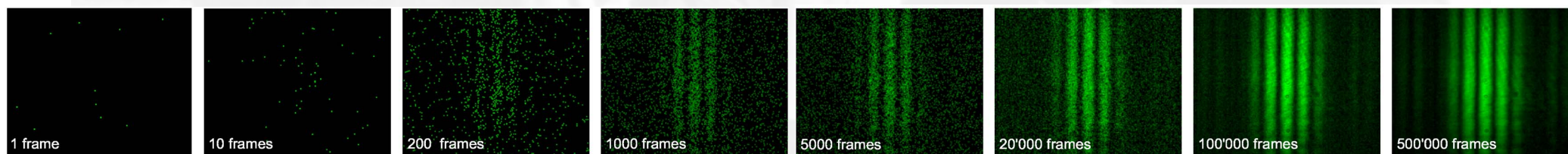


Läget runt 1920

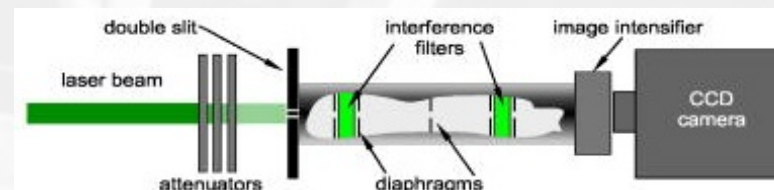


Läget runt 1920

	Partikelegenskaper	Vågegenskaper
Materia	$p = mv$ $W_k = \frac{mv^2}{2}$ $\boxed{R = \dot{p}}$ Ja! (mekanik) $p = \gamma mv$ $E_k = (\gamma - 1)mc^2$?
Strålning	$p = \frac{h}{\lambda}$ $W = hf$ Ja! (fotonmodellen)	E, B Ja! (elektromagnetism, optik)



Dubbelspaltexperiment med fotoner (2005)



Läget runt 1920

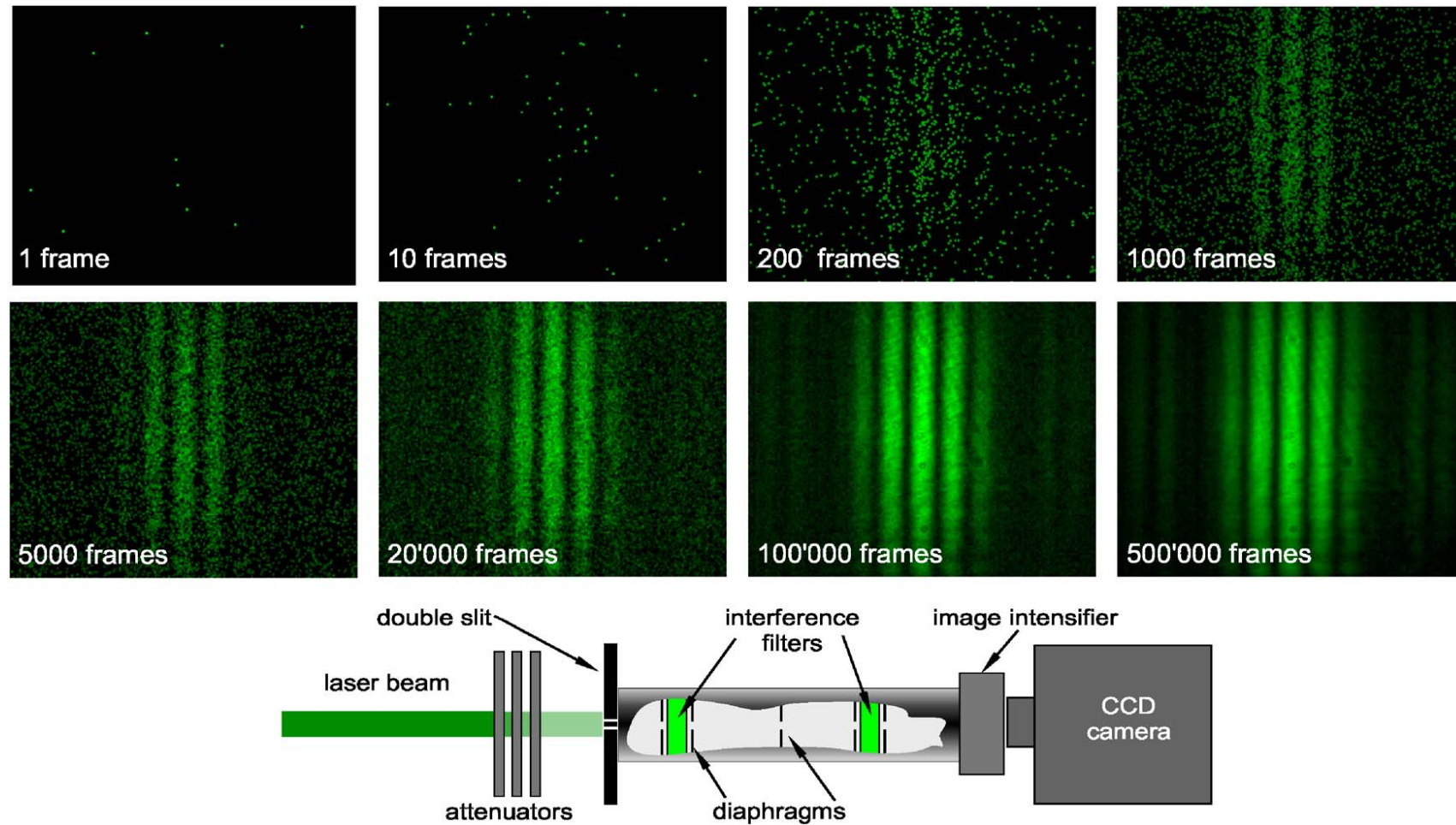


Fig. 1. (Color online) From particles to waves: Detection of light diffracted from a double slit on a photon by photon basis using a single-photon imaging CCD camera. Although single frames show an apparently random distribution of photon impact points, their integration reveals the classical fringe pattern.

Einstein (1916):

Fotoner: $p = \frac{h}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{h}{p}$

Materiens vågegenskaper

de Broglie (1924):

“materievåglängd”

Varje partikel kan tillskrivas en våglängd

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

Plancks
konstant

partikelns
rörelsemängd



[10]

Waves and Quanta.

THE quantum relation, energy = $h \times$ frequency, leads one to associate a periodical phenomenon with any isolated portion of matter or energy. An observer bound to the portion of matter will associate with it a frequency determined by its internal energy, namely, by its “mass at rest.” An observer for whom a portion of matter is in steady motion with [11]

Materiens vågenskaper

Einstein (1916):

Fotoner: $p = \frac{h}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{h}{p}$

de Broglie (1924):

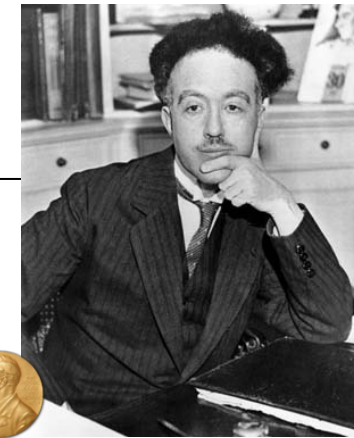
“materievåglängd”

Varje partikel kan tillskrivas en våglängd

Plancks
konstant

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

partikelns
rörelsemängd

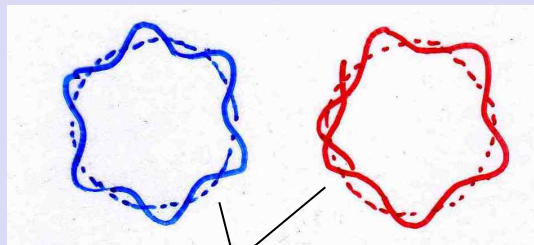


[10]

Waves and Quanta.

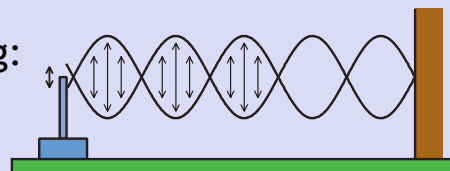
THE quantum relation, energy = $h \times$ frequency, leads one to associate a periodical phenomenon with any isolated portion of matter or energy. An observer bound to the portion of matter will associate with it a frequency determined by its internal energy, namely, by its “mass at rest.” An observer for whom a portion of matter is in steady motion with [11]

Ger en slags förklaring till
väteatomens kvantiserade energinivåer:



villkoret $2\pi r = n\lambda$ måste vara uppfyllt

Jfr stående våg på sträng:



Materiens vågenskaper

Einstein (1916):

Fotoner: $p = \frac{h}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{h}{p}$

de Broglie (1924):

“materievåglängd”

Varje partikel kan tillskrivas en våglängd

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

Plancks
konstant

partikelns
rörelsemängd

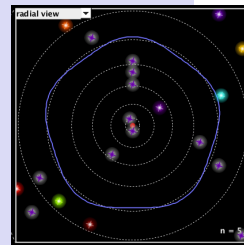
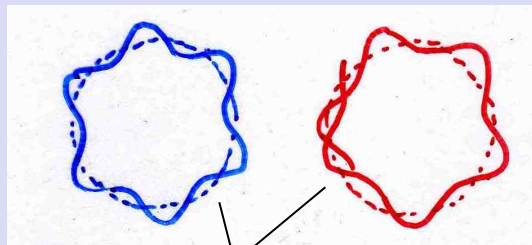


[10]

Waves and Quanta.

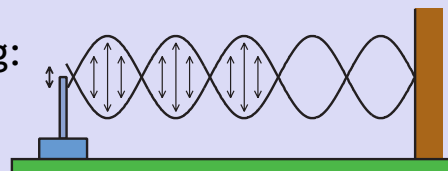
THE quantum relation, energy = $h \times$ frequency, leads one to associate a periodical phenomenon with any isolated portion of matter or energy. An observer bound to the portion of matter will associate with it a frequency determined by its internal energy, namely, by its “mass at rest.” An observer for whom a portion of matter is in steady motion with [11]

Ger en slags förklaring till
väteatomens kvantiserade energinivåer:



villkoret $2\pi r = n\lambda$ måste vara uppfyllt

Jfr stående våg på sträng:



Bekräftades 1927



G. P. Thomson (UK)

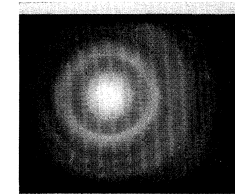
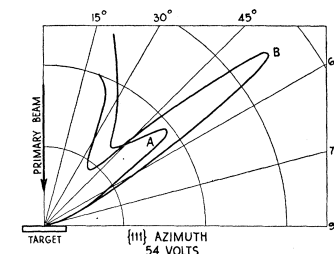


FIG. 4.—Gold.
[12]

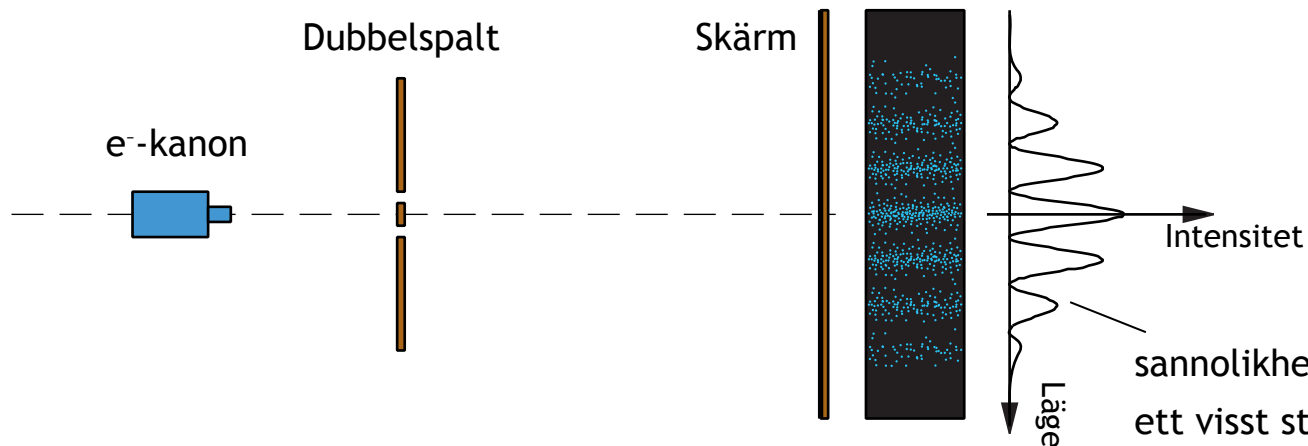


Davisson & Germer (USA)

[13]

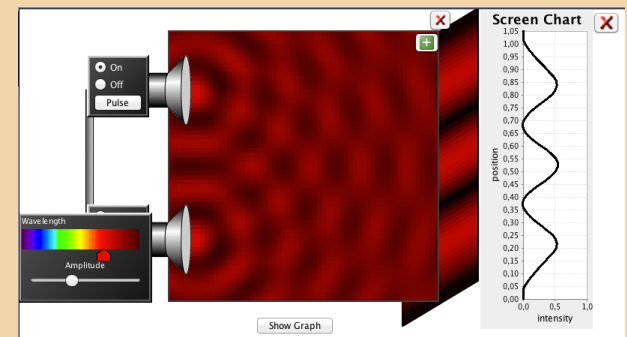
Materiens vågegenskaper

Elektronen - våg eller partikel?



sannolikheten att en elektron träffar ett visst ställe är fördelad som intensitetsfördelningen från en våg som passerat dubbelspalten

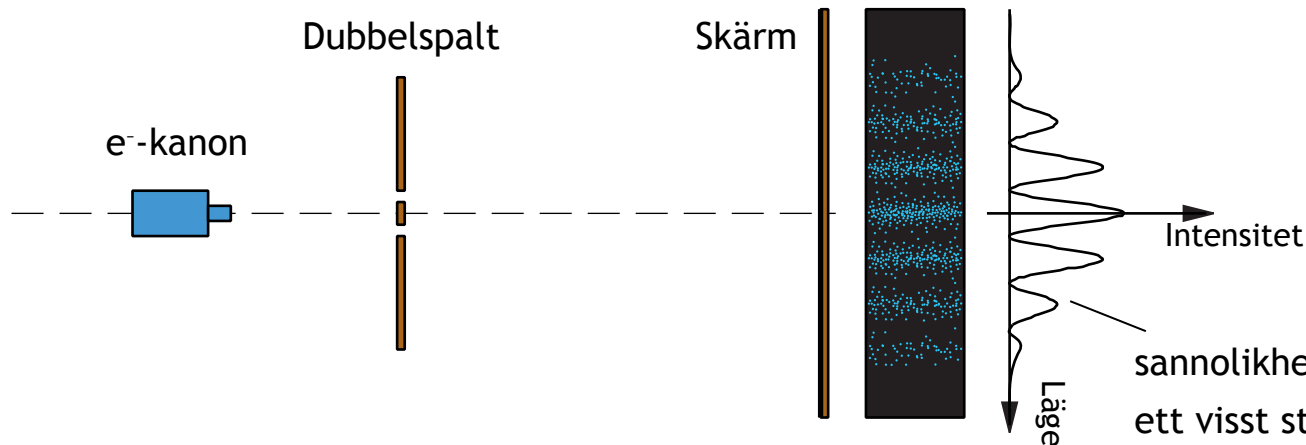
Jämför med ljusinterferens:



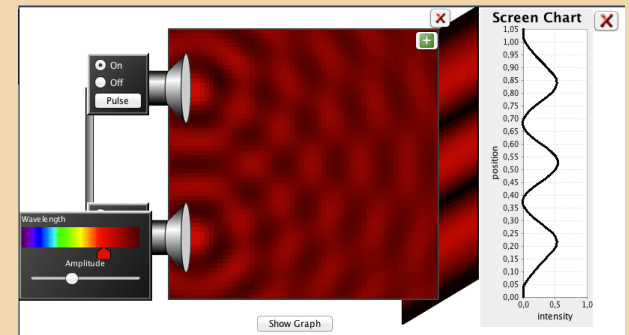
<https://www.youtube.com/watch?v=mhfdwH5Kdbc>

Materiens vågegenskaper

Elektronen - våg eller partikel?



Jämför med ljusinterferens:



sannolikheten att en elektron träffar ett visst ställe är fördelad som intensitetsfördelningen från en våg som passerat dubbelspalten

Ingetdera!

Elektroner - sänds ut och detekteras som partiklar
- sannolikheten att hitta en elektron någonstans beskrivs med en våg



<https://www.youtube.com/watch?v=eCFTVdExxPA>

Kvantmekanik (tidig)

(en formulering av)

I kvantmekaniken (1925-26) beskrivs partiklar med **vågfunktioner** $\psi(x,t)$

Vågfunktionen för en elektron i första skalet i en väteatom (fås om man löser Schrödingerekvationen för väteatomen):

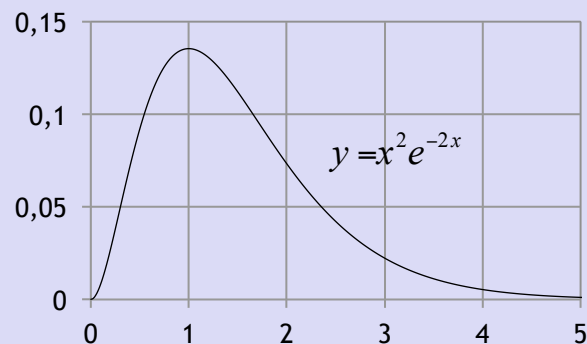
$$\psi_{100}(\mathbf{r}) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{1}{a_0} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{r}{a_0}},$$

där

$$a_0 = \frac{4\pi\epsilon_0\hbar^2}{\mu e^2}.$$

Sannolikheten att hitta elektronen mellan avstånden R_2 och R_1 (från kärnan):

$$P(R_2, R_1) = 4\pi \int_{R_1}^{R_2} r^2 \psi_{100}^2 dr$$



har att göra med sannolikheten
att hitta en partikel i (x, t)



Heisenberg



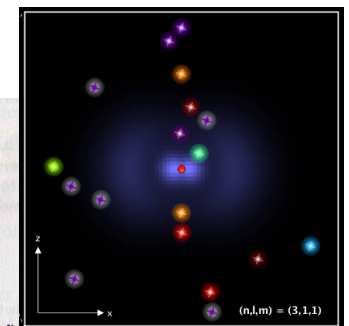
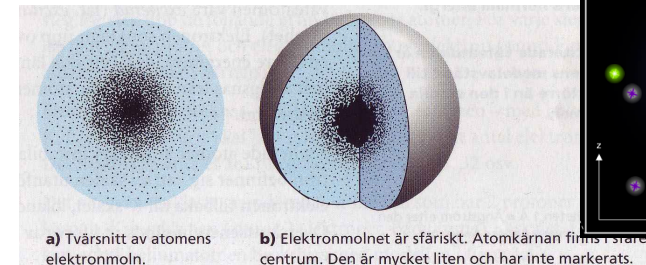
Schrödinger



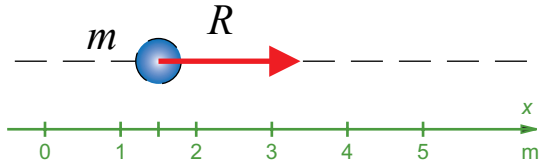
Dirac



Born

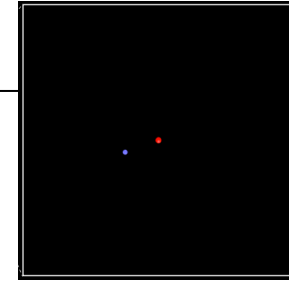


Kvantmekanik (tidig) vs. klassisk mekanik



Lägesfunktion

Newton II



Klassisk mekanik

$x(t)$

$$R = m \frac{d^2x}{dt^2}$$

Representerar omgivningens inverkan

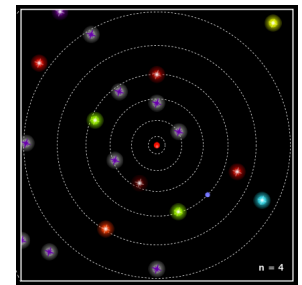
Kvantmekanik

$\psi(x, t)$

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + U\psi$$

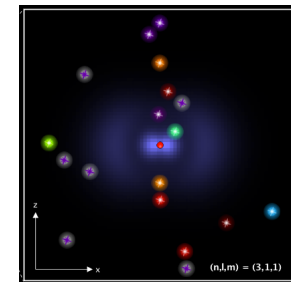
Vågfunktion

Schrödingerekvationen



Sannolikheten att hitta partikeln
mellan x_1 och x_2 :

$$P(x_1, x_2) = \int_{x_1}^{x_2} |\psi|^2 dx$$



Kvantmekanik (tidig)



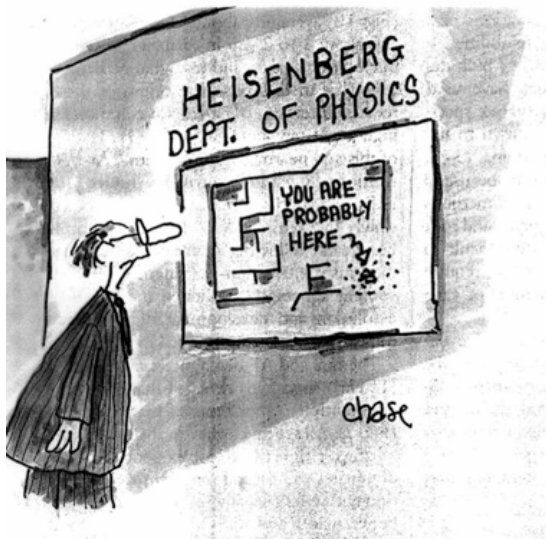
Heisenbergs obestämdhetsrelation

Heisenberg (1927):

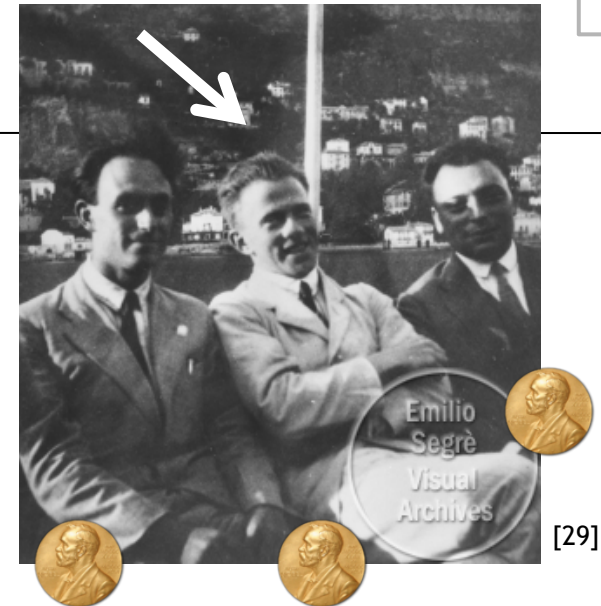
Omöjligt att bestämma en partikels
läge och rörelsemängd samtidigt!

$$\Delta p_x \cdot \Delta x \geq \frac{h}{4\pi}$$

oskärpa i oskärpa
rörelsemängd i läge



[30]



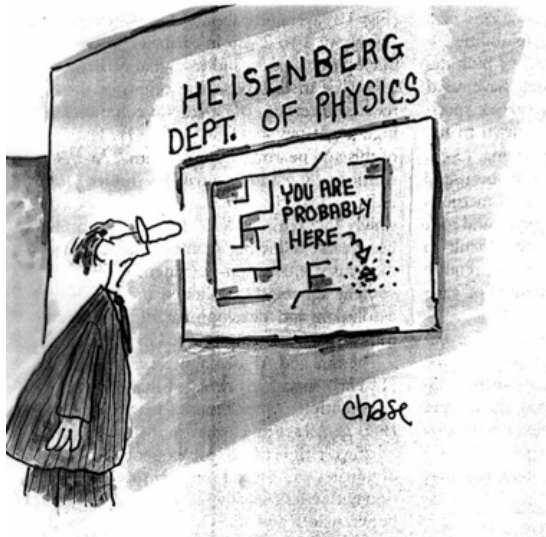
Heisenbergs obestämdhetsrelation

Heisenberg (1927):

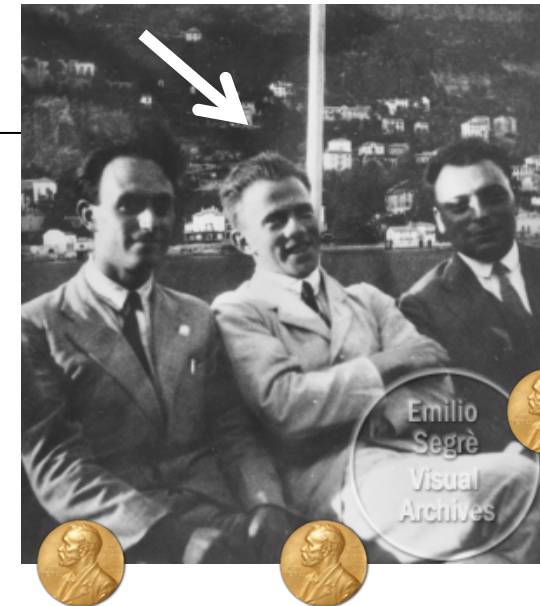
Omöjligt att bestämma en partikels
läge och rörelsemängd samtidigt!

$$\Delta p_x \cdot \Delta x \geq \frac{h}{4\pi}$$

oskärpa i
rörelsemängd oskärpa
i läge



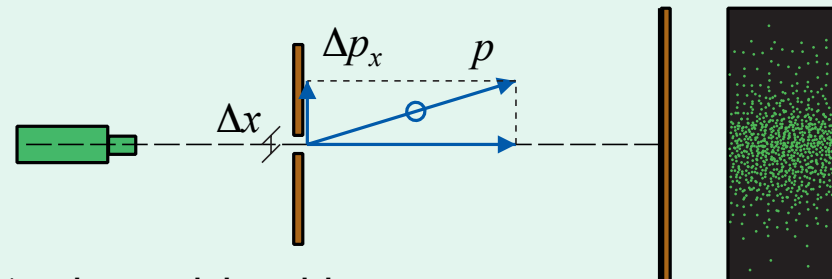
[30]



[29]

Ex: Ljus genom enkelspalt

Använd fotonmodellen och betrakta en foton i
spaltöppningen. Fotonens rörelsemängd är \vec{p}



Minska spaltbredden

→ mindre Δx → större Δp_x

→ mer utsmetad intensitetsfördelning

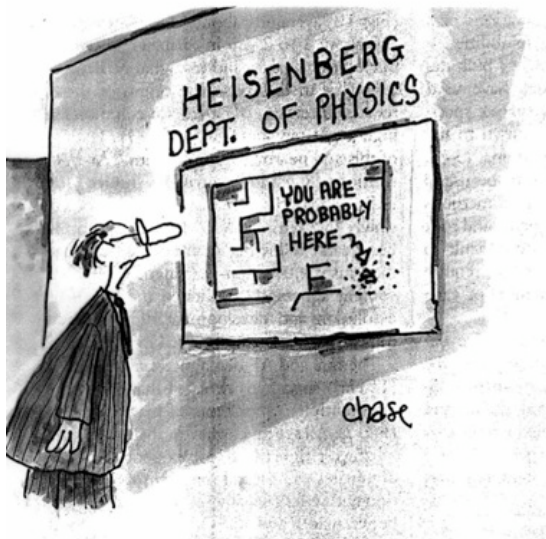
Heisenbergs obestämbarhetsrelation

Heisenberg (1927):

Omöjligt att bestämma en partikels
läge och rörelsemängd samtidigt!

$$\Delta p_x \cdot \Delta x \geq \frac{h}{4\pi}$$

oskärpa i
rörelsemängd oskärpa
i läge



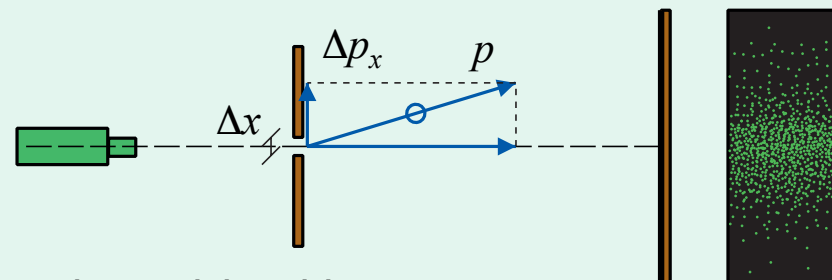
[30]



[29]

Ex: Ljus genom enkelspalt

Använd fotonmodellen och betrakta en foton i
spaltöppningen. Fotonens rörelsemängd är \vec{p}

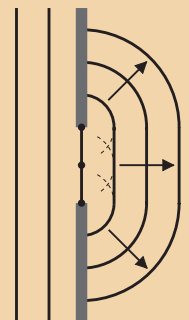


Minska spaltbredden

→ mindre Δx → större Δp_x

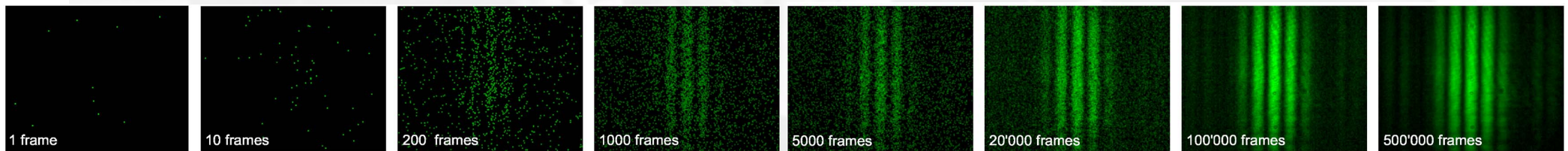
→ mer utsmetad intensitetsfördelning

Jfr vågmodellen:

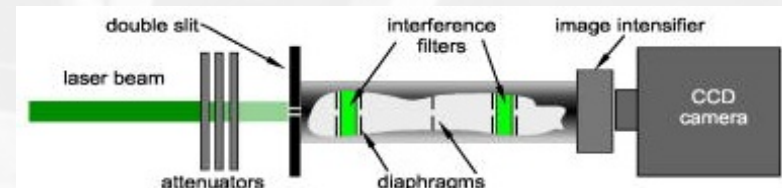


Läget runt 1927

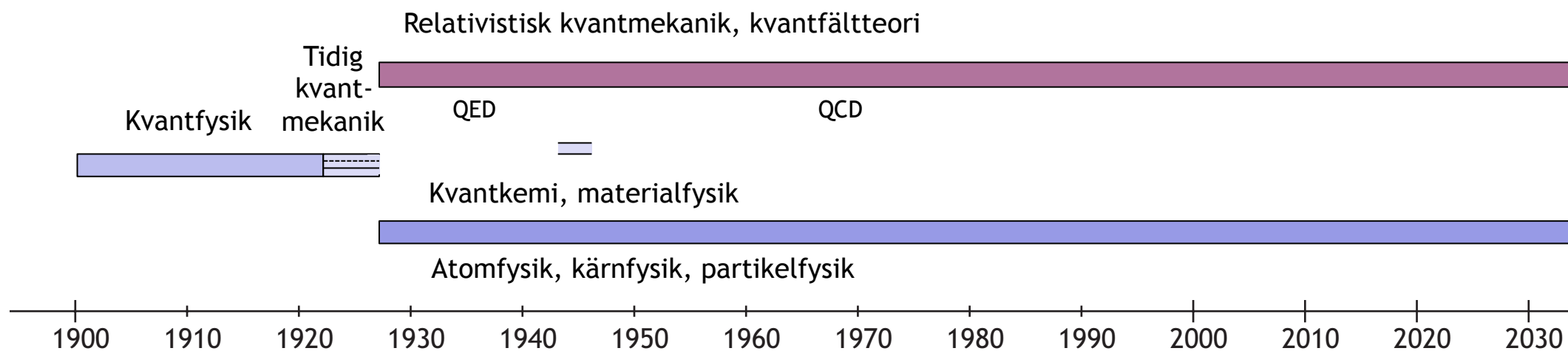
	Partikelegenskaper	Vågegenskaper
Materia	$p = mv$ $W_k = \frac{mv^2}{2}$ $\boxed{R = \dot{p}}$ Ja! (mekanik) $p = \gamma mv$ $E_k = (\gamma - 1)mc^2$	$\lambda = \frac{h}{p}$ $\boxed{i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + U\psi}$ Ja! (kvantmekanik)
Strålning	$p = \frac{h}{\lambda}$ $W = hf$ Ja! (fotonmodellen)	E, B Ja! (elektromagnetism, optik)



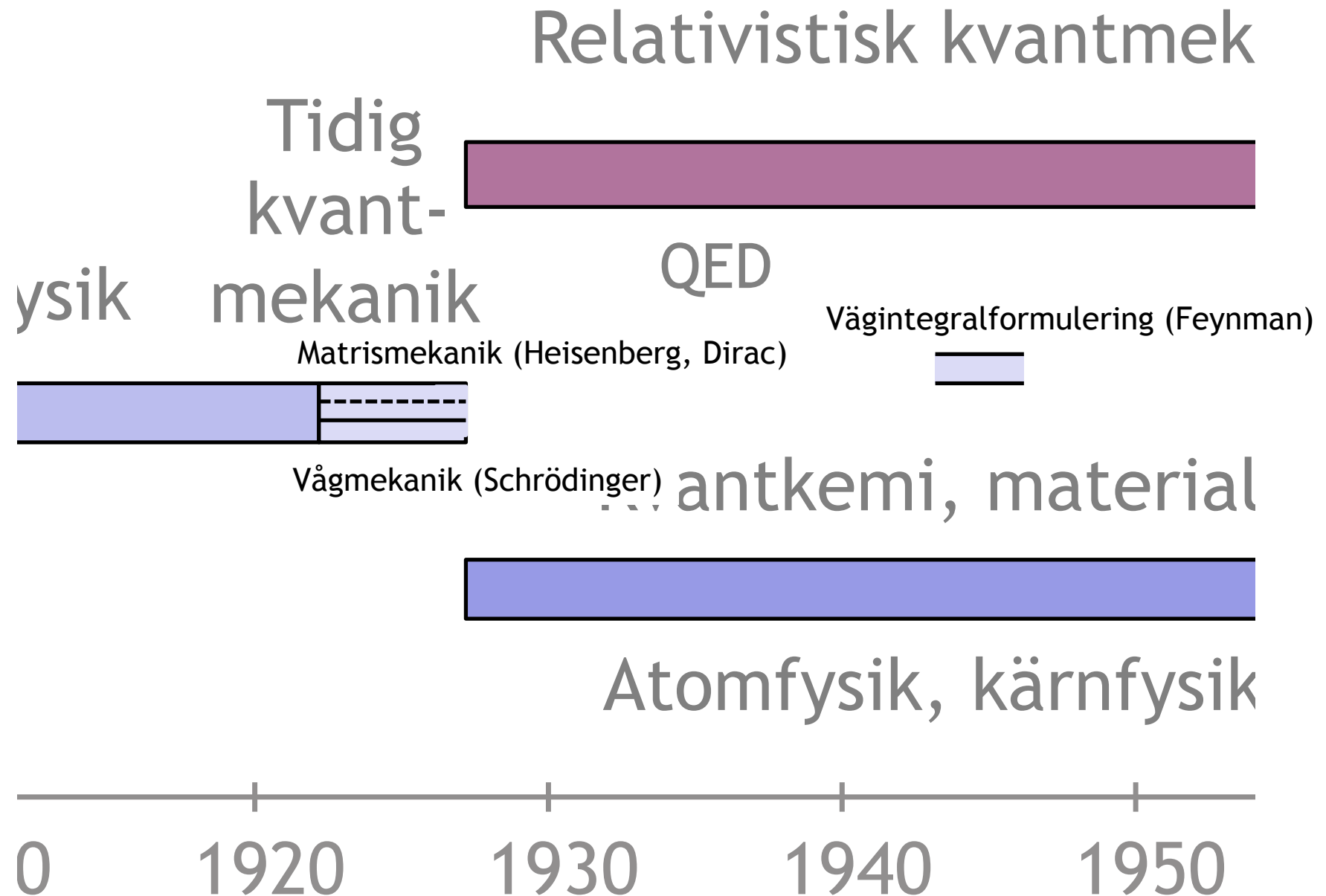
Dubbelspaltexperiment med fotoner (2005)



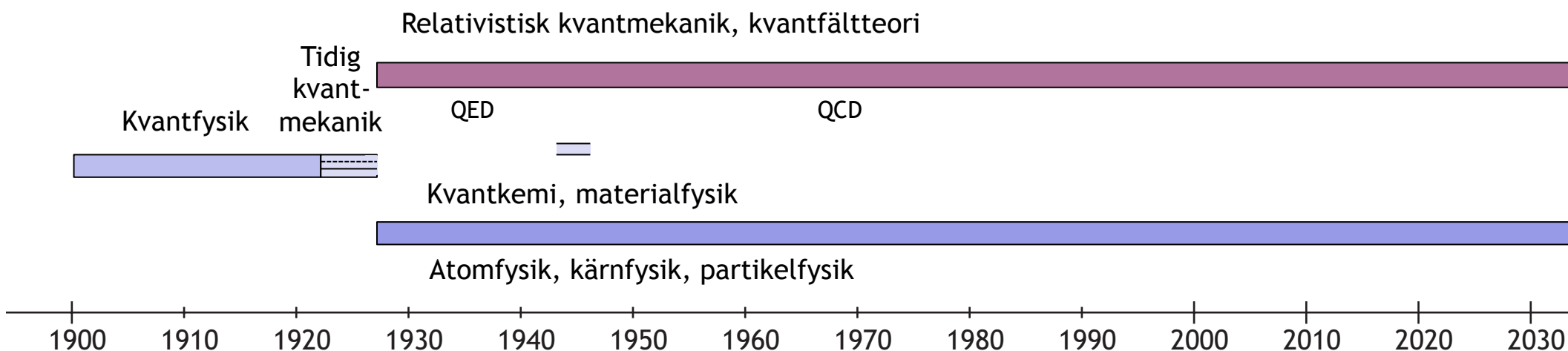
Efter 1927?



Efter 1927?



Efter 1927?



Partikelfysikens standardmodell



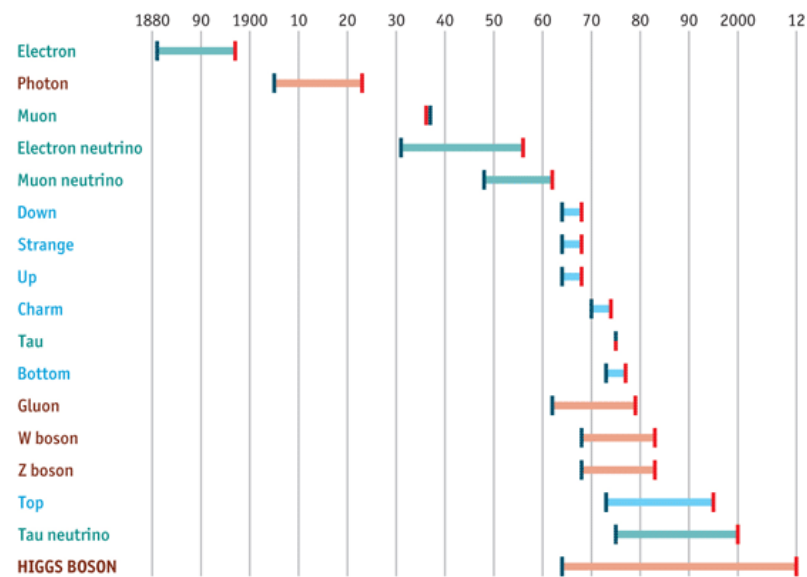
[31]

The Standard Model of particle physics

Years from concept to discovery

Leptons
Bosons
Quarks

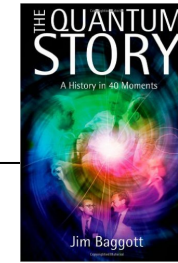
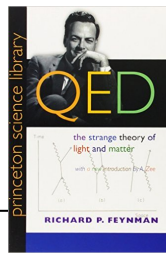
Theorised/explained
Discovered



Source: The Economist

[32]

After 1927?



Relativistisk kvantmekanik, kvantfältteori

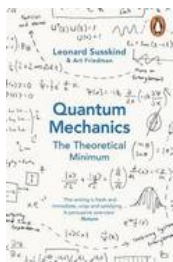
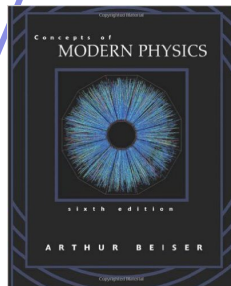
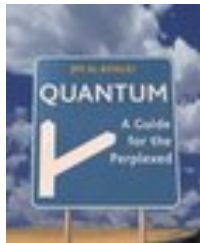
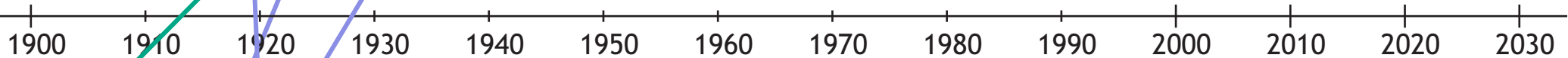
Tidig kvant-
mekanik
Kvantfysik

QED

QCD

Kvantkemi, materialfysik

Atomfysik, kärnfysik, partikelfysik



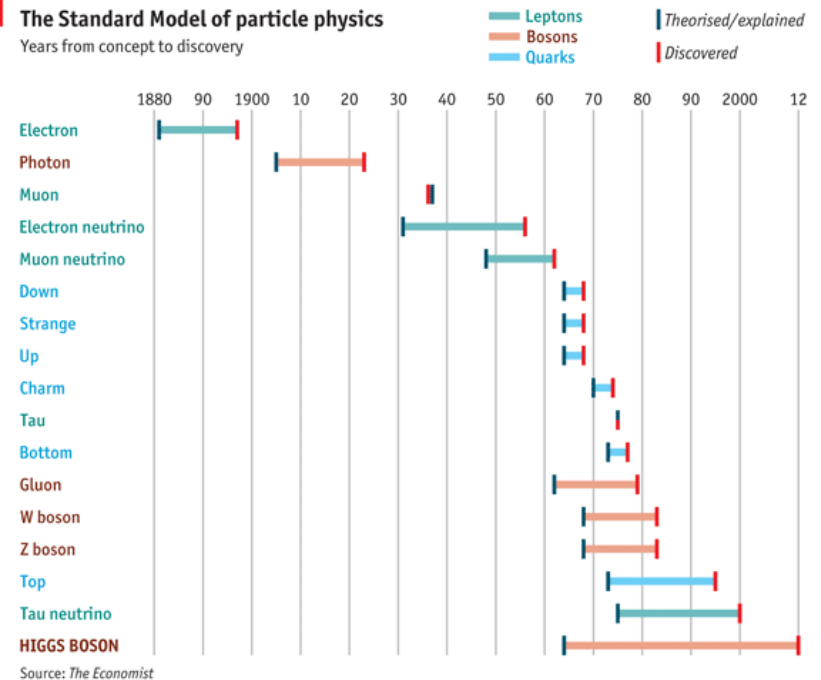
Partikelfysikens standardmodell

Kvarker			
	up	charm	top
Leptoner			
	down	strange	beauty
Bosoner			
	electron	muon	tau
Bosoner			
	neutrino e	neutrino μ	neutrino τ
Bosoner			
	photon	Z ⁰ W ⁺ W ⁻	gluon
Bosoner			
	Higgs	Higgs	Higgs

[31]

The Standard Model of particle physics

Years from concept to discovery

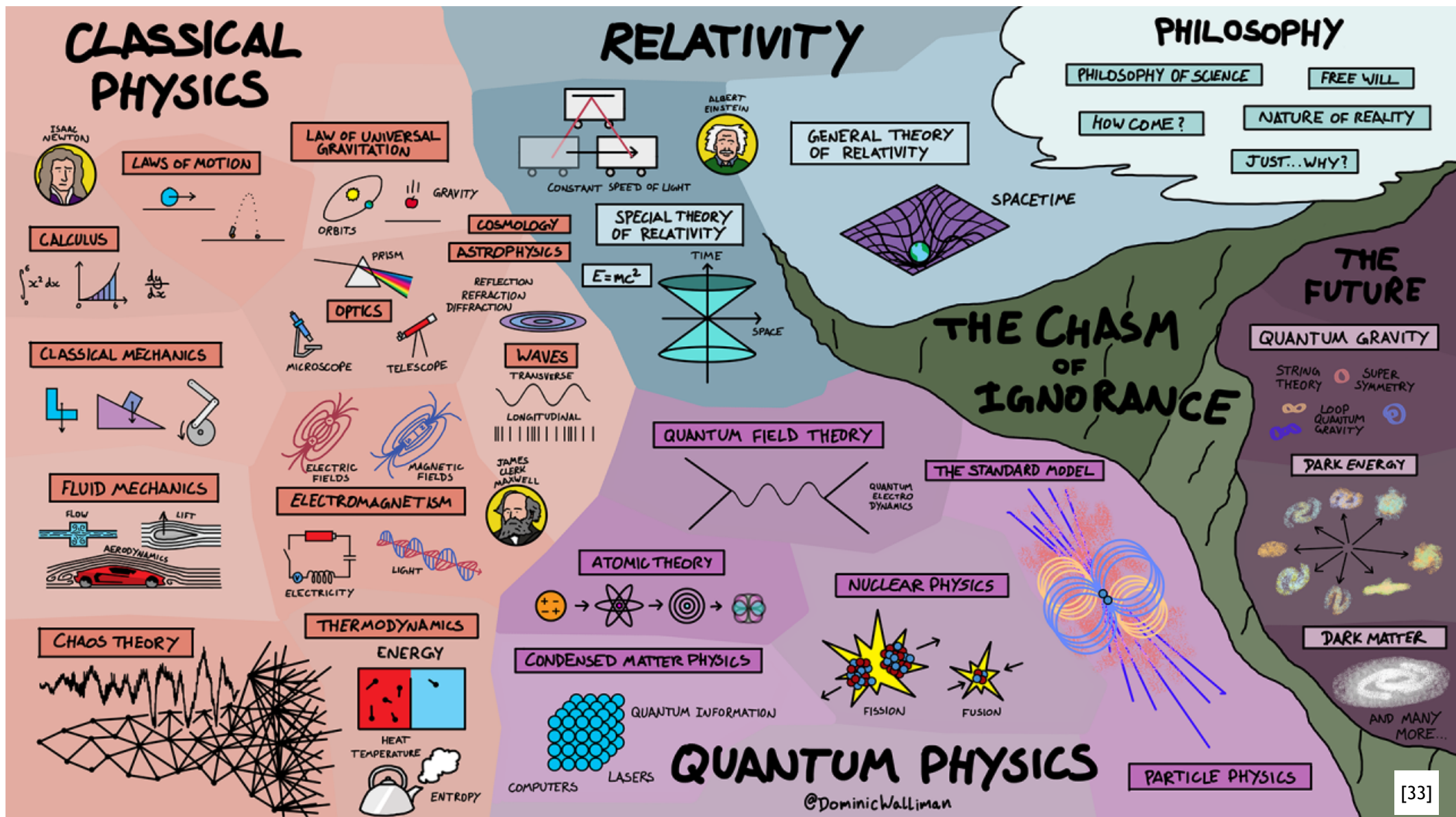


Source: The Economist

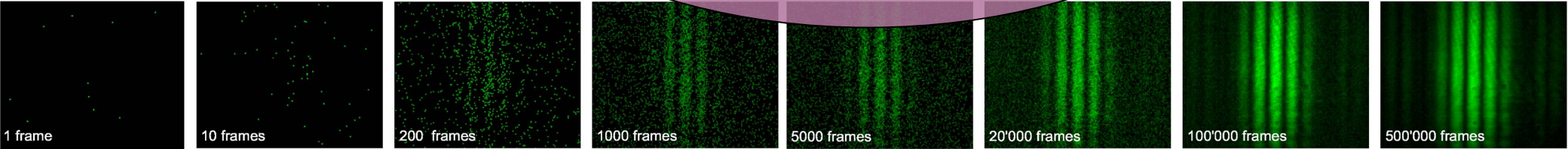
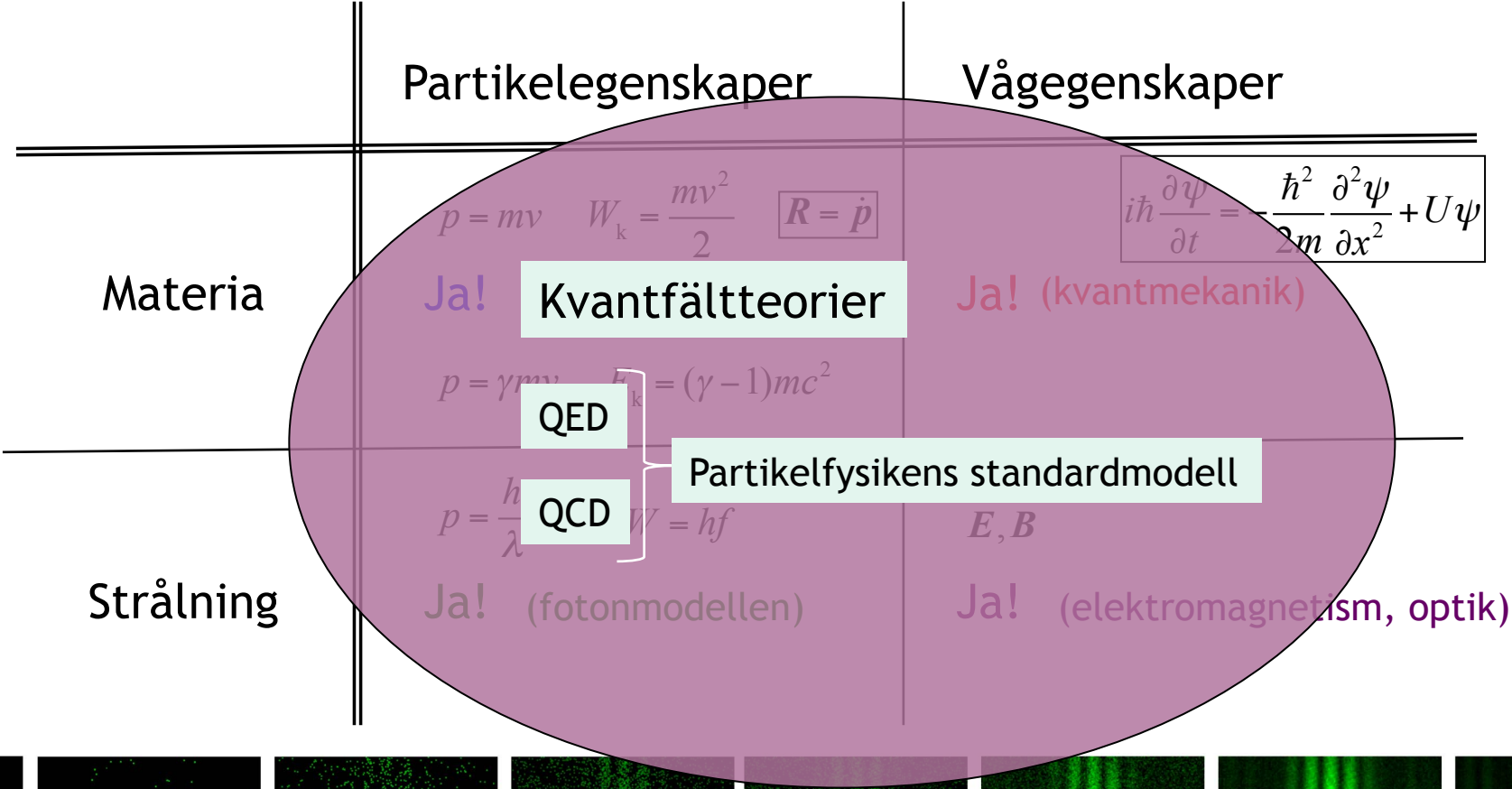
[32]

Läget idag

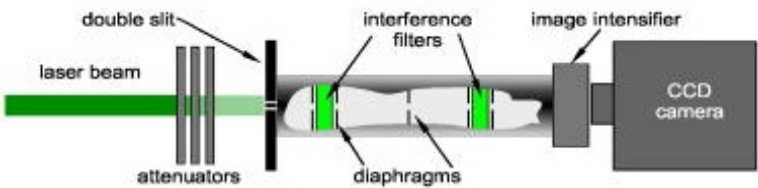
Ett sätt att se på det:



Läget idag



Dubbelspaltexperiment med fotoner (2005)



[9]