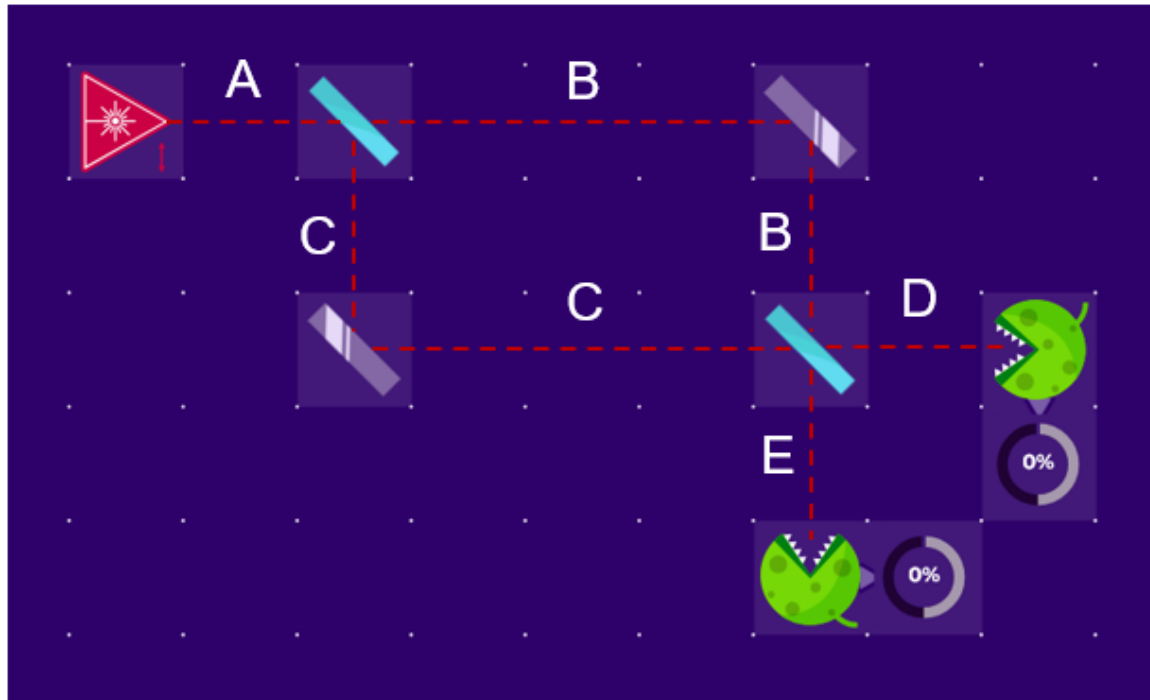
$$|2ab|^2 = 1$$

$$|a^2 + b^2|^2 = 0$$

$$|A\rangle \rightarrow a|B\rangle + b|C\rangle$$

$$|B\rangle \rightarrow a|E\rangle + b|D\rangle$$

$$|C\rangle \rightarrow a|D\rangle + b|E\rangle$$



$$|A\rangle \rightarrow \underbrace{a|B\rangle}_{\downarrow} + \underbrace{b|C\rangle}_{\downarrow}$$

$$\overbrace{(a^2|E\rangle + ab|D\rangle)} + \overbrace{(ba|D\rangle + b^2|E\rangle)}$$

$$(2ab)|D\rangle + (a^2 + b^2)|E\rangle$$

$$|2ab|^2 = 1$$

$$|a^2 + b^2|^2 = 0$$

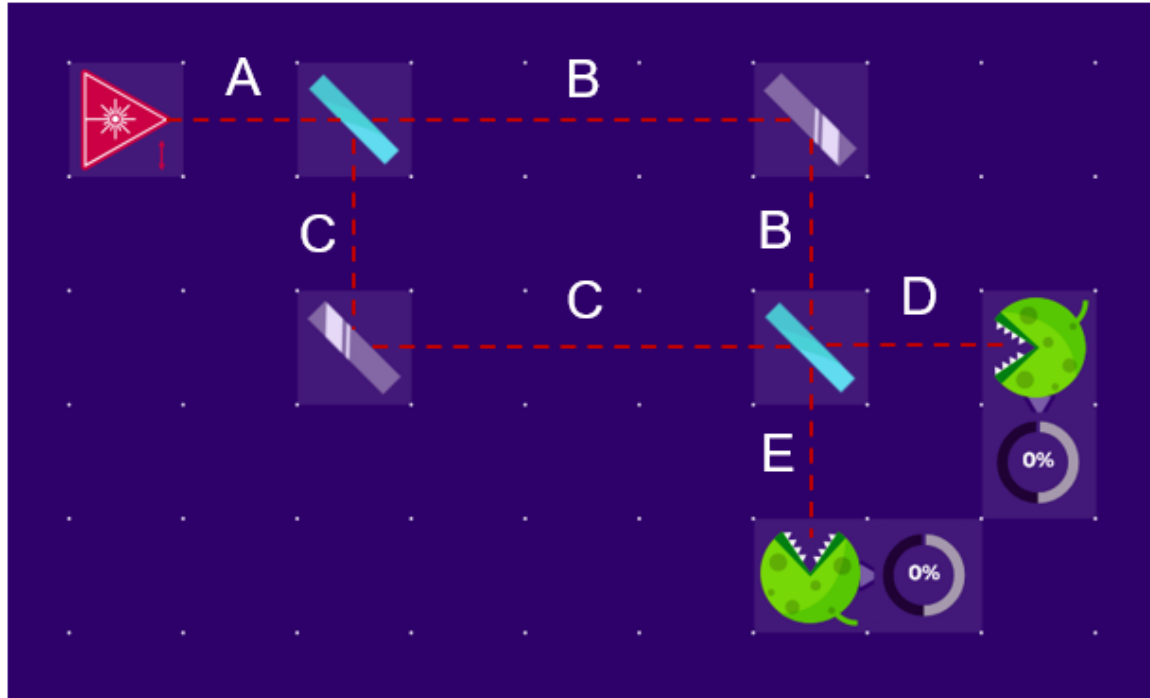
$$a = \pm \frac{1}{\sqrt{2}}$$

$$b = \pm \frac{i}{\sqrt{2}}$$

$$|A\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}|B\rangle + \frac{i}{\sqrt{2}}|C\rangle$$

$$|B\rangle \rightarrow a|E\rangle + b|D\rangle$$

$$|C\rangle \rightarrow a|D\rangle + b|E\rangle$$



$$|A\rangle \rightarrow a|B\rangle + b|C\rangle$$

$$(a^2|E\rangle + ab|D\rangle) + (ba|D\rangle + b^2|E\rangle)$$

$$(2ab)|D\rangle + (a^2 + b^2)|E\rangle$$

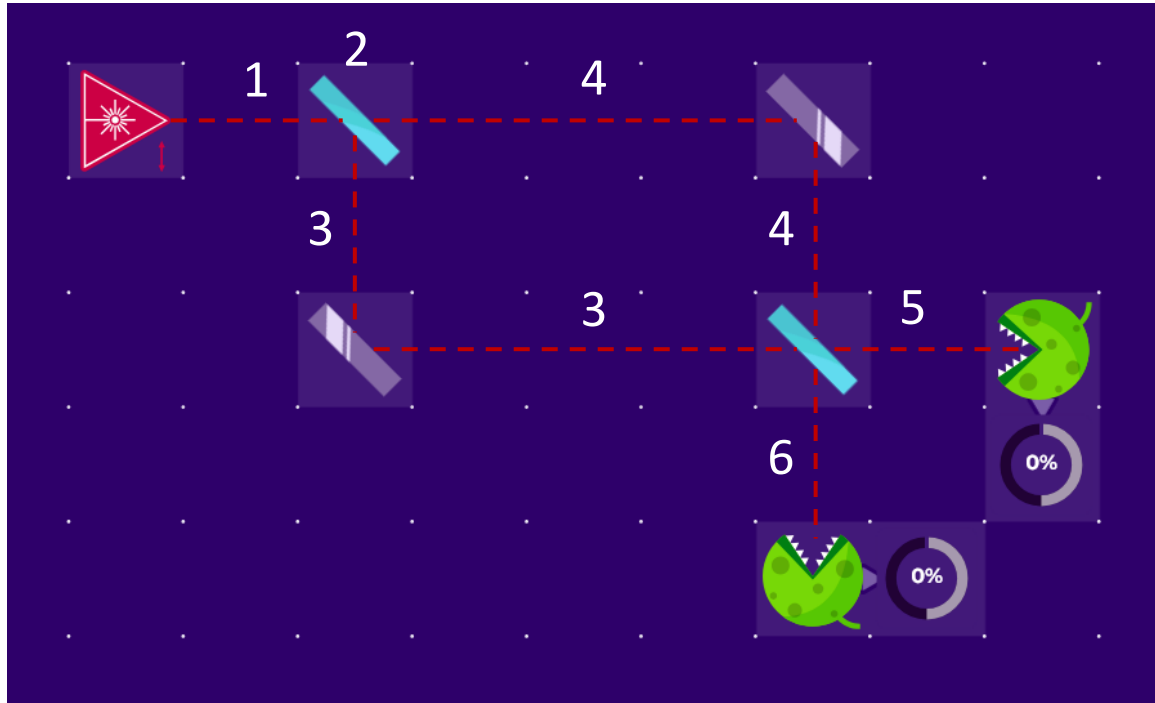
$$|2ab|^2 = 1$$

$$|a^2 + b^2|^2 = 0$$

$$a = \pm \frac{1}{\sqrt{2}}$$

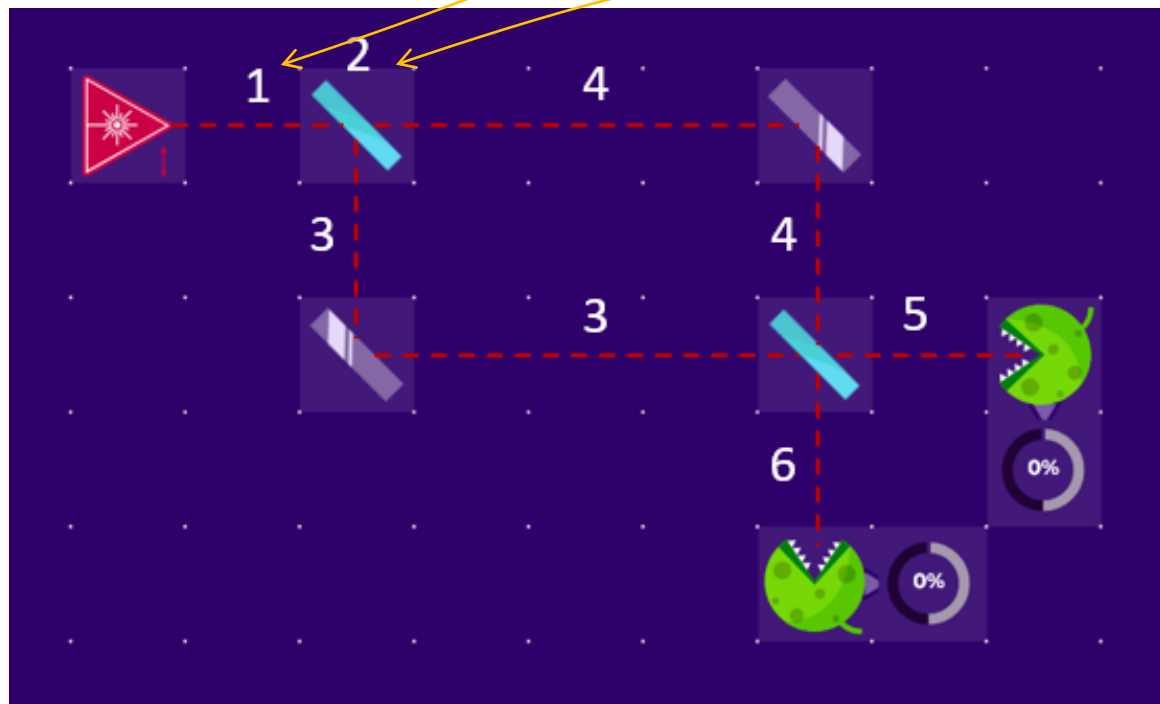
$$b = \pm \frac{i}{\sqrt{2}}$$

1 2 3 4 5 6
 $|1,0,0,0,0,0\rangle$



$$|1,0,0,0,0,0\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}} (i|0,0,1,0,0,0\rangle + |0,0,0,1,0,0\rangle)$$

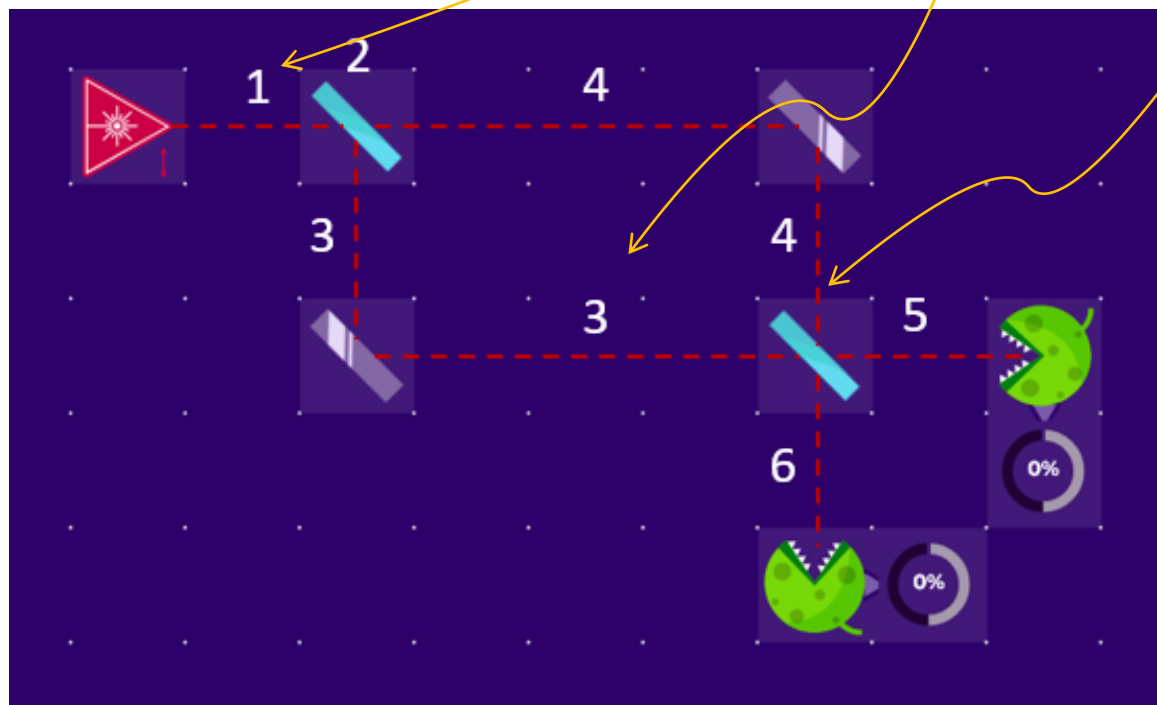
$$|0,1,0,0,0,0\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}} (|0,0,1,0,0,0\rangle + i|0,0,0,1,0,0\rangle)$$



$$|1,0,0,0,0,0\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}} (i|0,0,1,0,0,0\rangle + |0,0,0,1,0,0\rangle)$$

$$|0,0,1,0,0,0\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}} (|0,0,0,0,1,0\rangle + i|0,0,0,0,0,1\rangle)$$

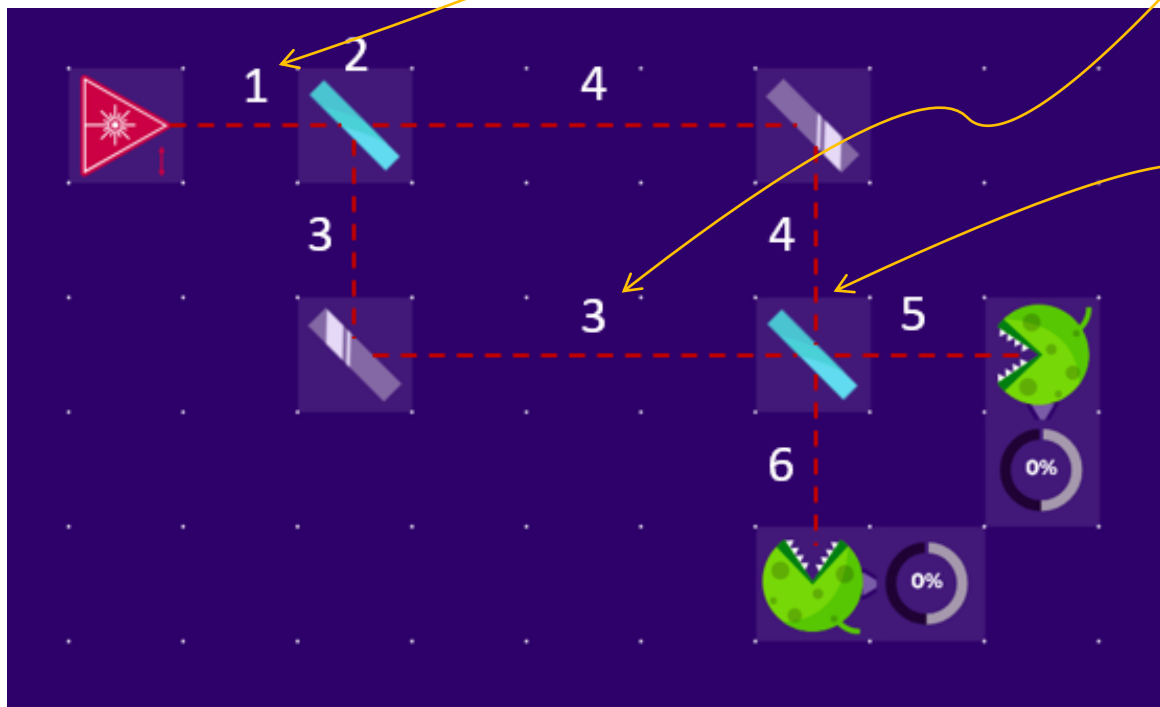
$$|0,0,1,0,0,0\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}} (i|0,0,0,0,1,0\rangle + |0,0,0,0,0,1\rangle)$$



$$|1,0,0,0,0,0\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}} (i|0,0,1,0,0,0\rangle + |0,0,0,1,0,0\rangle)$$

$$\frac{1}{2} i(|0,0,0,0,1,0\rangle + i|0,0,0,0,0,1\rangle) +$$

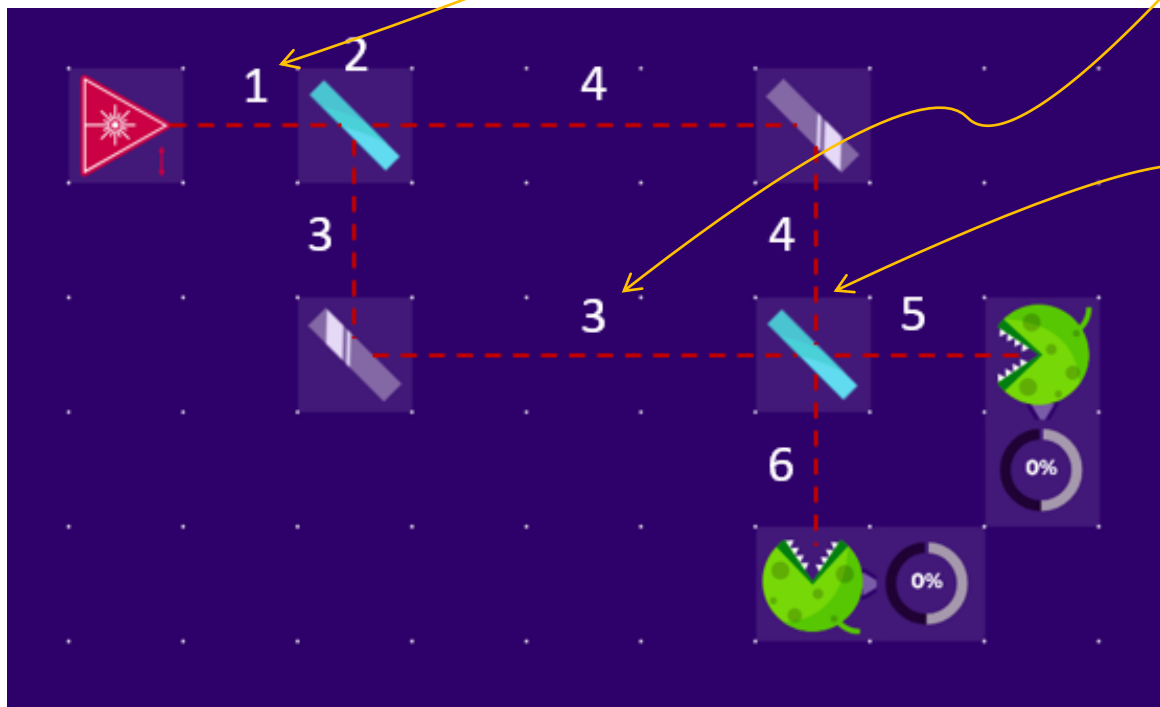
$$+ \frac{1}{2} (i|0,0,0,0,1,0\rangle + |0,0,0,0,0,1\rangle)$$



$$|1,0,0,0,0,0\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}} (i|0,0,1,0,0,0\rangle + |0,0,0,1,0,0\rangle)$$

$$\frac{1}{2} i(|0,0,0,0,1,0\rangle + i|0,0,0,0,0,1\rangle) +$$

$$+ \frac{1}{2} (i|0,0,0,0,1,0\rangle + |0,0,0,0,0,1\rangle)$$

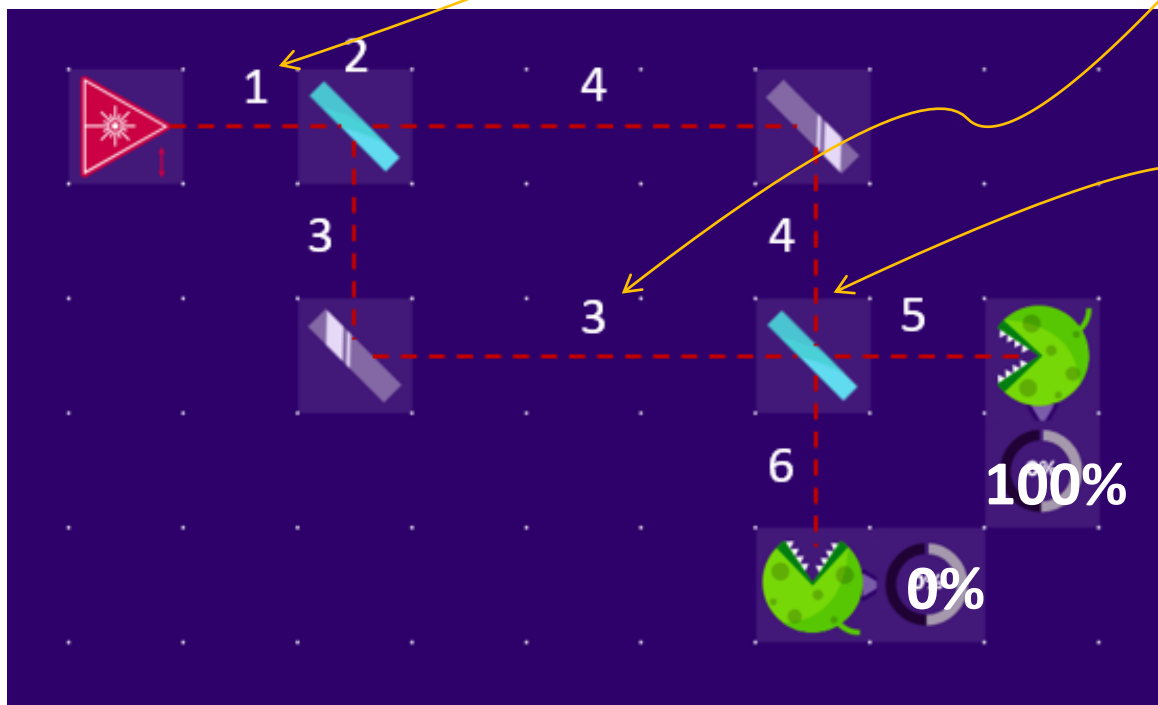


$$|1,0,0,0,0,0\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}} (i|0,0,1,0,0,0\rangle + |0,0,0,1,0,0\rangle)$$

$$\frac{1}{2} i(|0,0,0,0,1,0\rangle + i|0,0,0,0,0,1\rangle) +$$

$$+ \frac{1}{2} (i|0,0,0,0,1,0\rangle + |0,0,0,0,0,1\rangle)$$

$$i|0,0,0,0,1,0\rangle + 0|0,0,0,0,0,1\rangle$$



Kaj je foton?

	Fotoefekt	Dvojna reža	QED	Mach-Zehnder
Paket energije v EMV Kvant svetlobe	Da	Da	Da	
Delec svetlobe	Nekaj takega	Niti ne	Ne, tako ga imenujejo	
Valovni paket	/	Omejena valovna funkcija	Raven val in valovni paketi	
Dualnost	Mogoče?	Mogoče?	Mogoče?	

Kaj je foton?

	Fotoefekt	Dvojna reža	QED	Mach-Zehnder
Paket energije v EMV Kvant svetlobe	Da	Da	Da	Ne eksplicitno/ Inherentno QED
Delec svetlobe	Nekaj takega	Niti ne	Ne, tako ga imenujejo	
Valovni paket	/	Omejena valovna funkcija	Raven val in valovni paketi	
Dualnost	Mogoče?	Mogoče?	Mogoče?	

Kaj je foton?

	Fotoefekt	Dvojna reža	QED	Mach-Zehnder
Paket energije v EMV Kvant svetlobe	Da	Da	Da	Ne eksplicitno/ Inherentno QED
Delec svetlobe	Nekaj takega	Niti ne	Ne, tako ga imenujejo	Pravzaprav da
Valovni paket	/	Omejena valovna funkcija	Raven val in valovni paketi	
Dualnost	Mogoče?	Mogoče?	Mogoče?	

Kaj je foton?

	Fotoefekt	Dvojna reža	QED	Mach-Zehnder
Paket energije v EMV Kvant svetlobe	Da	Da	Da	Ne eksplicitno/ Inherentno QED
Delec svetlobe	Nekaj takega	Niti ne	Ne, tako ga imenujejo	Pravzaprav da
Valovni paket	/	Omejena valovna funkcija	Raven val in valovni paketi	Ne eksplicitno/ Inherentno QED
Dualnost	Mogoče?	Mogoče?	Mogoče?	

Kaj je foton?

	Fotoefekt	Dvojna reža	QED	Mach-Zehnder
Paket energije v EMV Kvant svetlobe	Da	Da	Da	Ne eksplicitno/ Inherentno QED
Delec svetlobe	Nekaj takega	Niti ne	Ne, tako ga imenujejo	Pravzaprav da
Valovni paket	/	Omejena valovna funkcija	Raven val in valovni paketi	Ne eksplicitno/ Inherentno QED
Dualnost	Mogoče?	Mogoče?	Mogoče?	Ne/ Inherentno QED

Kaj je foton?

- Na podlagi vsega povedanega, kako bi “definirali” pojem “foton”?



Kaj je foton?

	Fotoefekt	Dvojna reža	QED	Mach-Zehnder
Paket energije v EMV Kvant svetlobe	Da	Da	Da	Ne eksplicitno/ Inherentno QED
Delec svetlobe	Nekaj takega	Niti ne	Ne, tako ga imenujejo	Pravzaprav da
Valovni paket	/	Omejena valovna funkcija	Raven val in valovni paketi	Ne eksplicitno/ Inherentno QED
Dualnost	Mogoče?	Mogoče?	Mogoče?	Ne/ Inherentno QED