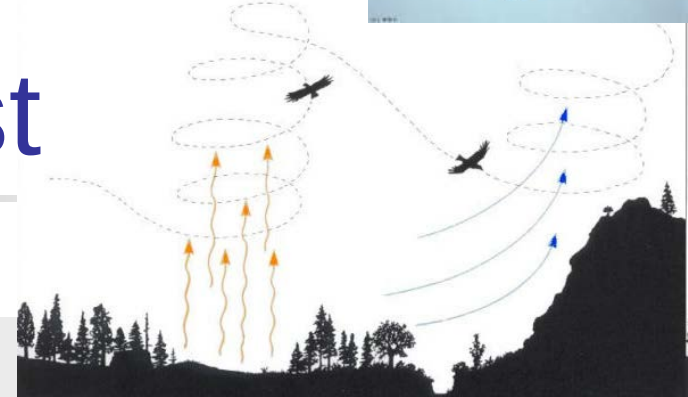


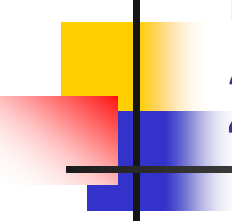
Linnulennuline ülevaade kursusest

- Sissejuhatus
- Matemaatiline põhivara
- Liikumine
- Energia ja entroopia
- Elekter ja magnetism
- Põhiteadmisi kvantfüüsikast
 - Aine ja välja (materie) kvantiseeritus (diskreetsus)
 - Osake-laine duaalsus. Materialained
 - Superpositsiooniprintsiip
 - Mõõtmisprotsess kvantfüüsikas. Heisenbergi määramatuse printsiip
 - Elektronide leiulainete struktuur aatomites

Soaring Flight



- Antud kursuse eesmärgiks on anda ettekujutus molekulaarse (sh bioloogilise) aine ehitusest ja funktsioneerimise üldistest seaduspärasustest
- Bioloogilise füüsika sügavam eesmärk on uurida füüsika põhipostulaatide kehtivust ja asjakohasust bioloogiliste küsimuste lahendamisel



Newtoni füüsika ja 20. saj edasiarendused

■ Erirelatiivsusteooria

- Kui valguse kiirus lugeda lõpmatuks (või kõik muud kiirused sellega võrreldes väga väikeseks) lihtsustub Newtoni mehaanikaks

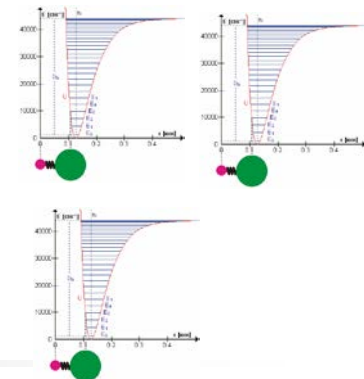
■ Üldrelatiivsusteooria

- Kui massid lugeda väikesteks, lihtsustub erirelatiivsusteooriaks

■ Kvantmehaanika

- Kui Plancki konstant lugeda 0-ks, kaovad kvantmehaanilised efektid (Plancki konstandist räägime edaspidi lähemalt)

Ühe osake ja ühe jõuga maailmas poleks elu



- Tänapäeva füüsika eristab 4 stabiilset osakest

- Prooton
- Neutron
- Elektron
- neutriino

ja 4 fundamentaalset jõudu **Mis need on?**

- Newtoni füüsikas on enamik mõisted absoluutsed (muutumatud), sh aeg, ruum, kehade mass, kehade mõõtmed jne
- Tegelikult (st tänase füüsikateaduse valguses) ilmnevad objektide omadused suhetes (interaktsioonides) teiste objektidega
 - Lihtne näide: metronoomide (pendlite) sünkroniseerimine. **Miks?**
<https://www.youtube.com/watch?v=5v5eBf2KwF8>
- Sellest tuleneb meid ümbritsevate nähtuste pea lõpmatu mitmekesisus
- Interaktsioonidest sõltuvus avaldub kõige drastilisemalt kvantfüüsikas

Newtoni maailm on kurvalt elutu

- Eluks vajalikud tingimused
 - Erinevate stabiilsete aatomite olemasolu
 - Klassikalise füüsika valguses seletamatu, seletab kvantfüüsika
 - Aatomeid peab universumi arenedes juurde tulema
 - Vajalik tähtede olemasolu, kus elemente tuumasünteesi käigus sünteesitakse
 - Kaosest peab tekkimine kord
 - Vajalik madala entroopiaga energia pidev juurdevool - Universumit peab täitma valgus (tähed)



Mis jooned need on?

Kvantfüüsika ("uus füüsika")

■ Kvantfüüsika tekkis kuhjuvate vastuolude tõttu katseandmete ja klassikalise füüsika poolt pakutavate seletuste vahel

- Musta keha kiirgus (Planck 1900; Planck oli Boltzmanni õpilane)
- Fotoefekt (Einstein 1905)
- Tahkiste soojusmahtuvus (Einstein 1906): tahkiste kvantteooria
- **Osakeste** laineomadused (de Broglie 1924)
- (Teatud) füüsikaliste suuruste üheaegse täpse mõõtmise võimatus (Heisenberg 1927)
- Vaatamata oma üle 100-aastasele ajaloole on kvantfüüsika siiani täis vastuolusid ja **paradokse**
 - **Paradoks** on **näiliselt** mõistusevastane väide või nähtus



1871. a ennustas James Clerk Maxwell (1831-1879):
*In a few years, all the great physical constants will have been approximately estimated, and the only occupation which will be left to **the men of science** will be to carry these measurements to another place of decimals.*

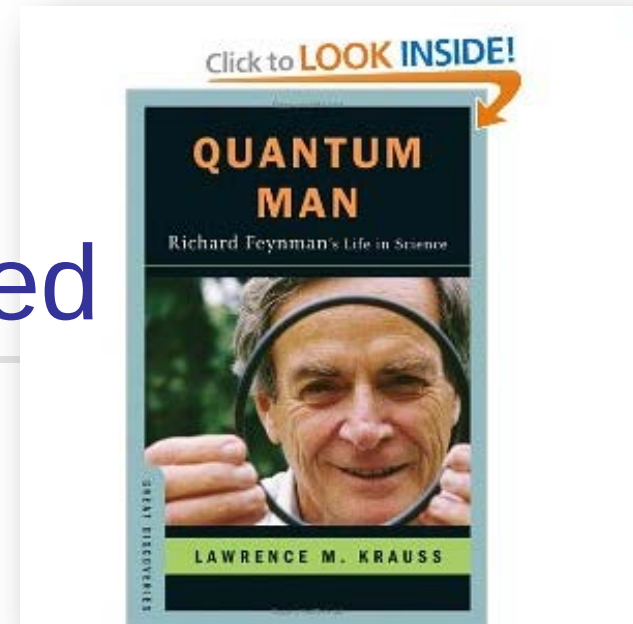
Kvantnähtused ja tavakogemus on üksteisega raskesti seostatavad

- Ebastabiilsete kvantolekute eluiga väheneb mõõtmise käigus:
“Jälgitud tee läheb kiiremini keema”



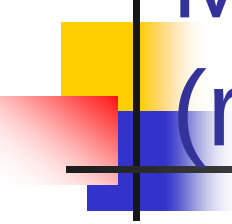
Kvantmehaanika vastuolulised küsimused

- Kas me tõesti tekitame reaalsust oma suva järgi?
 - Einstein: Kas Kuu eksisteerib üksnes seepärast, et hiir teda vaatab?
- Kas robot samuti toodab reaalsust?



I think I can safely say that nobody understands quantum mechanics.

Richard Feynman
(1918-1988)- kvant-
elektrodünaamika rajajaid



Miks me kvantefekte igapäevaelus (reeglina) ei märka?

- **Energia diskreetsus:**
Kõikvõimalike perioodiliste liikumistega seotud energiaportsjonid on küll olulised mikromaailmas, kuid makromaailmas, kus domineerivad suured massid ja energiad, on neid väikeseid kvante raske märgata
 - Plancki konstant ~ 0
- **Dekoherents:**
Paljust osakesest koosnevates süsteemides keskmistub enamus kvantefekte välja
- Biomaterjalide kvantefektide jälgitavus on seetõttu **ruumis** (ruumiline lokalisatsioon) piiratud vaid mõne nm ning **ajas** (ajaline koherents) mõne kuni mõnesaja fs

LASER: Oluline makroskoopiline kvantfüüsika rakendus



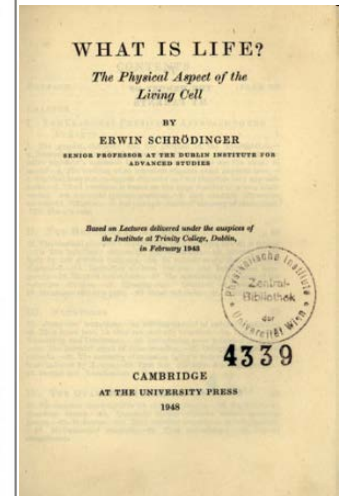
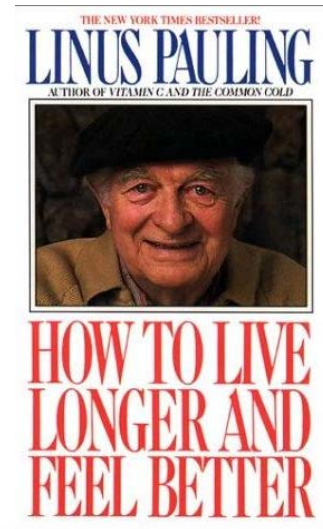
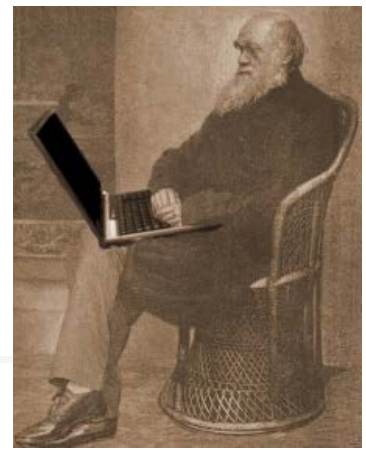
Kohe-kohe
on tulemas
kvantarvutid

Henn Käämbre laseriloengu faili leiata siit:

http://www.fi.ut.ee/orb.aw/class=file/action=preview/id=546051/Laser_2009.pdf

Mis see meisse puutub?

- Frank, Teller, Oppenheimer: eksitonid fotosünteesis 1938-1942
- Schrödinger: What is Life? 1944 (Eestikeelne tõlge 2014)
- Pauling: valkude ehituse kvantmehhaaniline mudel 1951
- N. Bohr Atomic Physics and Human Knowledge, 1957
- Fröhlich: koherentsed ergastused bioloogias 1968
- Davõdov: solitonid bioloogias 1979
- Quantum Secrets of Photosynthesis Revealed (April 12, 2007)
- Abbot et al. Quantum Aspects of Life. Imperial College Press, 2008
- Al-Khalili, McFadden Life on the Edge. The Coming of Age of Quantum biology. Penguin Random House 2014



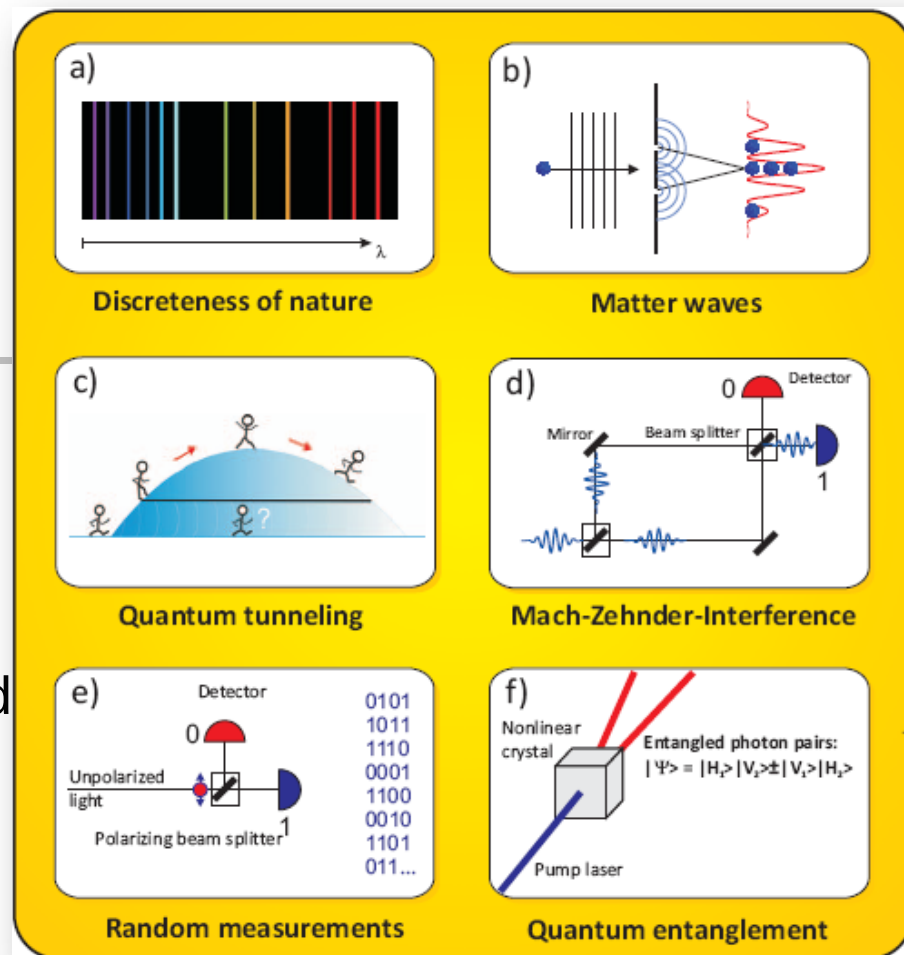
PHYSICAL BIOLOGY: EN ROUTE TO QUANTUM BIOLOGY?

Arvi Freiberg 2011

Complex relationships between the quantum realms of molecular processes and the classical world of living organisms are outlined. Recent validation of the survival of photosynthetic excitons at functional temperatures is yet another example bridging the gap between quantum physics and biology.

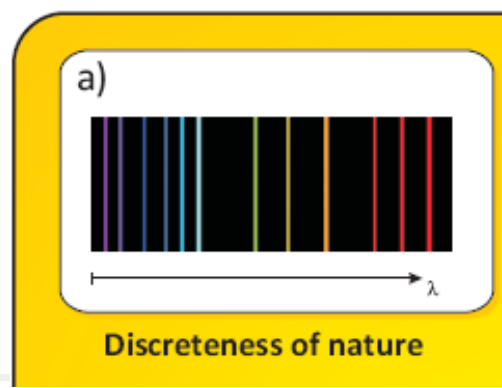
Kvantfüüsika “näpujälgi”

- **Aine/energia diskreetsus:** Piiratud liikumisulatuses süsteemi energia on diskreetne. Kvantmaailm on oma olemuselt digitaalne!
- **Laine-osake duaalsus:** Mateerialained
- **Superpositsiooniprintsiip ja olekute põimumine:** Üksteist välistavate (ortogonaalsete) olekute koosseksistents
- Osakeste **kvant-tunneleerimine**
- Kvantsüsteemi **mõõtmise tulemus on tõenäosuslik:**
 - See teooria aspekt näis paljusid teadlasi, sh Einsteini, kõige enam häirivat (kas objektiivne reaalsus või subjektiivselt puudulik teave maailma kohta?)
 - Seda vaatamata sellele, et Boltzmann leidis juba 1860. paiku, et ka klassikaliste süsteemide dünaamika on tõenäosuslik (statistiline mehaanika)



HFSP Journal 3 (2009) 386

Atomismi (kvantiseeritud aine) idee areng



- Feynmani arvates üks inimkonna kõige olulisemaid teadmisi
- Aatomite (kuid mitte molekulide) omadused on invariantsead
- Vanade kreeklaste **aatom** (kr *atomos* tähendab jagamatu)
- Postuleeris ~440 BC Lucippus, edasi arendas tema õpilane Demokritos (460-370 BC)
- Atomismi idee unustati pea 2300 aastaks, kuni Maxwell, Boltzmann, Gibbs, Einstein jt selle uuesti avastasid
- Siiski, vahepeal rääkis Newton (17. saj) **valguskorpuskulidest**
 - Seegi idee unustati ~300 aastaks, sest Huygensi interferentsikatsed veensid kõiki, et valgus on lainetus
- Daniel Bernoulli (1700-1782) arendas gaaside rõhu teooria lähtudes väikeste nähtamatute osakeste liikumisest
- Maxwelli ja eriti Boltzmanni gaaside kineetiline teooria (19. saj II pool)
- Einsteini Browni osakeste teooria (1905) ja Jean Perrin'i katsed (1908) kinnistasid idee lõplikult
 - Nobeli füüsikapreemiad vastavalt 1921. ja 1926. a

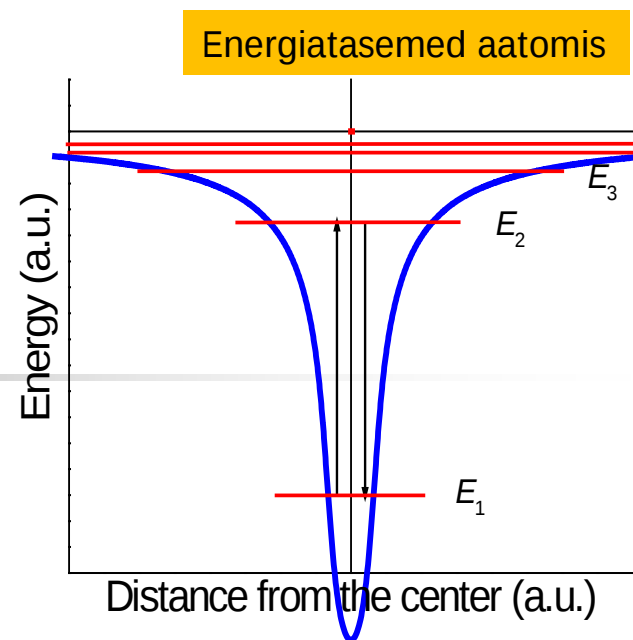
Energiakvandid: Üldistus

- Kõik perioodiliste protsessidega (võnkumised, lained) ja piiratud ruumis toimuvate liikumistega seotud energiad on kvantiseeritud

$$\Delta E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

Sagedus: $\nu = \frac{c}{\lambda}$

$$\nu\lambda = c$$



- Vastavad energiaportsjonid on imepisikesed, sest mõjukvant h (mis on maailmakonstant, st ei sõltu taustsüsteemist) on väga väike:
 $h=6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$
- Plancki konstant on kvantmehaanika põhikonstant
- Plancki konstant on üks kolmest fundamentaalsest maailmakonstandist (ülejäänud kaks on c , G)

Energia mõiste evolutsioon

- Faraday & Maxwell:
Väli omab energiat.
Igasugust objekti energiat
tuleb käsitleda koos temaga
seotud väljaga, kusjuures
kehtib seos (energia jäävuse
seaduse üldistus)

$$E(\text{aine}) + E(\text{väli}) = \text{const}$$

- Einstein:
Mass ja energia on omavahel
seotud

$$E = mc^2$$



Max Planck Albert Einsteinile omanimelist medalit annetamas (Berliin 28. juuni, 1929)

- Planck & Einstein:
Energia pole pidev, vaid
esineb portsjonitena

$$E = h\nu$$

Aeg-ruumi diskreetsust iseloomustavad Plancki suurused (kombinatsioonid maailmakonstantidest)

$$\hbar = \frac{h}{2\pi}$$

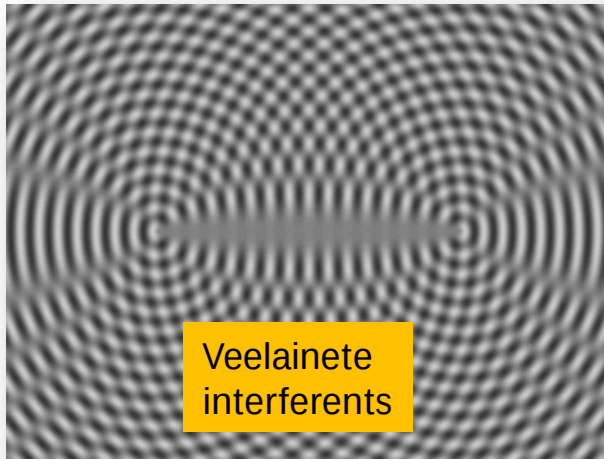
- Plancki aeg
 - Kõige väiksem võimalik mõõdetav ajavahemik
- Plancki pikkus
 - Kõige väiksem mõõdetav kaugus kahe punkti vahel
- Plancki energia
 - Kui nii palju energiat koguneb Plancki pikkusega määratud sfääri, tekib sinna must auk
Sellest ka teatud hirmud seoses LHC eksperimendiga

$$t_P \equiv \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}} \approx 5.39124(27) \times 10^{-44} \text{ s}$$

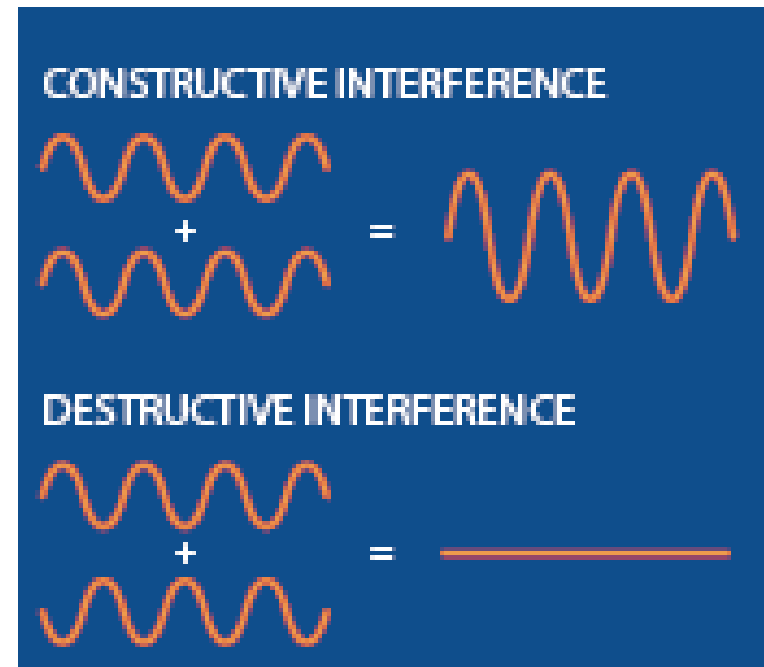
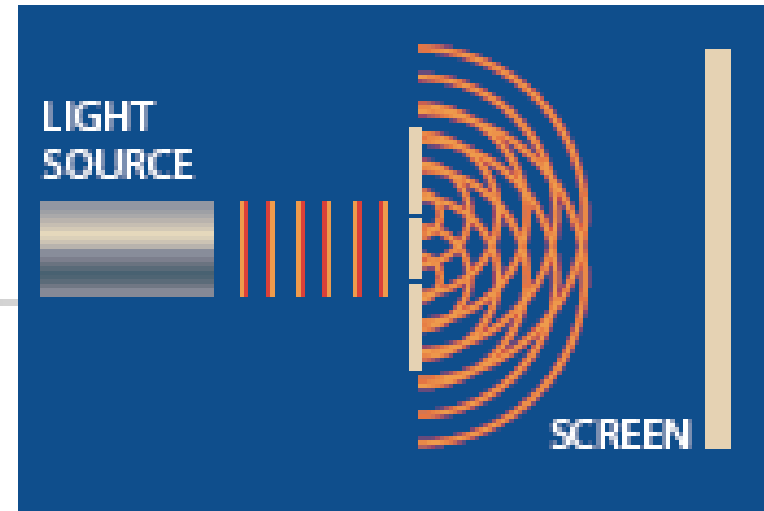
$$\ell_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} \approx 1.616252(81) \times 10^{-35} \text{ m}$$

$$E_P = \sqrt{\frac{\hbar c^5}{G}} \approx 1.956 \times 10^9 \text{ J}$$

Duaalsus: Valgus kui laine (interferents)



- Ühesuguse märgiga faaside puhul leiab aset võnkumise tugevnemine ehk **tõusuinterferents**
- Vastasfaaside puhul summaarne laine nõrgeneb - siis räägime **mõõnainterferentsist**
- Et lained saaksid omavahel interfereeruda, peavad nende faasid üksteise suhtes püsivad olema



Osake-laine duaalsus:

Valgus kui osake

- Kehtib üldine (nii aine kui välja jaoks) seos energia E , impulsi p ja osakeste seisumassi m vahel (Einstein, 1905)

$$\frac{E^2}{c^2} = p^2 + m^2 c^2$$

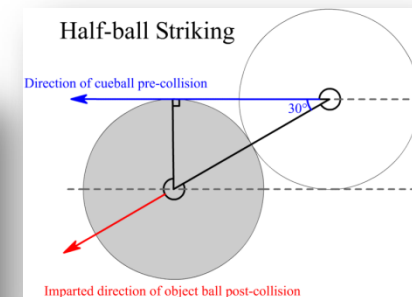
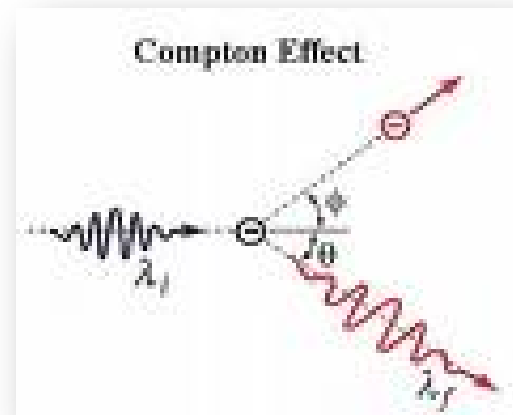
Seisumassita ($m = 0$) osake:

$$E = cp$$

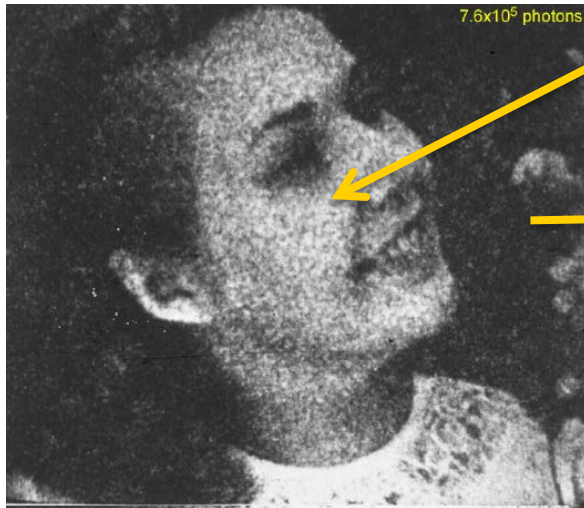
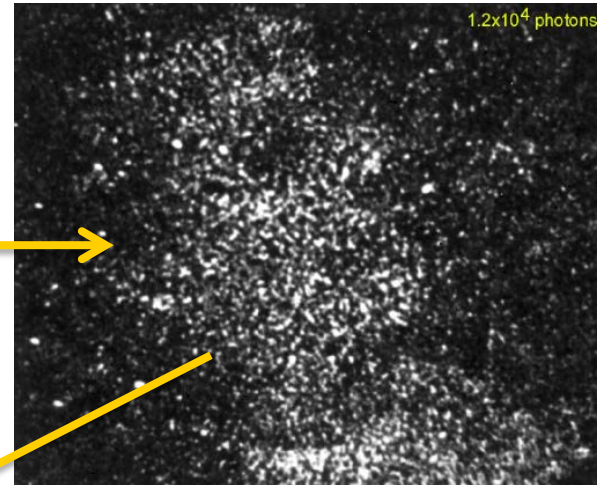
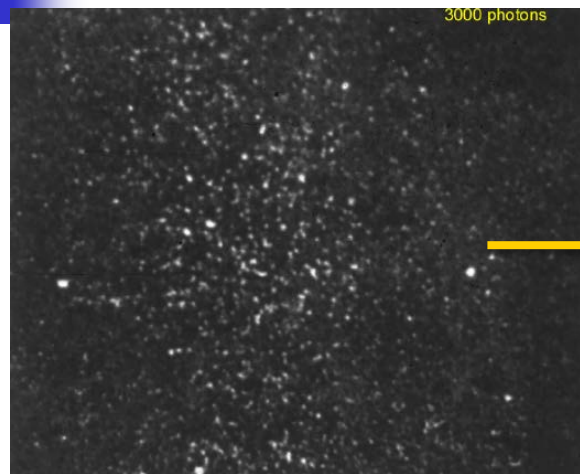
Paigalseisev ($p = 0$) osake:

$$E = mc^2$$

- A. H. Compton avastas (1922), et **footonid** hajuvad **elektronidelt** täpselt samuti nagu põrkuksid omavahel piljardikuulid



Valgus kui osake: Nõrka valgust registreerides näeme, et ta koosneb osakekestest



Osake-laine duaalsus:

Seisumassi omava aine laineomadused

- Kui seisumassi mitteomavatel footonitel (ja vastavatel lainetel) on impulss (ringpolariseeritud valgusel ka impulssmoment), siis võiks seisumassiga osakestel, mis liiguvad valguse kiirusest väiksema kiirusega, omakorda olla lainelisi omadusi
- See on Louis de Broglie hüpotees (1924), mis seadis impulsiga $p=mv$ liikuvale elektronile vastavusse impulssi $p=E/c$ omava laine
 - Selle teesi püstitas de Broglie oma doktoritöös, mis oleks äärepealt põhjastanud töö läbikukkumise. Poisi päästis vaid Einsteini toetus.

Seisumassi omava
osakese impuls

$$p = mv$$

Seisumassita välja
osakese impuls

$$p = \frac{E}{c}$$

$$mv = \frac{E}{c}$$

Asendades $E = hv$ ja $v = c / \lambda$

$$\text{saame: } p = \frac{hv}{c} = \frac{h}{\lambda} = hk$$

$$k = \frac{1}{\lambda} \text{ on lainevektor}$$

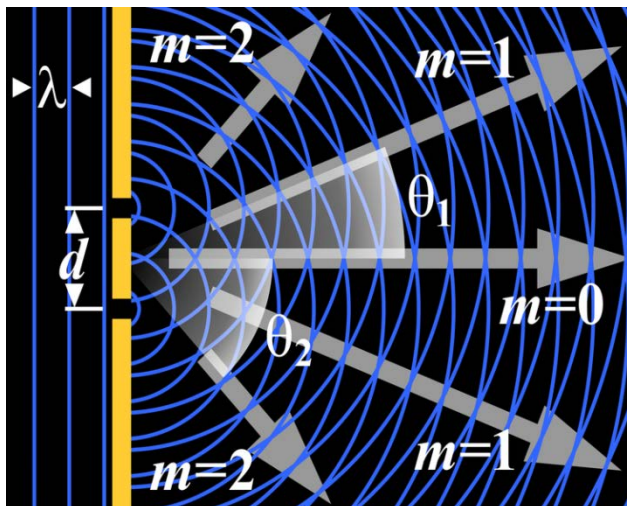
$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h}{p}$$

Mateerialainete λ on pöörd –
võrdeline tema impulsiga

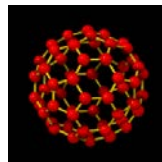
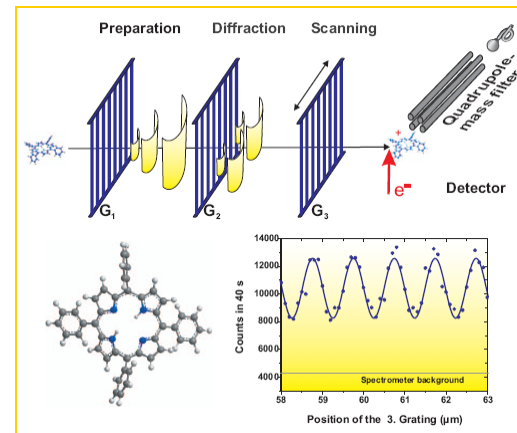


de Broglie hüpoteesi tõestus

- Elektronide difraktsiooni ja interferentsi avastasid 1927. a C. Davisson ja L. Germer ning sõltumatult G. Thomson (elektroni avastaja Joseph Thomsoni poeg)

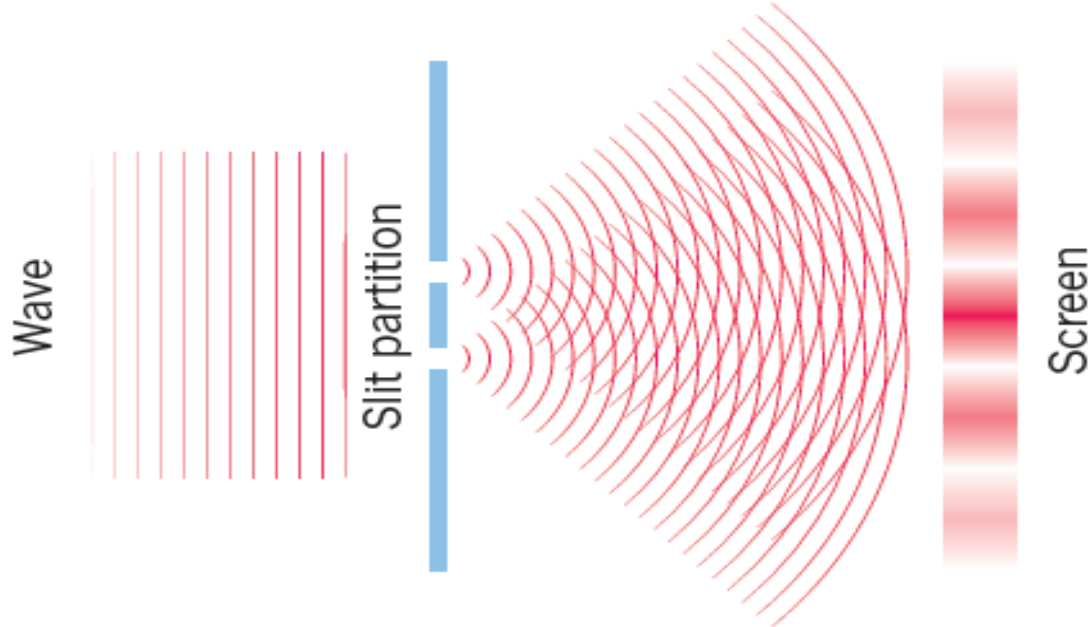


- Tänaseks on kvant-interferentsi jälgitud
 - aatomitel
 - (bio)molekulidel (A. Zeilingeri grupp 2003)
 - Bose-Einsteini kondensaatidel (kuni 10^6 aatomit)
- Järge ootavad viirused ja bakterid, kus on $>10^9$ aatomit



1999

2003

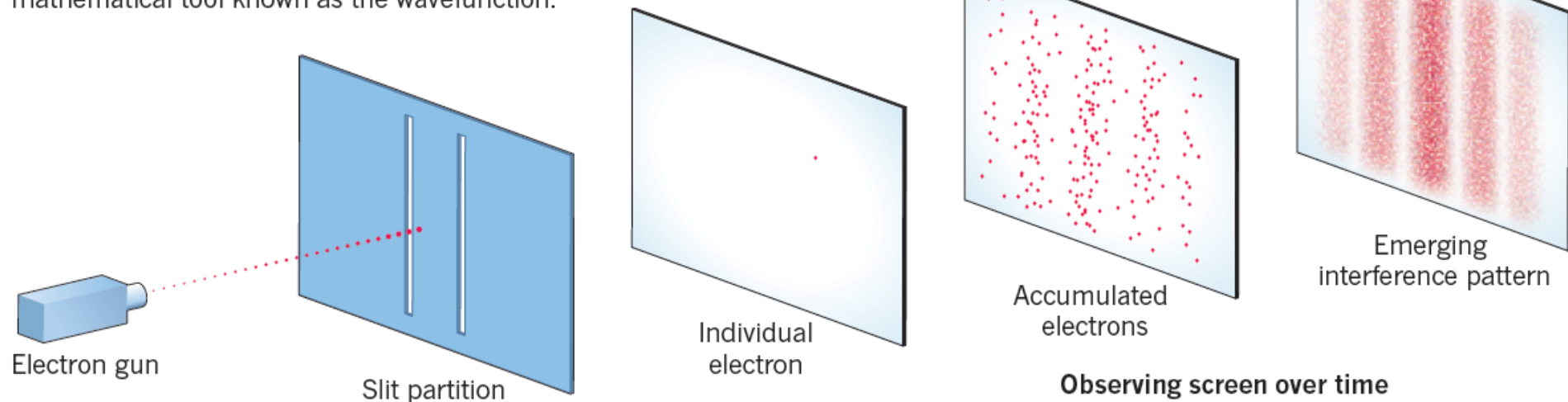


Kahe pilu katse
lainete ja oskeste
puhul

Suure arvu katsete tulemus näeb
välja nagu oleks mõõdetud
pidevat lainet, kuid igas üksikus
mõõtmises avaldub osakesena

WAVE - PARTICLE WEIRDNESS

When quantum objects such as electrons are fired one by one through a pair of closely spaced slits, they behave like particles: each one hits a screen placed on the far side at exactly one point. But they also behave like waves: successive hits build up a banded interference pattern exactly like that generated by a wave passing through the slits (right). This wave-particle duality is described by a mathematical tool known as the wavefunction.

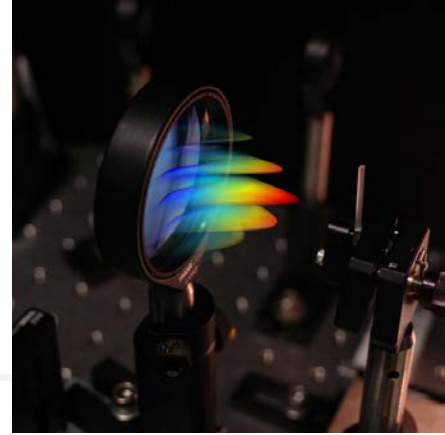




Kvant- ehk lainemehaanika

- Energia on kvantiseeritud (Planck, Einstein, Bohr)
- Osakestel on laineomadused (de Broglie mateerialained)
- Kvantmehaanilise osakese liikumist ei saa kirjeldada üheselt määratud trajektooriga nagu klassikalise (suure massiga) osakese oma
- Parim, mida me siis osakese kohta teada võime on tema lainefunktsioon (E. Schrödinger)
- Öeldakse, et osakest kirjeldab lainefunktsioon, mille mooduli ruut annab tõenäosuse tiheduse leida osakest antud ruumipunktis ja antud ajahetkel
 - tõlgendus pärineb Max Bornilt
- Juhuslikkus on seega looduse fundamentaalne omadus!

Lainefunktsioon ja tema tõenäosuse tihedus



The wavefunction of a photon, containing all the information about it at any given time.
Courtesy: Lundeen & Bamber

- Lainefunktsioon (ei oma füüsikalist informatsiooni)

$$\Psi = \Psi(x, y, z, t)$$

- Tõenäosuse tihedus on normeeritud üle ruumi ja aja

$$\begin{aligned} |\Psi|^2 \\ \Psi^2 dV dt \\ \iint \Psi^2 dV dt = 1 \end{aligned}$$

- Lainefunktsiooni teades on põhimõtteliselt võimalik välja rehendada kõik süsteemi iseloomustavad füüsikalised karakteristikud (sh tema energia, impulss, pöördimpulss, kuju ruumis jne)
- Tehniliselt mõttes polegi kvantmehaanika midagi muud, kui võtete kogum antud süsteemi iseloomustava lainefunktsiooni leidmiseks

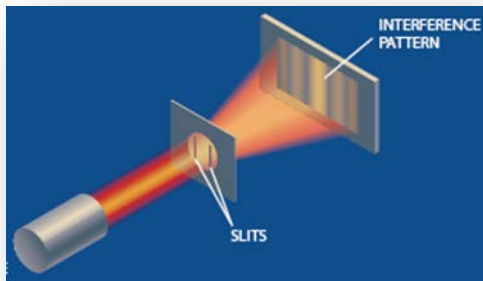
$$|\Psi\rangle = a_1|\Psi_1\rangle + a_2|\Psi_2\rangle + \dots a_n|\Psi_n\rangle = \sum_i a_i|\Psi_i\rangle$$

Thomas Young 1773-1829



Superspositsiooniprintsiip

- Superpositsiooniprintsiipi kajastab hästi kahe pilu katse (Young 1801)
 - Richard Feynman: See on kvantfüüsika, kui mitte kogu füüsika, kõige olulisem katse!
- NB! Interferents tekib ka üheainsa footoni korral
- Oluline, on et eksisteerib mitu sõltumatut levimise teed (võimalust)



- Schrödinger toob siin näite kassi (makroskoopiline objekt) võimalike olekute

superpositisioonist



- Klassikalise füüsika järgi saab kass olla kas elus või surnud
- Kvantmehhaanika ütleb, et me ei tea, mis seisus ta tegelikult on, enne kui me täpselt järele ei uuri, st ei tee katset
Alles katse järel selgub tõde.

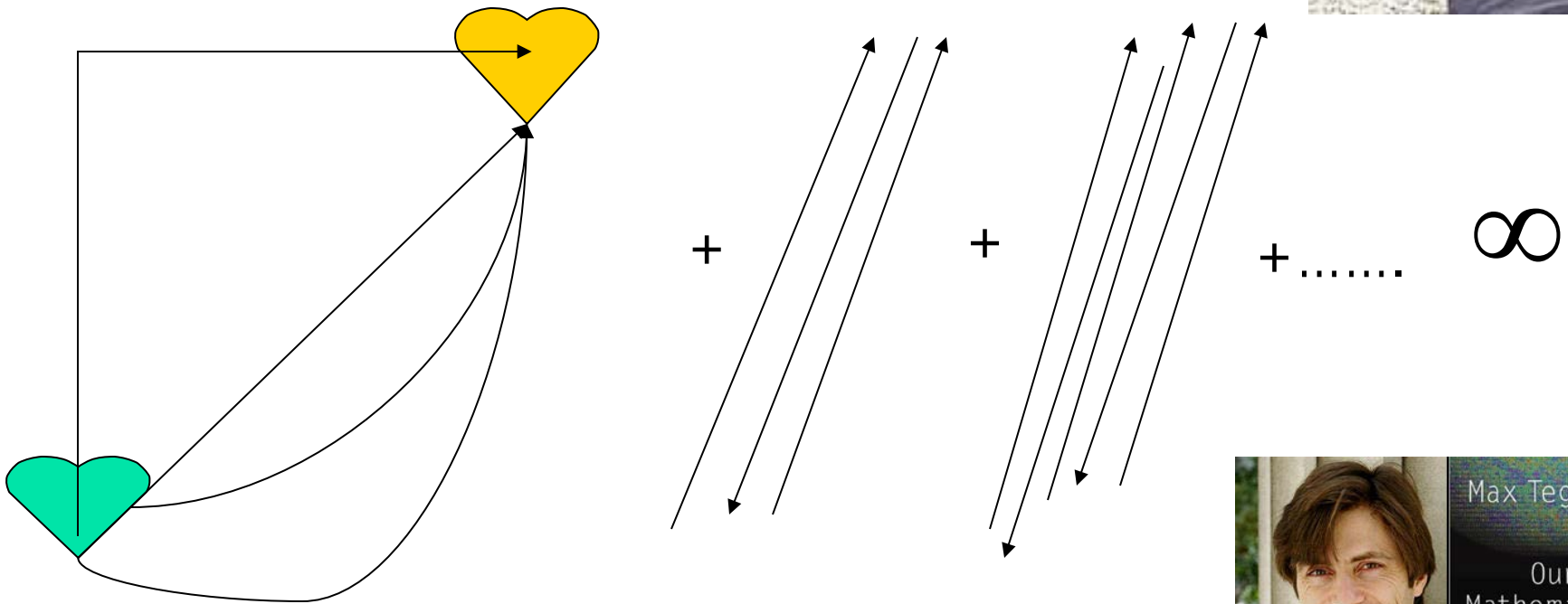
$$|kass\rangle = \alpha |elus\rangle + \beta |surnud\rangle$$

$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$$

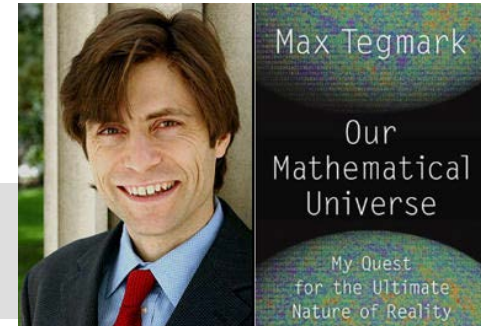
Superpositsiooniprintsiibi üks mullistusi: Paralleeluniversumid



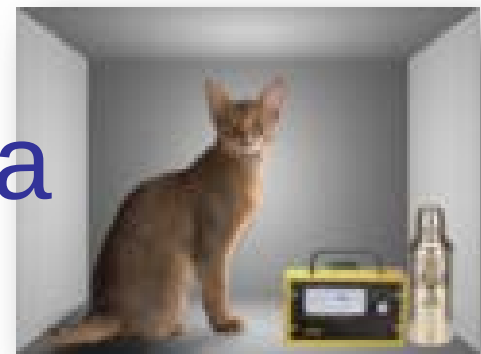
- “Universumi lainefunktsioon” on defineeritud üle kõikide võimalike teede ja universumide



Loe selle kohta: Stephen Hawking „Universum pähklikoos” Eesti Entsüklopeediakirjastus, 2002 ning



Seos klassikalise füüsikaga Schrödingeri kassi näitel

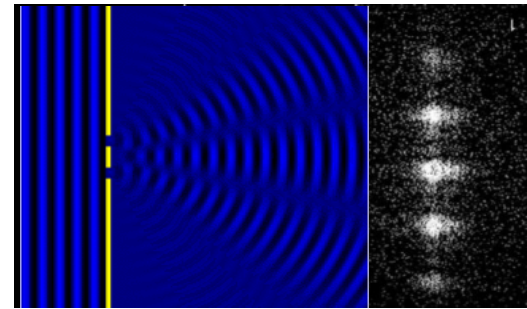


$$|kass\rangle = \alpha |elus\rangle + \beta |surnud\rangle$$
$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$$

- Miks me siis kasti piiludes ikka alati vaid ühte ja sama tulemust (kass on kas elus või surnud) näeme, mis enamasti langeb kokku klassikalise füüsikaga kooskõlas oleva ootusega?

- Enamik süsteeme kaotab **kasvades ja/või interaktsiooni tõttu** väliskeskkonnaga oma kvantomadused ehk olekute **koherentsi**
- Suurte (paljudest üksteisega interakteeruvatest väikestest osadest koosnevate) kehade puhul on **dekoherents** ülikiire, leides aset femtosekundite jooksul
- **Dekoherentsi** vältimiseks tuleks kass keskkonnast täielikult isoleerida
 - Nt 10^{-6} K maha jahutada, mis aga antud näite puhul poleks mingi lahendus

Osake-laine interferentsikatse (nn Kopenhaageni) tõlgendus



- **Duaalset füüsikalist keha** (nii seisumassiga tavaosakest nt elektroni kui ka seisumassita välja osakest nt footonit) tuleb käsitleda kui ruumiliselt lokaalset osakest nii allikal kui ka ekraanil, kuid kui levivat lainet vahepeal, mil teda ei jälgita
- Matemaatiliselt kirjeldatakse levivat (füüsikud ütlevad propageerivat) lainet kui kõikide üksteist välistavate (nt erinevate ruumiliste) olekute superpositsiooni
- **Superpositsiooniprintsiibi** järgi saab osake üheaegselt olla mitmes (piiril lõpmatu arvul) eri kohas

- **Komplementaarsus** (Bohr) tähendab, et korraga saab ta olla kas üks või teine, kuid mitte mõlemad üheaegselt

$$\Psi = \Psi(x, y, z, t)$$

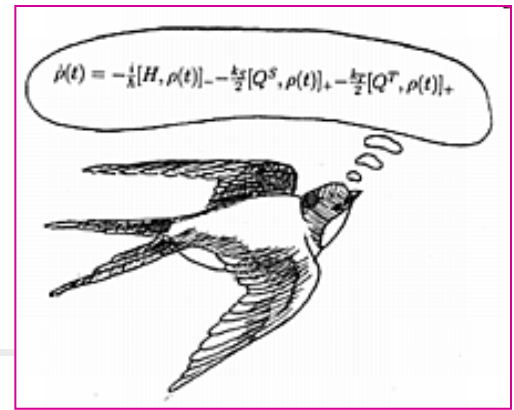
$$\begin{aligned} |\Psi\rangle &= a_1 |\Psi_1\rangle + a_2 |\Psi_2\rangle + \dots a_n |\Psi_n\rangle \\ &= \sum_i a_i |\Psi_i\rangle \end{aligned}$$

a_i^2 – seisundi realiseerimise tõenäosus

2 pilu katse näide:

$$|\Psi\rangle = a_{v \text{ pilu}} |\Psi_{vp}\rangle + a_{p \text{ pilu}} |\Psi_{vp}\rangle$$

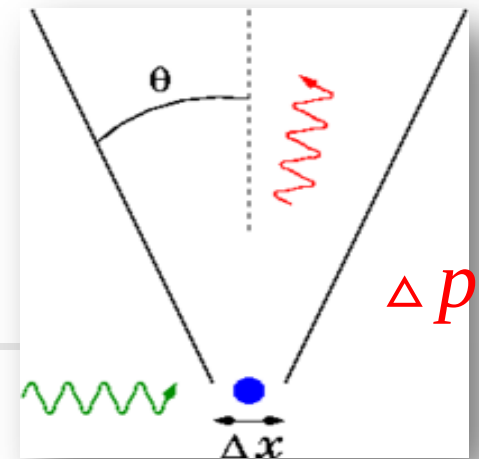
Mõõtmisprotsess kvantmehaanikas



- Enne mõõtmist on süsteem tundmatus seisundis
 - Võib ennustada, mis tõenäosusega saab mis väärtuse
- Mõõtmisprotsess: tundmatust saab tuntud
- Aga mõõtmiste täpsusele on loodus seadnud põhimõttelised piirid (nn Heisenbergi määramatus)

Miks me asju üldse näeme?

- Sellepärast, et neilt hajub või peegeldub kas valgus või teised osakesed (nt elektronid või neutronid)
- Osakesed hajuvad hästi kehadelt, mille suurus on lainepikkuse suurusjärgus
- Kõrvalolevast valemist nähtub, et mida väiksem on uuritav keha, seda lühema lainepikkusega valgust peab tema uurimiseks kasutama
- Neid footoneid aga iseloomustab kõrge energia ja järelikult suur impulss, st vältimatu on valguse mõju uuritavale objektile
- Seda mõju Heisenbergi määramatus rõhutabki

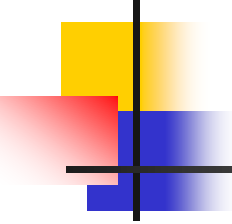


$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

$$\lambda = \frac{hc}{E}$$

- Heisenbergi printsiip x-telje suunalise impulsi ja koordinaadi määramatuse kohta

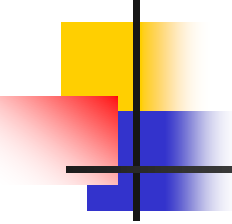
$$\Delta p_x \Delta x \geq \text{const}$$



Komplementaarsuse printsiip bioloogias (Niels Bohr, 1933)

- *To find out about life in living organisms, one has to make measurements which interfere so strongly with the processes in the organism that life itself is destroyed*
 - Schrödingeri kass

- Pärast I ilmasõda räägiti legendi Niels Bohrist. Sõjast purustatud Euroopa ei tahtnud maksta füüsika alusuuringute eest. Bohr kutsus oma laboratooriumi töötajad kokku ja ütles: „Härrased, meil puudub raha. Aeg on mõtlema hakata.”



Katsete/mõõtmiste täpsusel on põhimõttelised piirid

- Piirang käib vaid **samasuunalise** liikumise parameetrite (nn konjugeeritud muutujate) **samaaegse** mõõtmise kohta

$$\Delta p_x \Delta x \geq \hbar / 2$$

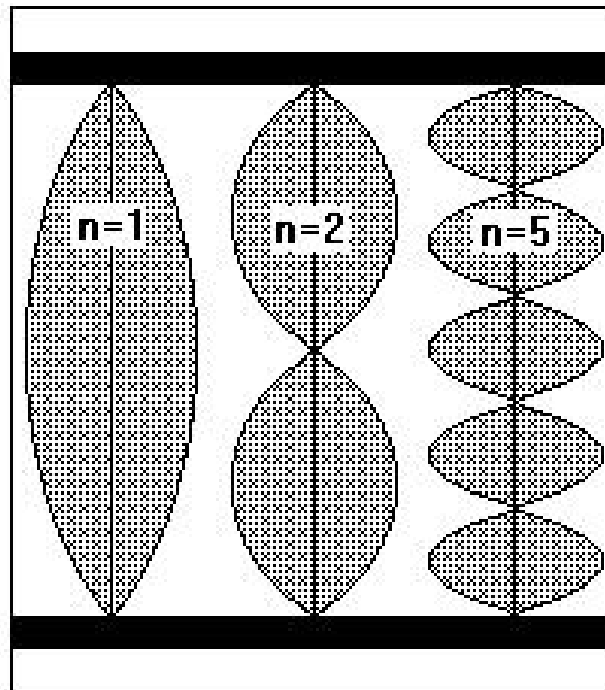
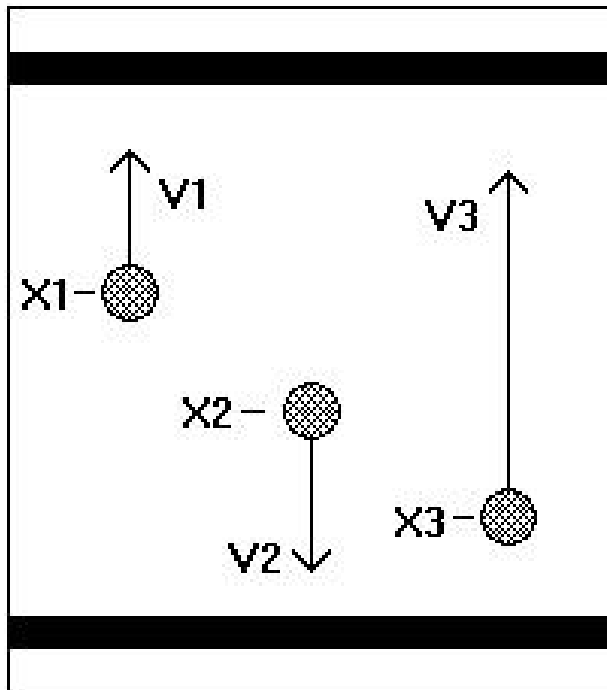
$$\Delta p_y \Delta y \geq \hbar / 2$$

$$\Delta p_z \Delta z \geq \hbar / 2$$

- **Määramatus** ja sellega seotud **juhuslikkus** on **objektiivne**
- See tähendab, et neid ei saa näiteks parema katse korraldamisega kõrvaldada
- Klassikaline (Newtoni) determinism on seega piiratud kasutusega

Kvantfüüsika olulisim rakendus: Aatomite/molekulide (st aine) ehitus

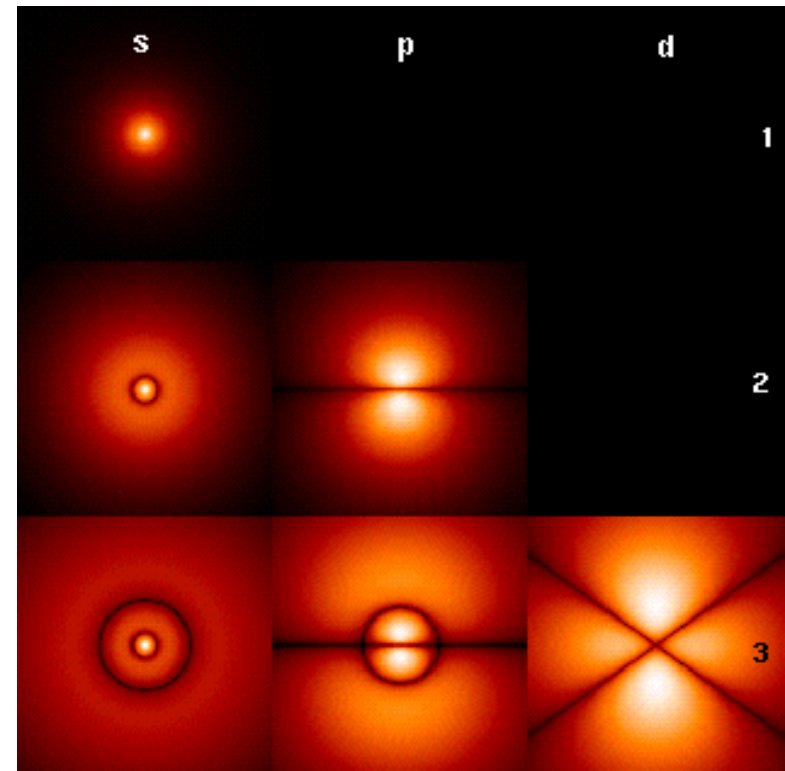
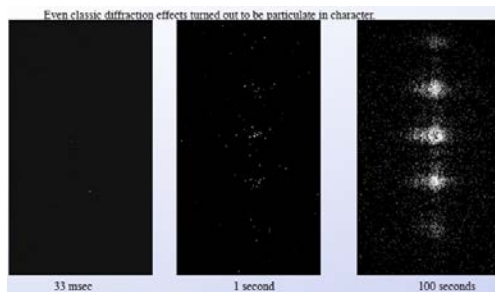
- Klassikaline osake
 - Kiirus ja koordinaat
- Kvantosake: **seisvad lained** sulustatud ruumis
 - Seisvaid laineid iseloomustab energia ja mood (ruumiline kuju)





Orbitaalse elektroni portree: Leiutõenäosuse ruumiline jaotus

$$|\Phi_{nlm}|^2 =$$



Väga suure arvu mõõtmiste tulemus.
Mida me näeksimme väikese mõõtmiste arvu korral?

Kokkuvõte:

Kvantfüüsika 4 alustala

- Osake-laine duaalsus
- Duaalsusest tulenev (Heisenbergi) määramatuse printsiip:

Meie teadmistel nende võimaluste kohta on piir

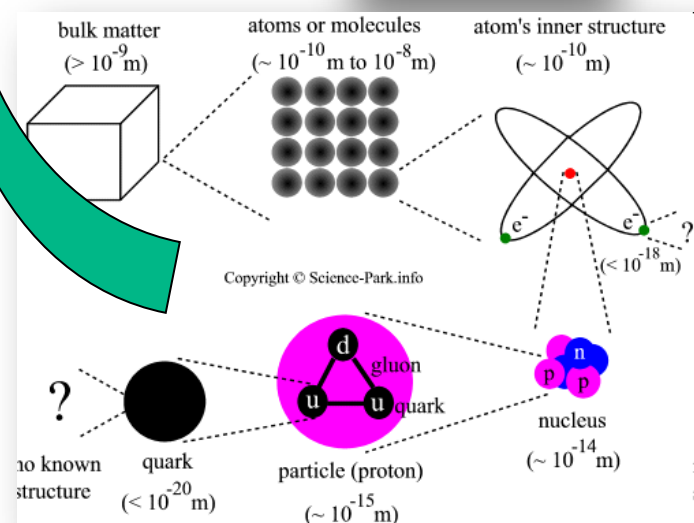
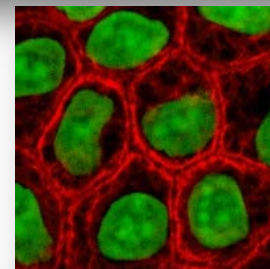
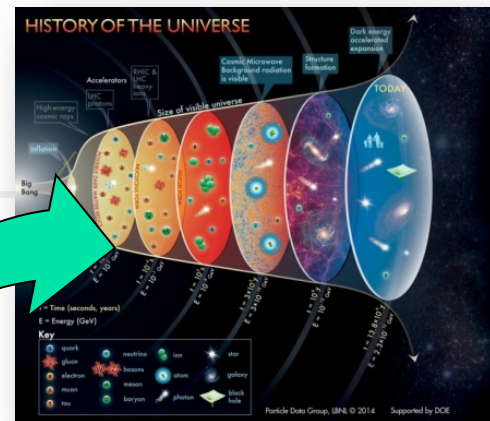
- Superpositsiooniprintsiip: Kõik võimalused on teatud tõenäosusega võimalikud
 - Superpositsioonilisi olekuid on © palju
 - Matemaatiline kirjeldus kas lainefunktsiooni või tihedusmaatriksi abil



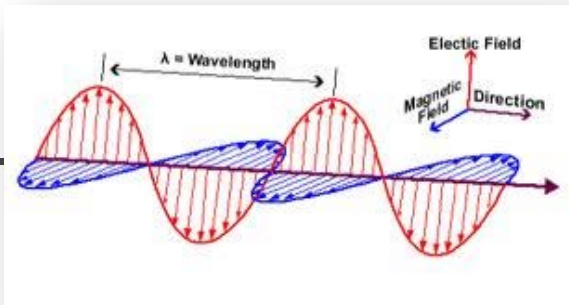
- Superpositsiooniprintsiibil põhinev tõenäosuslik süsteemi kirjeldus: Millegi äramõõtmiseks tuleb teha palju ühesuguseid mõõtmisi

Diskreetsus on materia omadus, mis on jälgitav isegi Universumi ülesehituses

- Kvantteooria üldistab, et diskreetsus (kvantiseeritus) on materia (st nii aine kui energia/välja) fundamentaalne omadus
- Edasine üldistus: Aegruum koos teda täitva materiaga on suure tõenäosusega diskreetne
- Aine mikrostruktuuri hierarhia: molekulid, aatomid, elektronid ja tuumad jne
- Sama võime teatud erisustega jälgida aine meso- (organismid, organid, rakud) ja makro- (Universum) struktuuri tasemel



Osake-laine duaalsus: Elektromagnetiline kiirgus ehk valgus



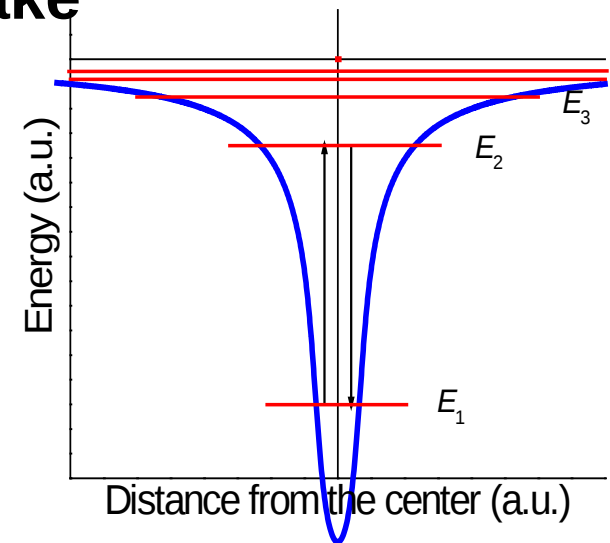
Laine

- Klassikaline pilt: pidev lainetus
- Kui materiaalsete lainete (nt merelainete) levimiseks on vaja keskkonda, siis elektromagnetilised lained levivad ka vaakumis
- Valguse allikaks on kiirendusega liikuvad laetud kehad (nt võnkuvad elektronid aatomis)

- Osake graafiliselt kujutada võnkuva elektroni kiirenduse ajalist käiku!

*Kvantsiiretel
kiiratakse / neelatakse
kvant energiaga $\Delta E = h\nu$*

Osake



- Kvantpilt: footonite (seisumassita osakeste) voog
- Allikaks on siirded aine (aatomid või molekulid) diskreetsete kvantseisundite vahel

Superpositsiooniprintsiip ja liikumise (de)koherents

- **Duaalset** füüsikalist keha (nt elektroni või footonit) tuleb käsitleda kui ruumiliselt lokaalset **osakest** nii allikal kui ka ekraanil, kuid kui levivat **lainet** vahepeal, **mil teda ei jälgita** propageeriv laine on kõikide üksteist välistavate (nt erinevate ruumiliste) olekute superpositsioon
- Et lained saaksid omavahel interfereeruda, peavad nende suhtelised faasid kogu mõõtmisaja jooksul samad püsima
- Kui jälgime/mõõdame (kas tealikult või mitteteadlikult, pole tähtis), siis rikume faasisuhteid, põhjustades dekoherentsi



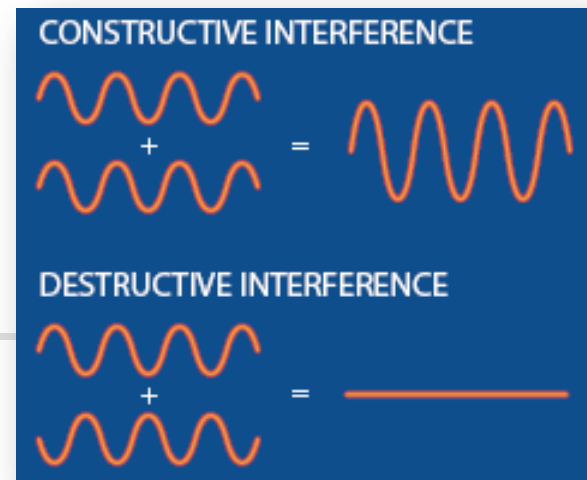
Koherents & dekoherents

- Koherents kvantfüüsikas tähendab eelkõige faasisuhete säilitamist

$$\begin{aligned}\psi^2 &= [\psi_1(A) \pm \psi_2(B)]^2 \\ &= \psi_1^2(A) + \psi_2^2(B) \pm 2\psi_1(A)\psi_2(B)\end{aligned}$$

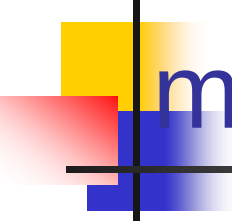
Mittekoherentse valguse puhul $\Rightarrow 0$

- Teiste (lõdvemate) koherentsi väljendustega puutume kokku termodünaamika osas



- Maailma suurim klassiruum mahutab 1000 õpilast
 - Kas koherentne kogum?





Konjugeeritud (samaaegselt mõõdetamatuid) muutujaid on teisigi

- Positsioon & impulss

$$\Delta x_i \Delta p_i \geq \frac{\hbar}{2}$$

- Nurk & pöördimpulss

$$\Delta O_i \Delta J_i \geq \frac{\hbar}{2}$$

- Impulssmomendi ortogonaalsed komponendid

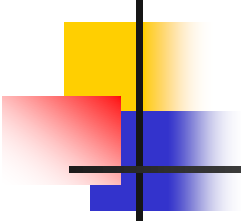
$$\Delta J_i \Delta J_j \geq \frac{\hbar}{2} |\langle J_k \rangle|$$

Kas tegelikkus meie enda kujundatud?

Kvantfüüsika sunnib võimalusi ümber hindama



- Kvantfüüsika ütleb, et kuitahes hoolikalt me oma mõõtmisi täna ja praegu ka ei teeks, **minevik ja tulevik jäävad ikka määramatuks ja eksisteerivad kui spekter (valik erinevaid) võimalusi.**
 - St Universumil pole ühte ja ainust minevikku ega ka mitte ühtainust tulevikku
- Fakt, et minevik pole ühene tähendab, et olevikus tehtud mõõtmised põhimõtteliselt võivad mõjutada meie minevikku
 - Vastuolu meile harjumuspärase põhjuslikkuse printsiibiga, mis ütleb, et põhjus alati eelneb tagajärjele
- Kvantfüüsika sunnib meid samuti ümber hindama tavapäraseid (füüsika)teooriate kriteeriume
 - Mudelite parameetrid võivad teatud tingimustel (nt väga lühikese aja jooksul) omada suvalisi väärtusi ja isegi seaduste kuju võib olla suvaline
 - Ainuke kriteerium on, et mudel ei räägiks enesele (matemaatiliselt) vastu (see on sama, mida Hawking oma mudeli-põhise-realismiga väidab)



- **Number of photons emitted by a lightbulb per second**
- ◇ Roughly how many photons are emitted by a 100-W lightbulb in 1 second?
- ◇ People tend to remember wavelengths rather than frequencies for visible light. The bulb emits photons with a range of frequencies and wavelengths, but let's take 600 nm as a typical wavelength for purposes of estimation. The energy of a single photon is
- A power of 100 W means 100 joules per second, so the number of photons is

Gravitatsiooniväljas võnkuva pendli võnkekvant



- Plancki konstandiga määratud energiaportsjonid on väga olulised mikromaailmas, kuid **makromaailmas**, kus domineerivad suured massid ja energiad, **on** neid kvante raske märgata
 - Aga nad on sellegipoolest olemas!
 - Näide: Olgu meil 0.02 kg (20 g) massiga keha 0.2 m niidi otsas Maksimaalseks kõrvalekaldeks tasakaaluasendist lubame 0.1 rad

Mitu kraadi see on?

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{9.8}{0.2}} = 1.114 \text{ s}^{-1}$$

$$\Delta E = h\nu = 6.63 \cdot 10^{-34} \cdot 1.114 = 7.39 \cdot 10^{-34} \text{ J}$$

$$E = mgh = mg[l(1 - \cos \theta)] = 0.02 \cdot 9.8 \cdot (0.2(1 - \cos 0.1)) = 1.96 \cdot 10^{-4} \text{ J}$$

$$\text{Suhteline energia : } \frac{\Delta E}{E} = 3.77 \cdot 10^{-30}; \text{ Vrd parima katse täpsusega } \sim 10^{-18}$$

Miks pole võimalik näha difrageeruvat elevanti?

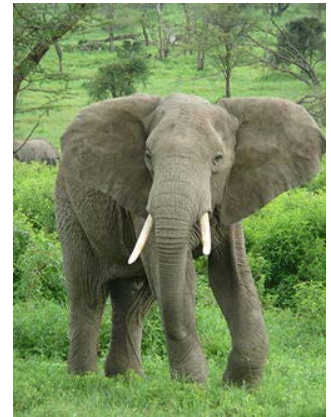
$$\lambda = \frac{h}{mv}$$
$$\lambda = \frac{h}{E}c$$

- Milline on kiirusega $10^{-2} c$ liikuva elektroni lainepikkus?
Vastus: 0.28 nm
- Kui suur potentsiaalide vahe kiirendab elektroni kiiruseni $10^{-2} c$?
Vastus: $U=26 \text{ V}$

$$\frac{mv^2}{2} = eU = 1.6 * 10^{-19} U$$

- Milline on täiskiirusel ($\sim 38 \text{ km/h}$) jooksva elevandi lainepikkus?
Vastus $\sim 10^{-37} \text{ m}$

- Märkus: Elevanti vaadeldakse siin näites ühe osakesena, arvestamata tema molekulaarset substruktuuri



Näiteid

■ Mikroskoop

$$\Delta x \approx \frac{\lambda}{2}; \quad \Delta p = \frac{h}{\lambda}$$
$$\Delta p \Delta x \approx \frac{h}{2} = \pi \hbar > \hbar / 2$$

Aluseta on samuti rääkida elektroni trajektooriga aatomis, sest elektron kihutab aatomis läbi kõigest $10^{-10}/10^6 = 10^{-16}$ s (100 attosekundi) jooksul

$$\Delta p_x \Delta x \geq \hbar / 2$$

$$\hbar = \frac{h}{2\pi}$$

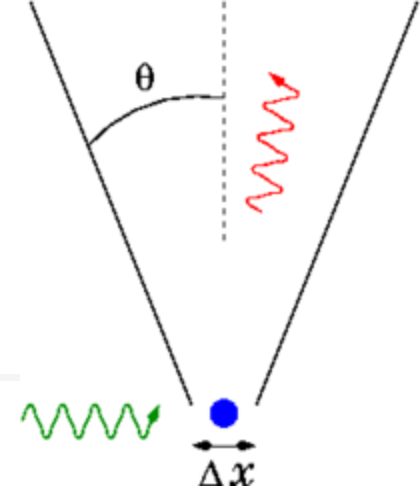
■ Elektron

Oletame, et teame ajahetkel $t=0$ elektroni asukohta täpsusega

☞ $x_0 = 10^{-10}$ m (=aatomis läbimõõt).

Tahame teada, millise täpsusega saame elektroni asukohas olla kindlad 1 s pärast

$$\Delta x_0 \Delta p = \Delta x_0 m \Delta v \geq \frac{\hbar}{2}$$
$$\Rightarrow \Delta v \geq \frac{\hbar}{2m\Delta x_0} \approx 10^6 \text{ m/s}$$
$$\Delta x = \Delta v \Delta t \geq 3500 \text{ km}$$

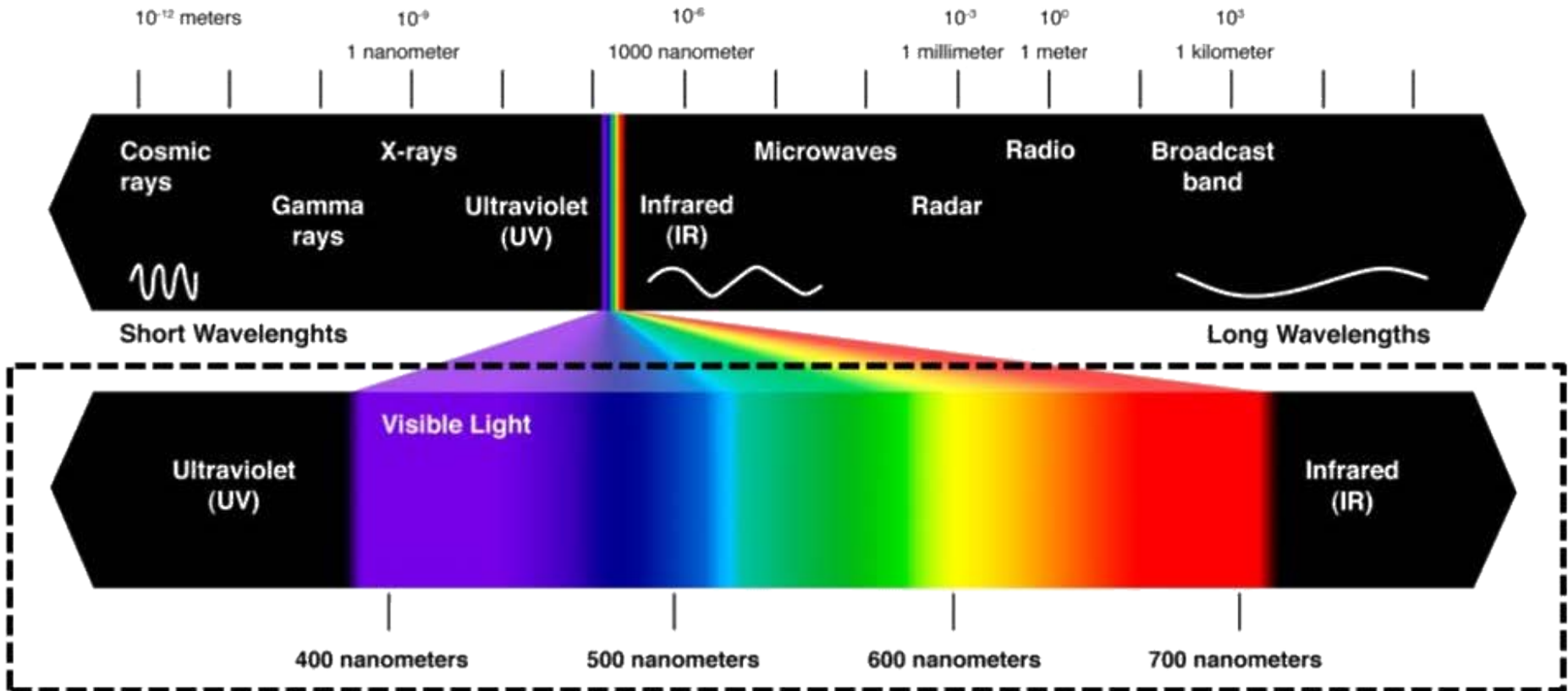


Elektromagnetilise kiirguse sagedusspekter ulatub 0-st ∞

$$\nu\lambda = c$$

$$\nu = \frac{E}{h} = \frac{c}{\lambda} [Hz]$$

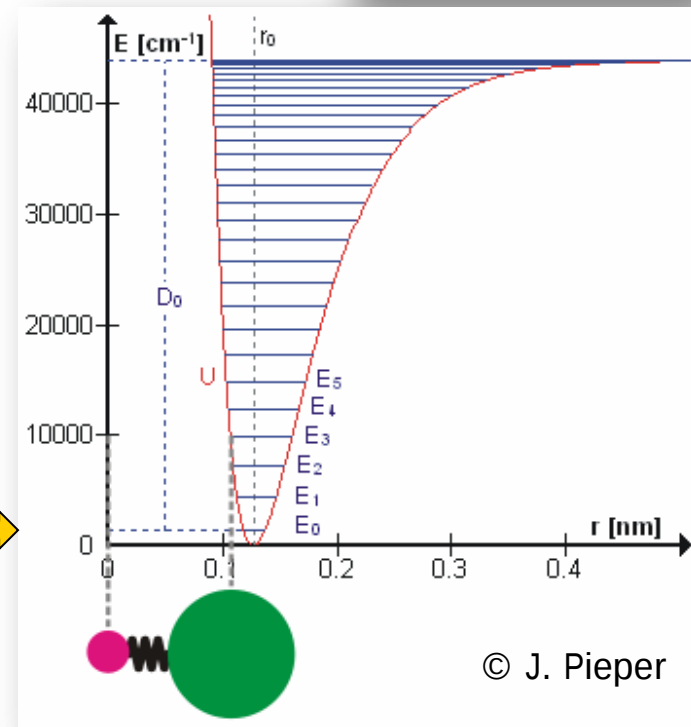
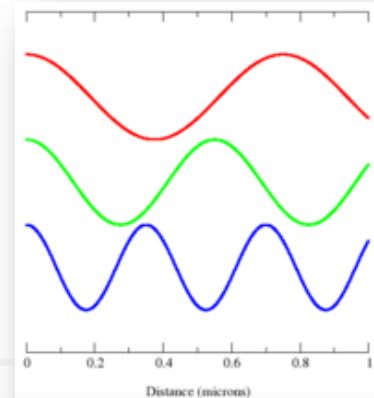
$$\frac{1}{\lambda} = \frac{E}{hc} [cm^{-1}]$$



Kvant- elektromagnetiline väli

- Erineva sagedusega elektromagnetvälja laineid (moodid) võib käsitleda kui üksteisest sõltumatuid ostsillaatoreid.
 - Ostsillaatori klassikaline analoog on pendel (või metronoom meie videos)
- Erinevaid elektromagnetvälja ostsillaatoreid on lõpmatu arv
- Igale moodile vastava kvandi (footoni) energia on $E=h\nu$
- Energia sõltuvus kindlas ruumiosas olevate footonite arvust (n) ja nende võnkesagedustest (ν) avaldub kui:

$$E = h\nu$$

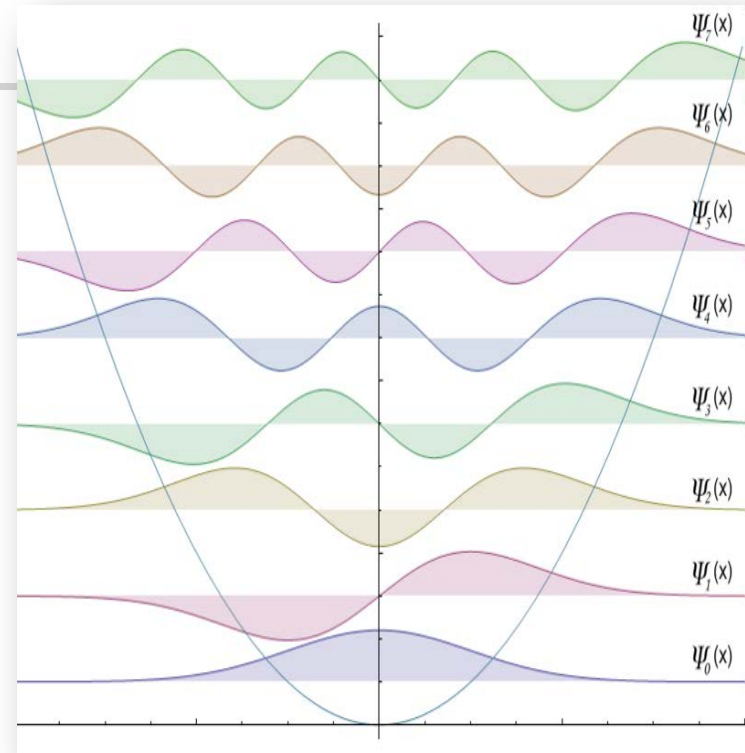


$$E(n, \nu) = h\nu\left(n + \frac{1}{2}\right) = h\nu n + h\nu \frac{1}{2}$$

NB! Siit järgneb, et $n=0$ korral E ei võrdu 0.
Null-võnkumiste energia on lõplik suurus!

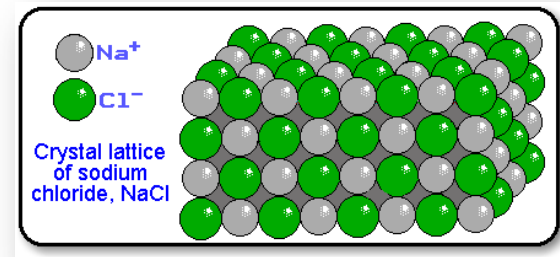
Nullvõnkumiste kosmoloogiline aspekt

- Kui kvantide arv on 0, siis on kvant-ostsillaatori energia $h\nu/2$, mitte 0
- Sellest tulenevalt saab arvutada kuupsentimeetris vaakumis oleva energia: 10^{107} J
 - See on ettekujutematult suur energia!
Vrd: Universumis eluiga on $4.3 \cdot 10^{17} \text{ s}$ ja ta sisaldab 10^{80} osakest



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

Klassikaline ja kvantpendel käituvad täiesti erinevalt



Aatomid keedusoola kristallvõres käituvad kvant-ostsillaatoritena

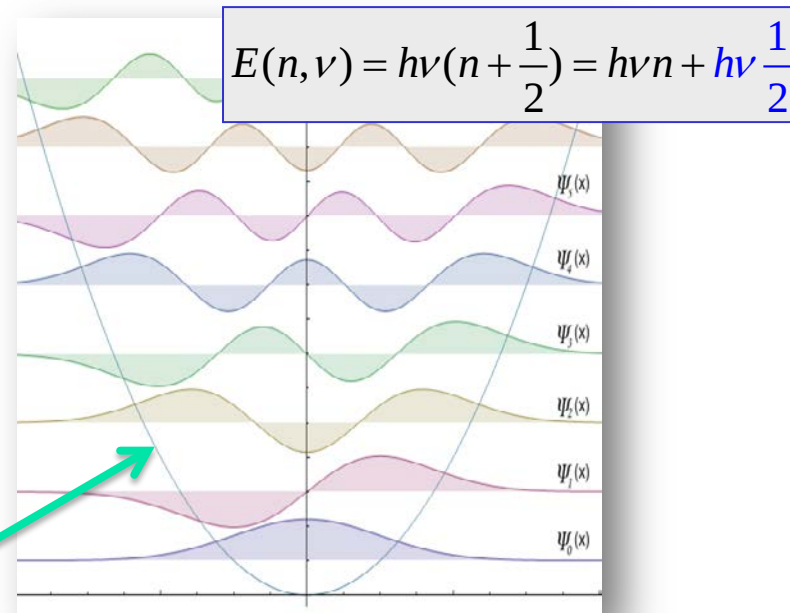
- Klassikaline pilt (pidev energia)
- Kvantpilt (diskreetne energia)



Energia muutub
ruumikoordinaadist
tasakaaluasendi
ümbes parabooliselt

Nt vedru E_{pot}

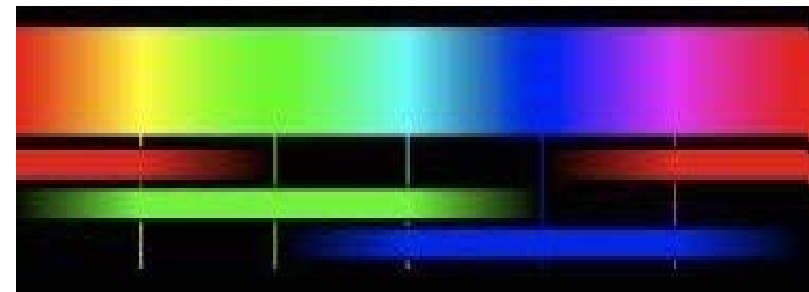
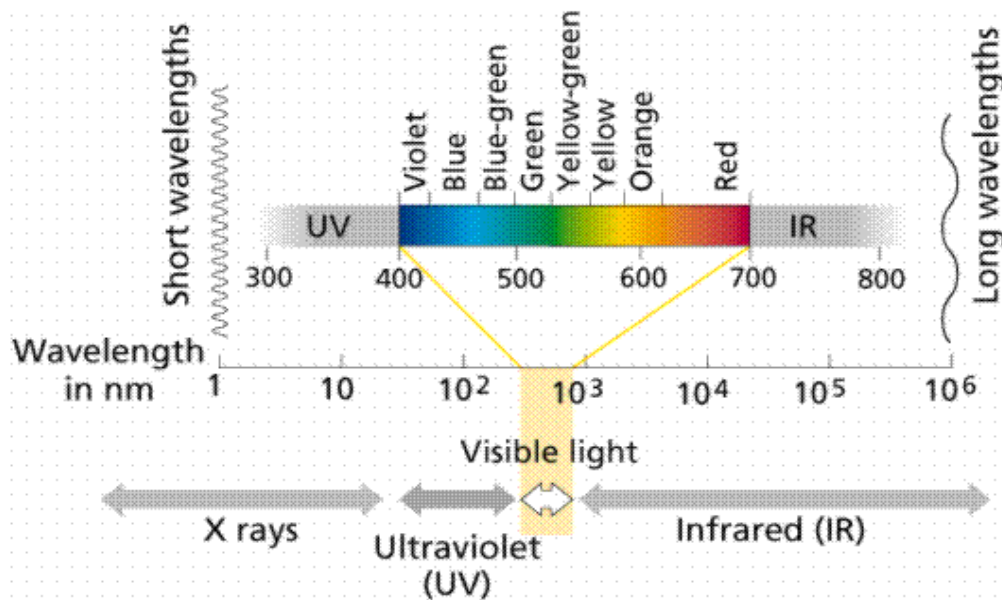
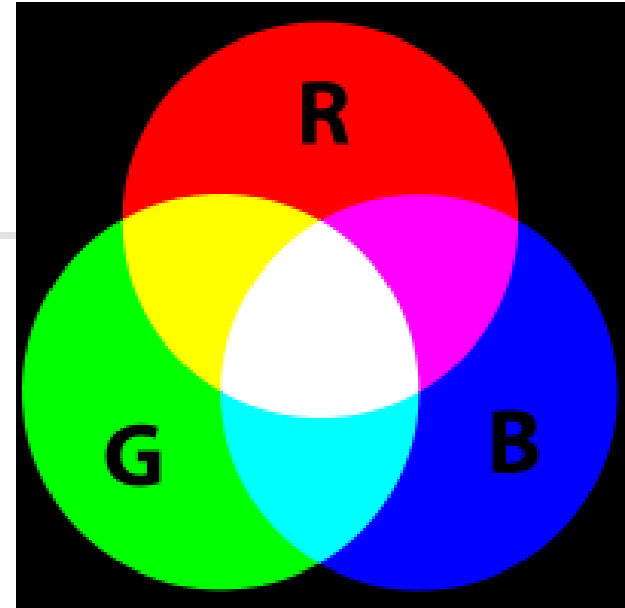
$$E_{pot} = -\frac{k}{2} \Delta x^2$$



Kvantpendlit pole tarvis käima lükata.
Ta lihtsalt ei saa kunagi peatuda!
Sellest tuleneb ka aatomite stabiilsus.
Liikumises väljendub looduse põhiolemus!

Miks näib (nähtav) valgus “valge”?

- Esmased ja sekundaarsed värvid



TV monitori ja raalikuvari värvid

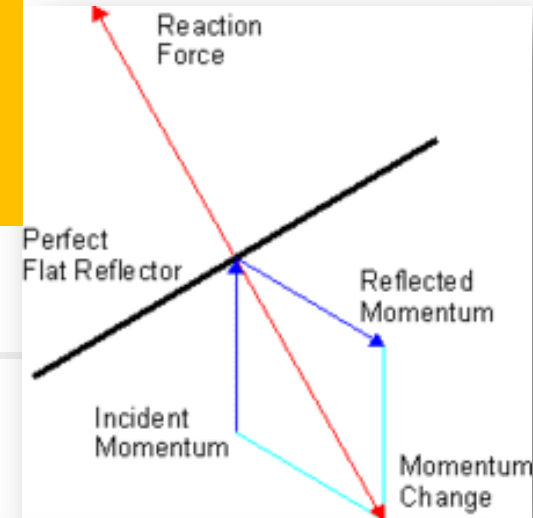
Valgus kui osake: Valguse rõhk

päikesepuri
tähtedevaheliseks
transpordiks
kasutab valguse
rõhku

$$E = cp$$

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t}$$

$$P = \frac{F}{S} = \frac{\Delta p}{\Delta t S}$$



- J. Kepler leidis juba 1619. a, et komeetide sabad „vaatavad“ Päikesest eemale
- Maxwelli seletuse valguse rõhu kaudu (1862) kinnitas katseliselt Vene teadlane P. Lebedev (1900)
 - ~10⁻¹⁰ atmosfäärirõhust
- Rakendused
 - Lasernäpitsad
 - Ilmaruumilennud (nt päikesepuri, millega ka Eesti noored kosmosehuvilised innukalt tegelevad)



Miks kaks saba?

Figure 1 | Light, momentum, action. The comet Hale-Bopp, seen here over the Joshua Tree National Park in southern California on the evening of 28 March 1997, has both a blue ion tail and a white dust tail. Whereas the ion tail is carried away by the 'solar wind' of charged particles from the Sun's atmosphere, the dust tail is pushed by the radiation pressure of the sunlight. The momentum transfer in this second case is weaker than that in the first, resulting in the splitting of the tails.

Laserpintsett (Ashkin 1970)



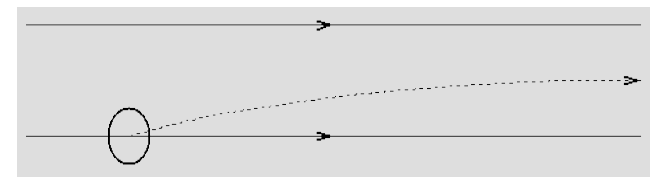
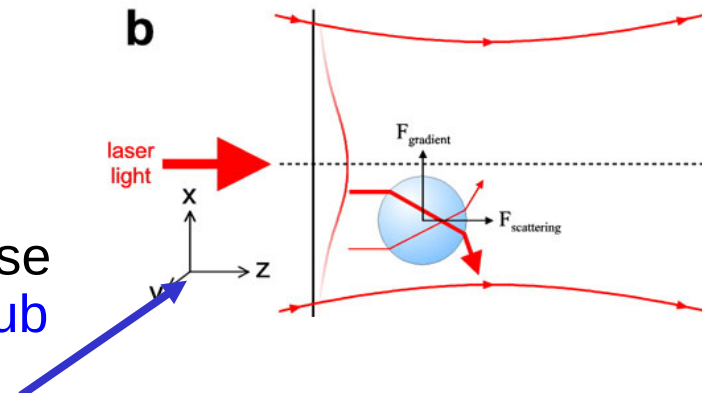
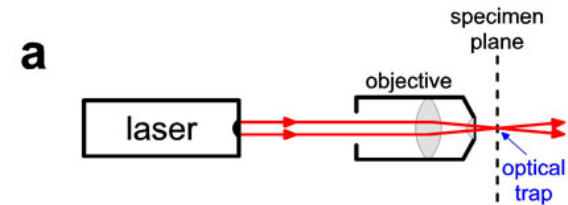
Valguse rõhk

$$E = cp$$

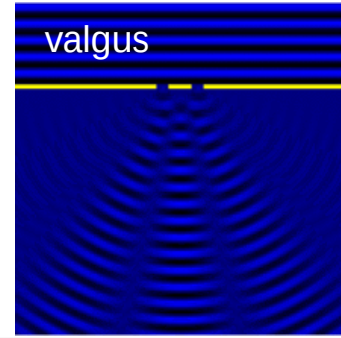
$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t}$$

$$P = \frac{F}{S} = \frac{\Delta p}{\Delta t S}$$

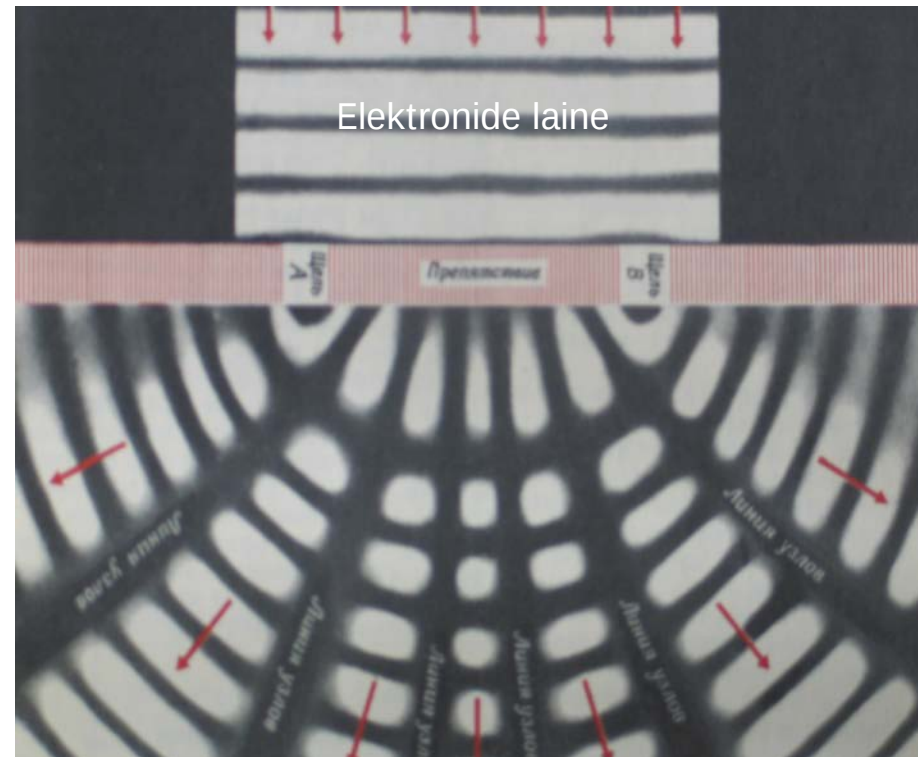
- Valgust võib vaadelda kui footonite voogu, millest igaühel on valguskiire suunaline impulss $p = E/c = h\nu/c = h/\lambda$
- Kui see impulss muudab keskkonnas murdudes suunda, antakse impulsi jäävuse seaduse kohaselt võrdne ja vastasuunaline impulss üle keskkonnale
- Tulemusena kistakse valgust murdev kübe kiire keskmesse ja lükatakse valguse rõhu toimel valguskiire fookuse poole edasi, kus ta ühtlasi stabiliseerub
 - NB! Pange tähele intensiivsuse jaotust fokusseeritud kiires (tavapäraselt Gaussi jaotus)
 - Intensiivsust mõõdetakse ühikutes footonit pinnaühikule



Interferentsikatses lainetab footoni/elektroni leiutõenäosus

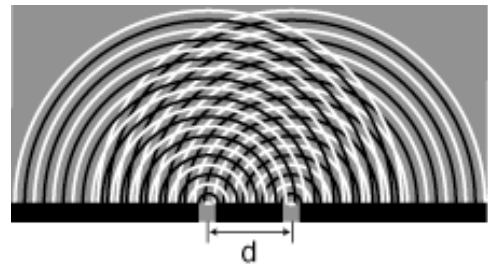


- Kui leiutõenäosuse amplituud on $\sqrt{2}$, siis elektronide difraktsioonis näeme, et $2+2=0-8$
- Elektron ja footon on osake-laine.
Iga mõõtmine annab täiesti konkreetse asukoha
Aga elektroni leiutõenäosus lainetab
- See on füüsika paradigma muutus
Igale küsimusele ei saa täpset ja korduvat vastust nagu klassikalises füüsikas



$$0 - (\sqrt{2} + \sqrt{2})^2$$

Interferentsi matemaatika:



Õige nii kvant- kui klassikalises maailmas

$$\begin{aligned}\psi^2 &= \left[\psi_1(A) \pm \psi_2(B) \right]^2 \\ &= \psi_1^2(A) + \psi_2^2(B) \pm 2\psi_1(A)\psi_2(B)\end{aligned}$$

Liige, mis kirjeldab lainete interferentsi

A ja B tähistavad erinevaid osakesi

1 ja 2 aga nende osakeste erinevaid võimalikke kvantseisundeid

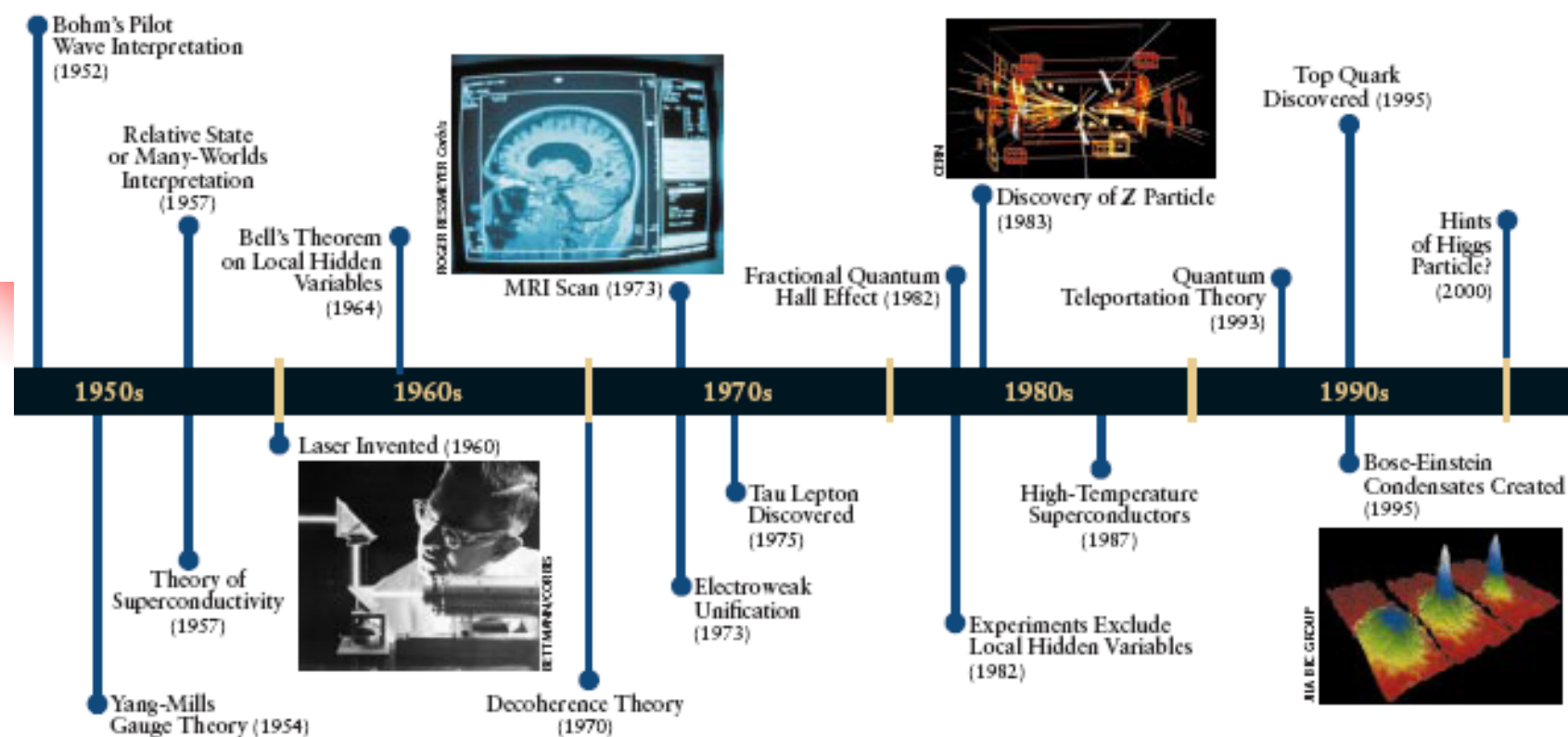
Interaktsioon: Lokaalne või mitte?



- Klassikalise väljateooria seisukohalt omavad nii kehad kui ka väljad
 - energiat
 - impulssi
 - impulssmomenti (spinni)
 - Need on jäävad igasugustes protsessides
 - Vastastikmõju kehade vahel tähendab siis **lokaalset** (st antud keha asukohas toimuvat) energia, impulsi ja/või pöördimpulsi ülekannet väljalt (mis on tekitatud teise keha poolt) antud kehale ja vastupidi
- Erinevalt klassikalisest väljateooriast lubab kvantväljateooria ka meeltega raskestitajutavat **mittelokaalset** interaktsiooni kehade vahel
 - Einstein nimetas seda „*spooky action at a distance*“ ja ei leppinud selle interpretatsiooniga kunagi
 - Tänapäevase teadmise valguses ta eksis



Kvantfüüsika ajatelg



LOUIS DE BROGLIE
(1892–1987)



ERWIN SCHRÖDINGER
(1887–1961)



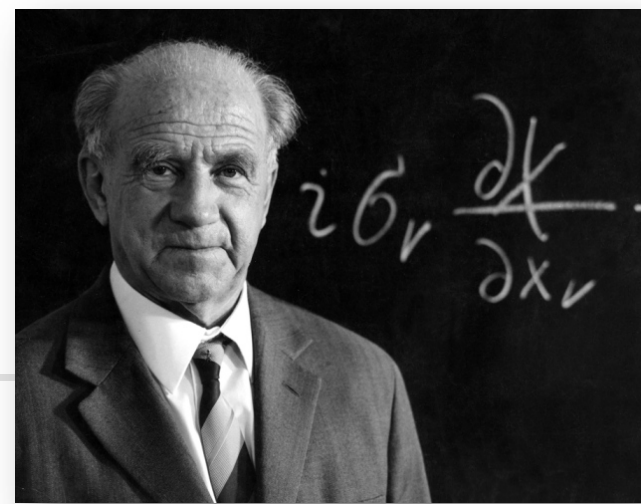
MAX BORN
(1882–1970)



WERNER HEISENBERG
(1901–1976)

Werner Karl Heisenberg

(1901 – 1976)



- Heisenbergi printsiip
naljaga pooleks
 - The traffic cops pull over Heisenbergs's car.
Prof Heisenberg, do you have any idea how fast you were going?
Heisenberg: No, but I know exactly where I am.

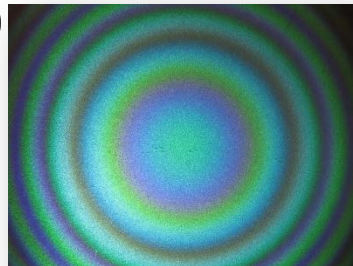


25-aastane Werner.
Äsja sai ta valmis oma tänaseni
kestva kvantmehaanika
maatriksmudeli

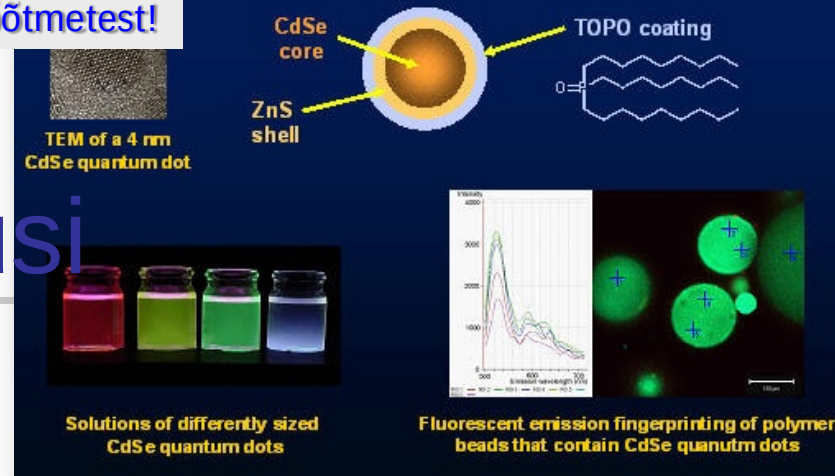
Biokuvandamises kasutatavad kvantpunktid
Aine omadused sõltuvad tema mõõtmetest!

Makroskoopilisi kvantfüüsika nähtusi

- Stabiilse aine olemasolu
- Boson-aine (Bose-Einsteini) kondenseerumine, mis vastab enamiku aine individuaalsete liikumise vabadusastmete kinnikülmumisele. Seotud spinniga
- Kaks kondensaati (materjalainet) võivad omavahel **interfereeruda**.
- **Kvantpunktid** pooljuhtides, mis sisaldavad 10^2 - 10^5 aatomit, ja mis üheskoos käituvad kui üks gigantne aatom
- **Grafeen** (kvanttahkis)
- **Laseri kiirgus**, mille koherents ulatub sadade km-ni

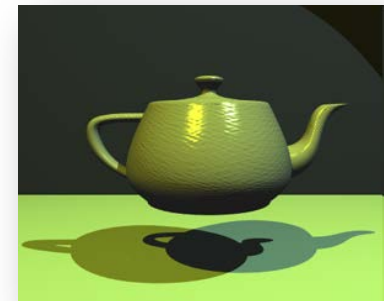


Quantum Dots



- Faasiüleminekutega seotud nähtused **kondenseeritud ainetes**, mida iseloomustab paljude osakeste korreleeritud liikumine (*many-body problems*)

- ülijuhtivus
- ülivoolavus
- magnetism jt



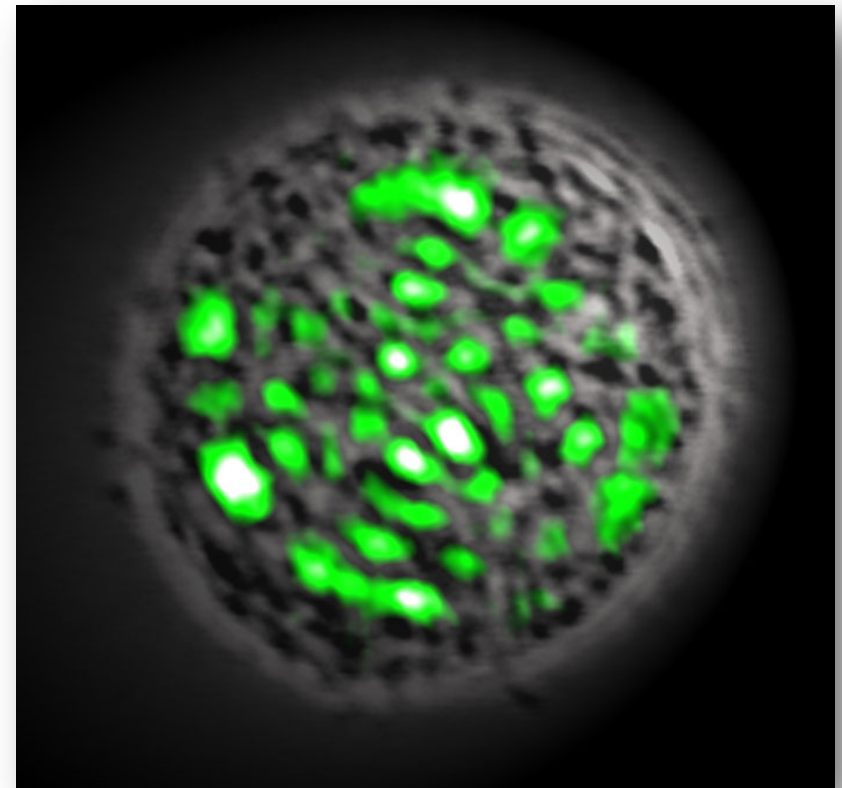
Magnetväljas leviteeriv teepott

«Ühel päeval, *sir*, kogud sa sellelt makse,»
vastas füüsik Michael Faradey Briti
rahamendusministrile William Gladstone'ile, kes
küsis, kas tema elektriuringutest mingitki
praktilist kasu on.

Rakk-laser:

Üks 2011. aasta äramärgitud teadusavastusi

- Microscope image of a single biological cell (shown in black and white) that is genetically programmed to produce **green fluorescent protein (GFP)**.
- When placed inside an optical resonator, this cell can generate green laser light. Due to the irregular internal structure of the cell, the laser spot has an apparently random pattern.
 - Courtesy: Malte Gather

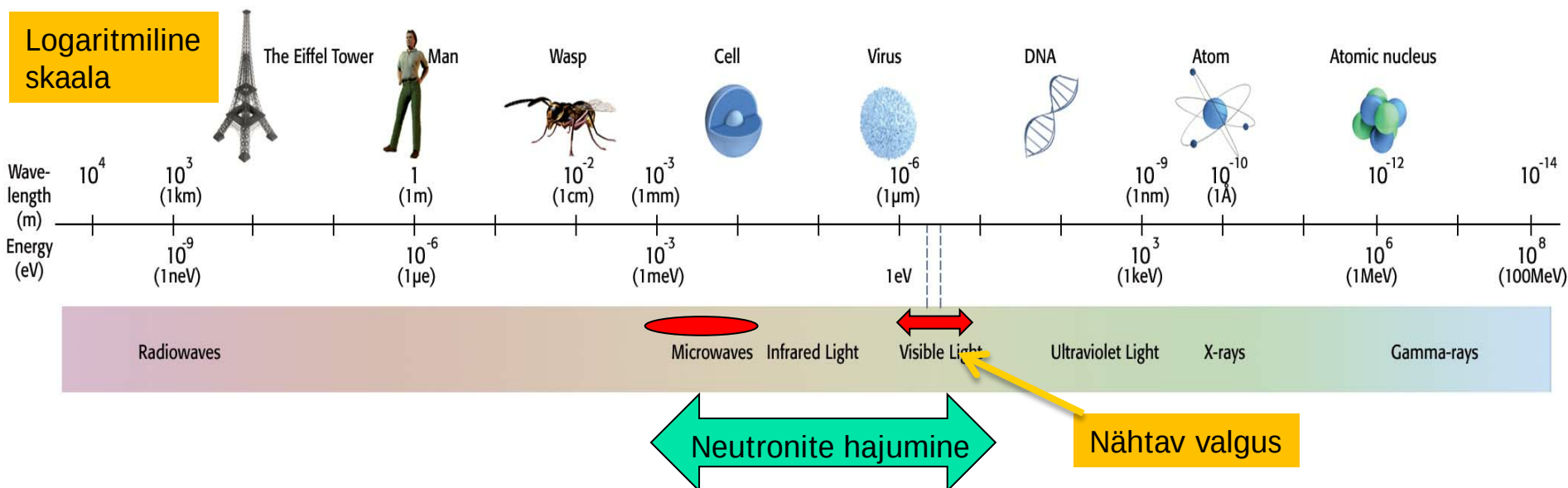


Elektromagnetilise kiirguse sagedusspekter ulatub 0-st ∞



Päevaküünal Kihnu kohal
Mark Soosaare foto

Logaritmiline skaala



Spektrit iseloomustab kiirguse sagedus ja/või lainepikkus, mis on omavahel pöördvõrdelises sõltuvuses

Energiat võib mõõta: J, eV, pöördsentimeetrites, Hz, kJ/mol jne

1 1/cm=30GHz

1 eV=8066 1/cm=96.5 kJ/mol

1J=6.2415093433e+18 eV

$$\nu\lambda = c$$

$$\nu = \frac{E}{h} = \frac{c}{\lambda} [Hz]$$

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{E}{hc} [cm^{-1}]$$