

Photon: partikel and gelombang

- *Cahaya energinya terkuantisasi. Memiliki energi dan momentum*

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1240 \text{ eV} - \text{nm}}{\lambda} \quad p = \frac{E}{c} = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

- *Cahaya memiliki (dual nature) sifat dualisme. Yaitu memiliki sifat gelombang dan partikel*
 - Diterapkan pada seluruh radiasi elektromagnetik
- Efek photoelectric menunjukkan sifat cahaya sebagai partikel
 - Cahaya tersusun oleh partikel partikel yang disebut photon
- Interference and diffraction
 - Menunjukkan gelombang dan partikel dan probabilistic characteristics dari cahaya

Matter waves(gelombang materi)

- Jika gelombang cahaya memiliki sifat partikel, mungkin materi memiliki sifat sebagai gelombang?
- de Broglie mempostulatkan bahwa panjang gelombang materi dikaitkan dengan momentumnya adalah

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

- Ini disebut panjang gelombang de Broglie



Nobel prize, 1929

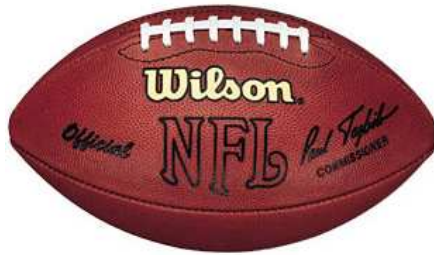
Why h / p ? Works for photons

- Kita berargumentasi bahwa $\lambda = \frac{h}{p}$ dapat di aplikasikan pada apapun
- Photons dan bola sepak keduanya mengikuti relasi yang sama.
- Setiap benda memiliki kedua sifat **wave-like and particle-like**

Wavelengths dari benda massive

- deBroglie wavelength = $\lambda = \frac{h}{p}$
 - $p = mv$ untuk nonrelativistic ($v \ll c$) partikel **dengan massa**.
- $$\lambda = \frac{h}{mv}$$

Wavelength of a football




- Football League, Chicago. 1999:
"... short circumference, 21 to 21 1/4 inches;
massa, 14 to 15 ons." atau
(0.43 - 0.40 kg)
- Misal ketika ditendang bola bergerak dengan
kelajuan 60, 70 mph," atau.
(27 - 32 m/s)

- Momentum: $mv = (0.4 \text{ kg})(30 \text{ m/s}) = 12 \text{ kg} - \text{m/s}$

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{6.6 \times 10^{-34} \text{ J} - \text{s}}{12 \text{ kg} - \text{m/s}} = 5.5 \times 10^{-35} \text{ m} = \boxed{5.5 \times 10^{-26} \text{ nm}}$$

Panjang gelombangnya sangat kecil

- 1 nm = 10^{-9} m
- Wavelength cahaya merah = 700 nm
- Spacing antara atoms dlm zat padat ~ 0.25 nm
- Wavelength bola sepak = 10^{-26} nm
- Apa yang membuat bola sepak wavelength sangat kecil?

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


Massa besar, momentum besar, panjang gelombang pendek

Mekanika Quantum : Physics of the microscopic world

- Benda Makroskopik tidak bisa menunjukkan efek dari mekanika quantum .
- Ini nampak dalam pendulum:
 - Tingkat tingkat Energi terquantisasi, tetapi kediskritannya terlalu kecil untuk dideteksi.
 - Sifat gelombangnya juga terlalu kecil untuk dapat dideteksi

Panjang gelombang elektron

- Diperlukan objek yang massanya kecil untuk menunjukkan efek gelombang
- Elektron adalah partikel yang sangat ringan
- Massa elektron = 9.1×10^{-31} kg

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} = \frac{6 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}}{(9 \times 10^{-31} \text{ kg}) \times (\text{velocity})}$$

Panjang gelombang bergantung pada massa dan kecepatan

Kecepatan makin besar maka panjang gelombang makin kecil

Panjang gelombang dari elektron 1 eV

- Panjang gelombang materi $\lambda = \frac{h}{p}$
- Momentum dari elektron ialah.
- $p = mv$, jadi

$$E_{kinetic} = \frac{p^2}{2m} \quad \longrightarrow \quad p = \sqrt{2mE_{kinetic}}$$

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\sqrt{2mE_{kinetic}}} = \frac{hc}{\sqrt{2mc^2 E_{kinetic}}}$$

Sedikit komplikasi

- Dengan tanpa menghitung perhatikan ini

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{hc}{\sqrt{2} mc^2 E_{kinetic}}$$

hc — Sama konstanta seperti sebelumnya

mc² — Energi diam

E_{kinetic} — Energi kinetik

$$\text{Wavelength} = \frac{\text{konstanta}}{\sqrt{\text{energi diam}} \sqrt{\text{energi Kinetik}}}$$

Latihan

Suatu neutron massanya 2000 kali dari massa diam elektron. Apabila kedua partikel itu memiliki energi sama 1 eV. Bagaimanakah perbandingan panjang gelombang kedua partikel itu?

A. Keduanya sama

B. neutron wavelength < elektron wavelength

C. neutron wavelength > elektron wavelength

Wavelength bergantung pada momentum, yaitu h/p .

Momentum sama \rightarrow wavelength sama.

Momentum = $\sqrt{2mE}$, bergantung pada energi dan massa

Mengapa menggunakan energi diam?

- Partikel penting dalam mekanika quantum dicirikan oleh energi diamnya
 - Dalam relativitas semua observer mengukur energi diam yang sama .

elektron: $mc^2 \sim 0.5 \text{ MeV}$

proton: $mc^2 \sim 940 \text{ MeV}$

neutron: $mc^2 \sim 940 \text{ MeV}$

*Berbeda untuk
beda partikel*

1 MeV = 1 juta elektron-volt

Kecenderungan umum

$$\text{Wavelength} = \frac{\text{konstanta}}{\sqrt{\text{energi diam}} \sqrt{\text{energi kinetik}}}$$

- Wavelength mengecil ketika energi diamnya (mass) membesar
- Wavelength mengecil ketika energi kinetiknya membesar

Wavelength dari elektron 1 eV

- Untuk suatu elektron, *konstanta*

$$\lambda = \frac{1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{\sqrt{2} \times 0.511 \text{ MeV}} \frac{1}{\sqrt{E_{\text{kinetic}}}} = \frac{1.23 \text{ eV}^{1/2} \cdot \text{nm}}{\sqrt{E_{\text{kinetic}}}}$$

Energi diam

Energi kinetik

- 1 eV elektron, $\lambda = 1.23 \text{ nm}$
- 10 eV elektron $\lambda = 0.39 \text{ nm}$
- 100 eV elektron $\lambda = 0.12 \text{ nm}$

Latihan

Elektron yang energinya 10 eV memiliki panjang gelombang ~0.4nm. Berapakah panjang gelombang elektron yang energinya 40 eV ?

A. 0.2 nm

B. 0.4 nm

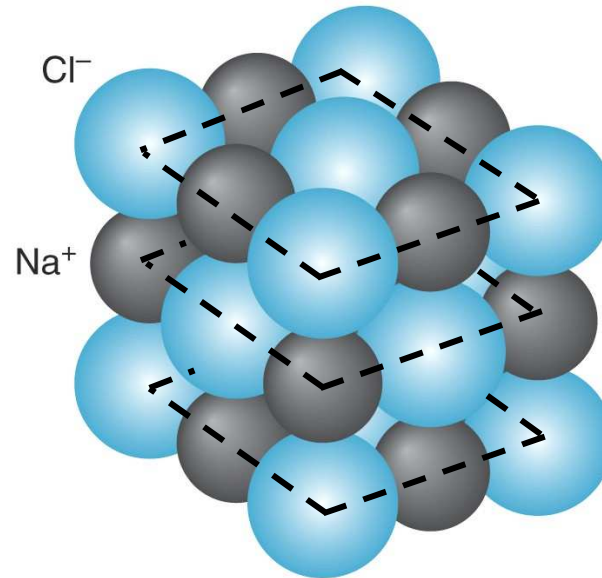
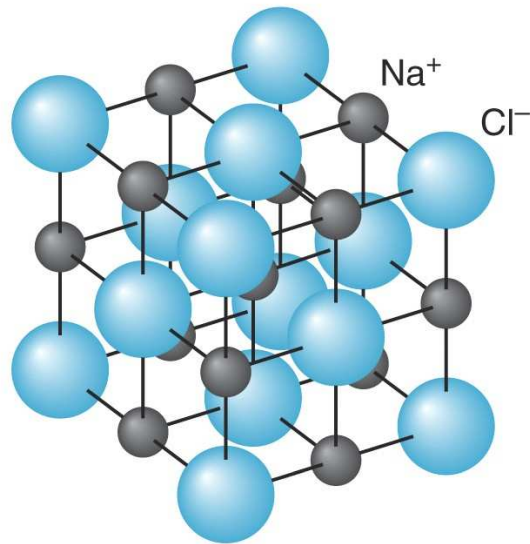
C. 0.8 nm

$$\text{Wavelength} = \frac{\text{konstanta}}{\sqrt{\text{energi diam}} \sqrt{\text{energi Kinetik}}}$$

Can this be correct?

- Jika elektron adalah waves, maka haruslah dapat menunjukkan efek seperti gelombang
 - misal. Interferensi, difraksi
- Elektron 25 eV memiliki panjang gelombang 0.25 nm, sama dengan jarak antar atom dalam kristal

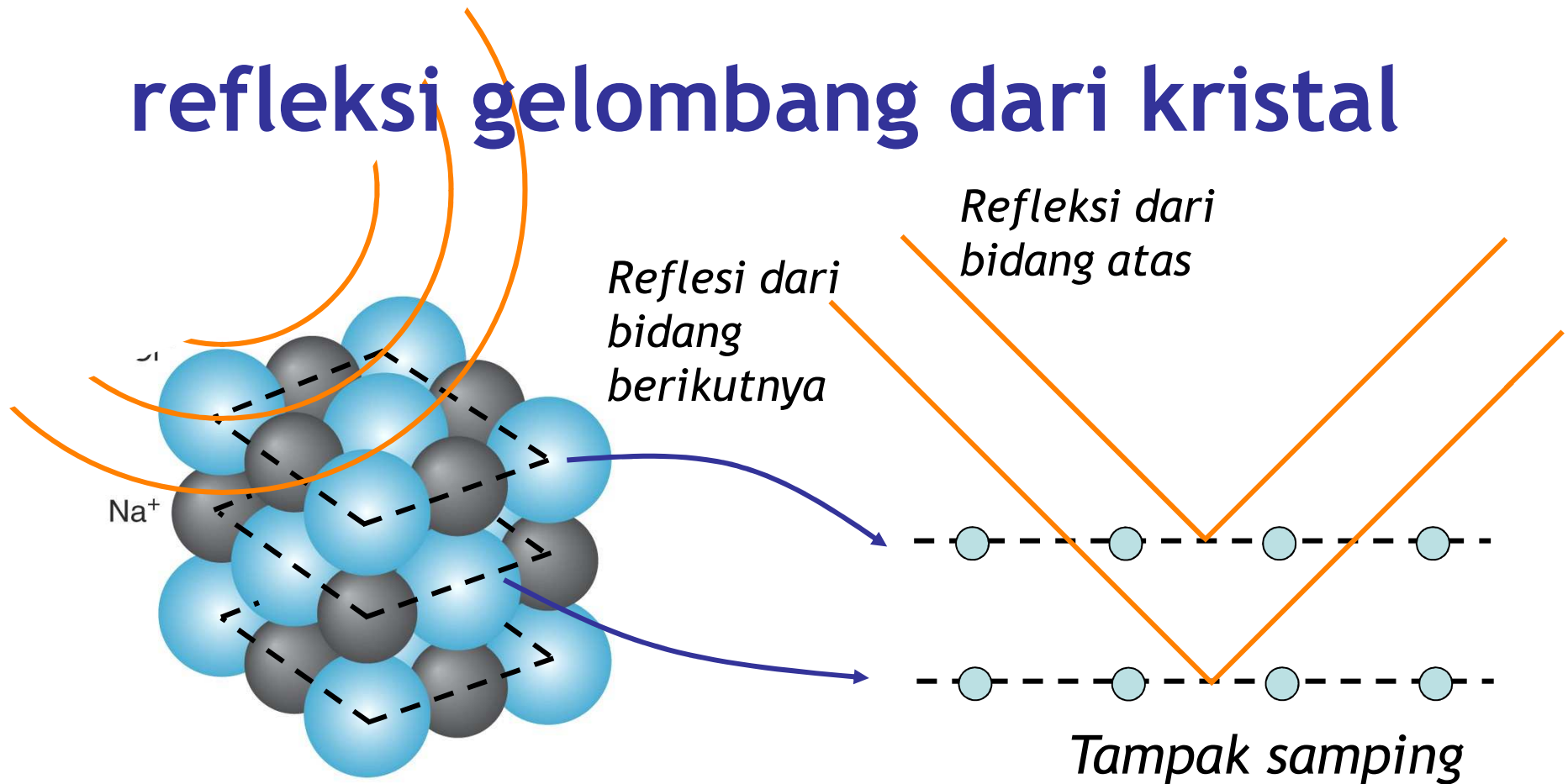
Kristal: atom tersusun secara teratur



Lapisan
bidang dari
atom atom

- Garam dapur (NaCl = Sodium Chloride)
- Struktur kristal “cubic” .
- Atom Na and Cl membentuk pola teratur
- Jarak antar atom (spacing) ~ 0.3 nm.

refleksi gelombang dari kristal



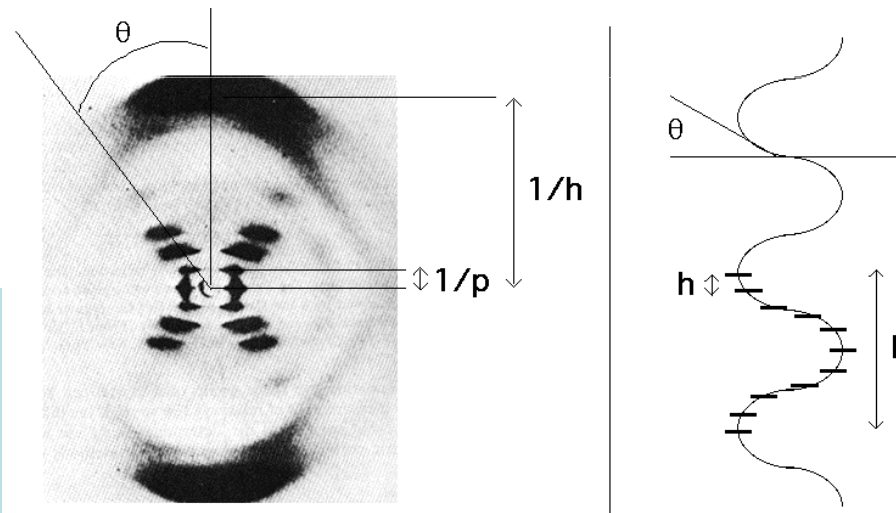
- Gelombang refleksi dari lapisan atom yang berbeda dalam kristal akan berinterferensi.
- Beda panjang lintasan optik \sim jarak antar atom atom

Difraksi X-ray

- Susunan Diffraction spot mengindikasikan susunan atom
- Digunakan untuk menentukan susunan atom atom dari molekul kompleks.

- e.g. DNA

Pola difraksi X-ray

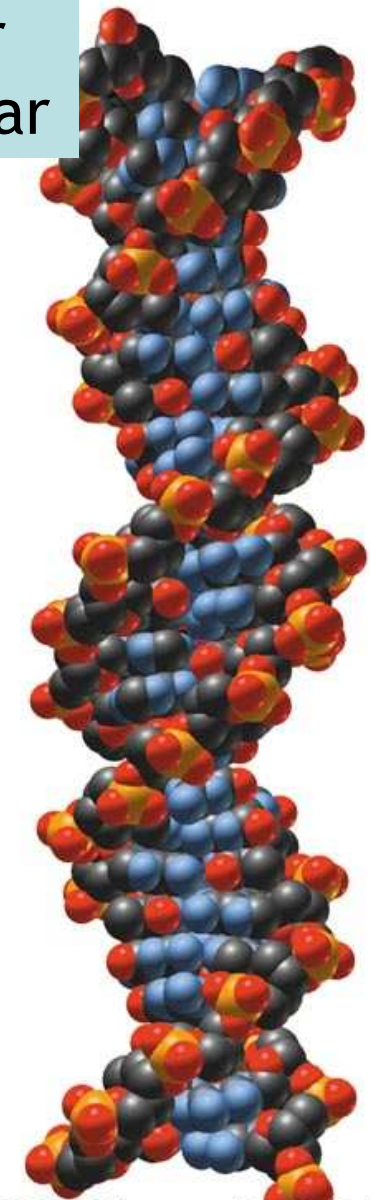


θ - tilt of helix (angle from perpendicular to long axis)

$h = 3.4 \text{ \AA}$ (Distance between bases)

$p = 34 \text{ \AA}$ (Distance for one complete turn of helix; Repeat unit of the helix)

Struktur Molecular

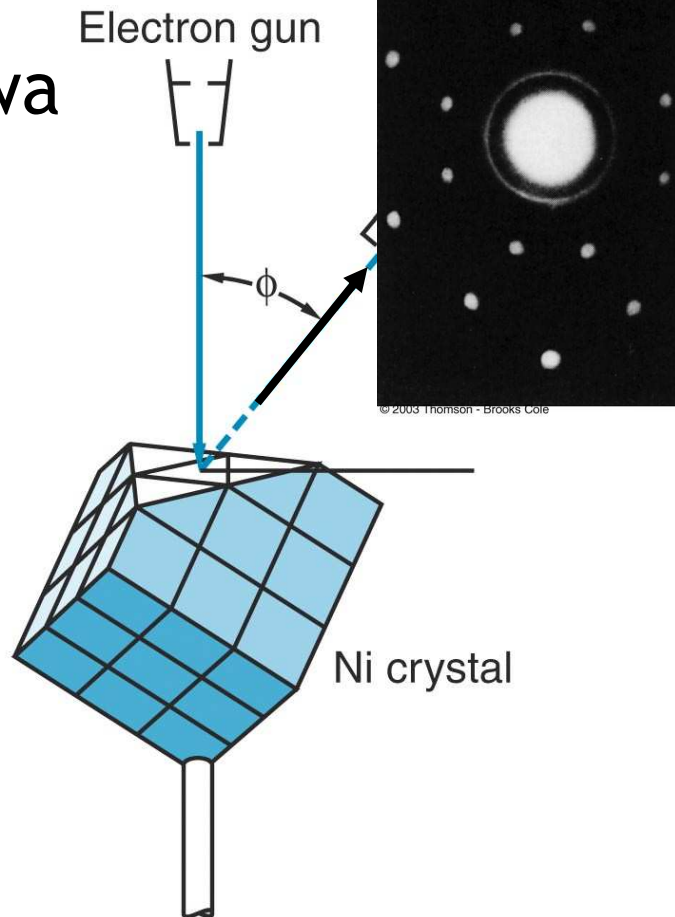


© 2003 Thomson - Brooks Cole

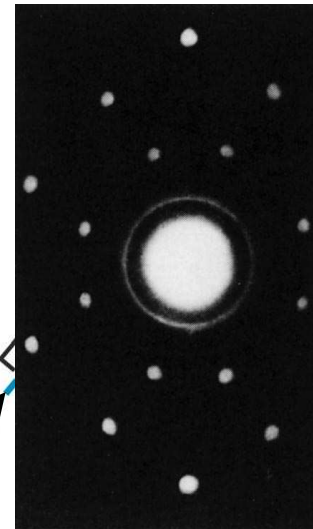
Eksperimen Davisson-Germer

- Difraksi elektron dari kristal tunggal nickel
- Membuktikan bahwa elektron adalah gelombang

54 eV
electrons
($\lambda=0.17\text{nm}$)



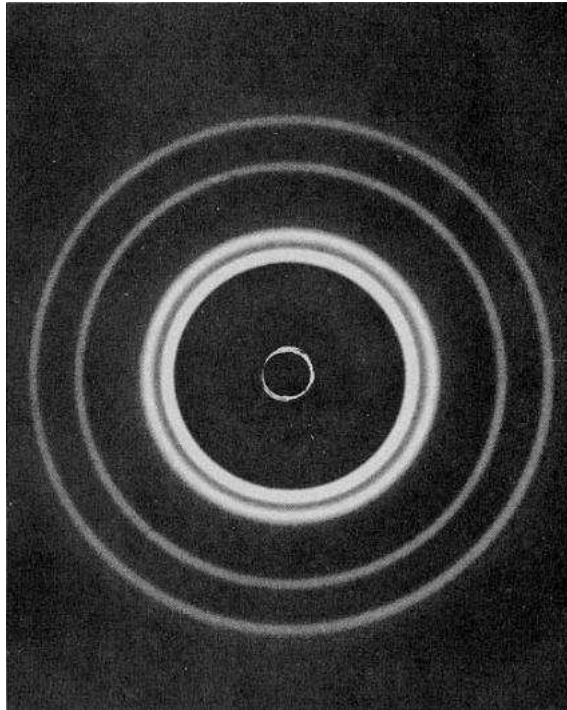
Bright spot:
constructive
interference



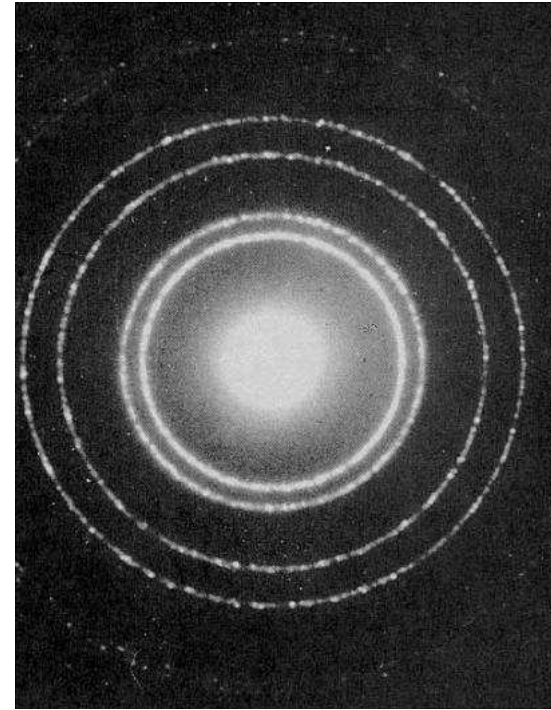
Davisson:
Nobel Prize
1937



Electron Diffraction



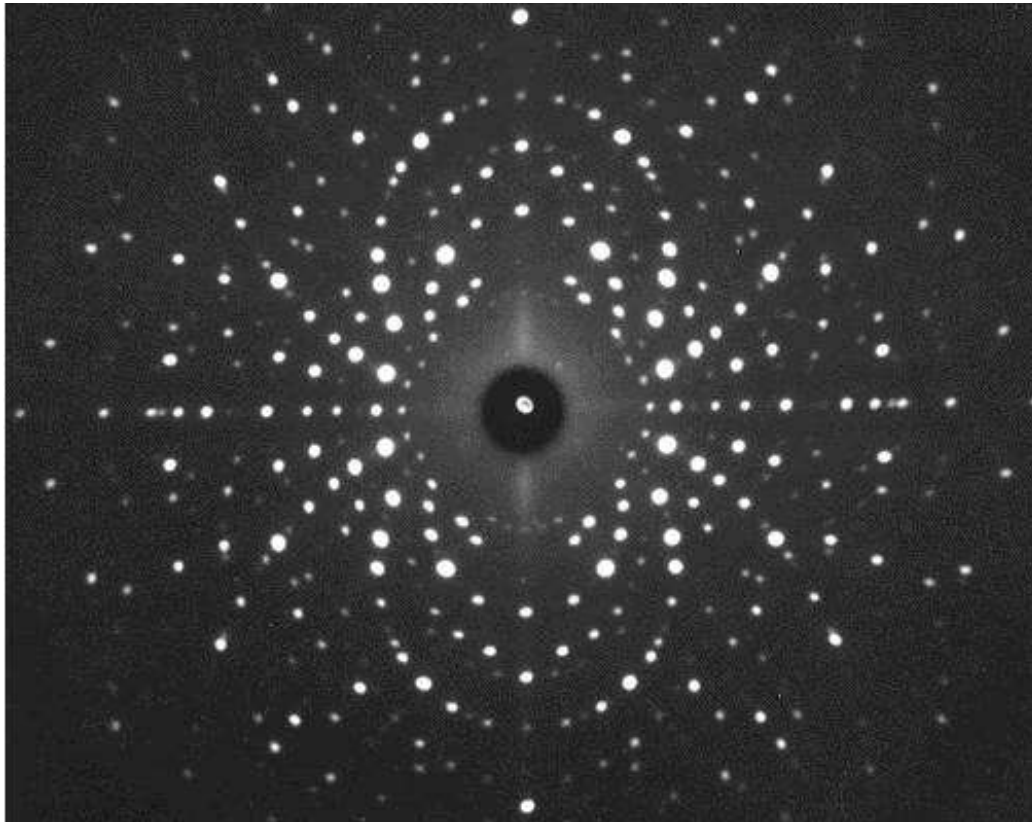
X-rays



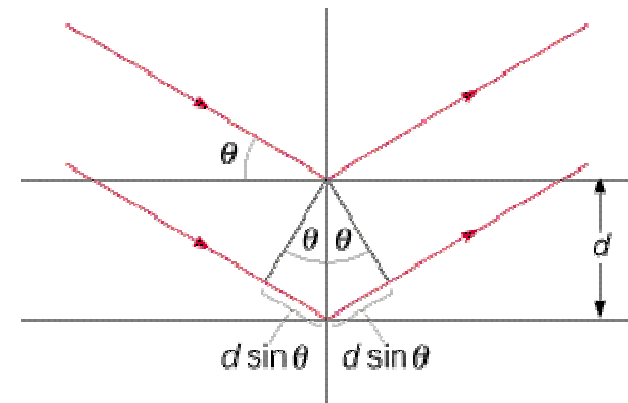
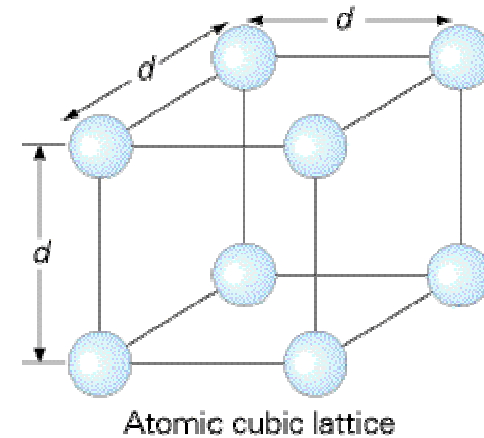
electrons

The diffraction patterns are similar because electrons have similar wavelengths to X-rays

Bragg Scattering



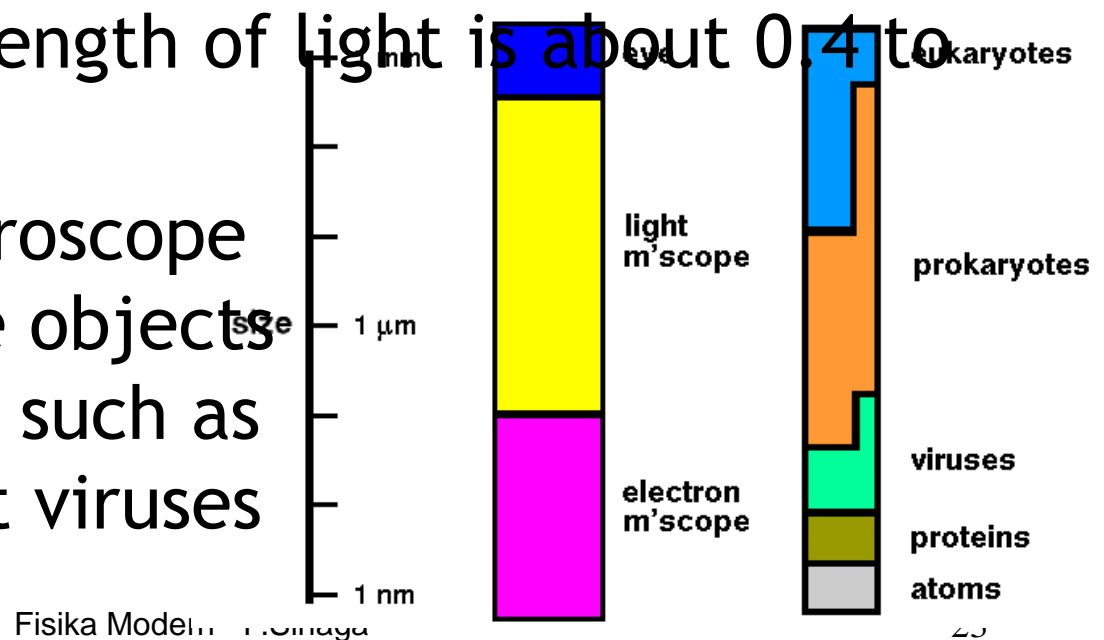
Bragg scattering is used to determine the structure of the atoms in a crystal from the spacing between the spots on a diffraction pattern (above)



Resolving Power of Microscopes

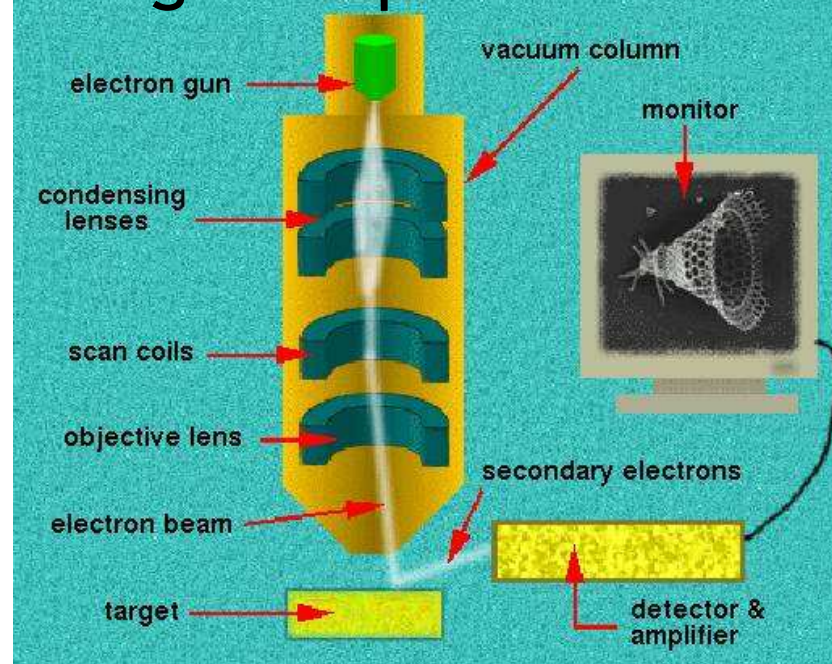
- To see or resolve an object, we need to use light of wavelength no larger than the object itself

- Since the wavelength of light is about 0.4 to 0.7 μm , an ordinary microscope can only resolve objects as small as this, such as bacteria but not viruses



Scanning Electron Microscope (SEM)

- To resolve even smaller objects, have to use electrons with wavelengths equivalent to X-rays



Particle Accelerator

- Extreme case of an electron microscope, where electrons are accelerated to very near c
- Used to resolve extremely small distances:
e.g.,
inner structure of protons

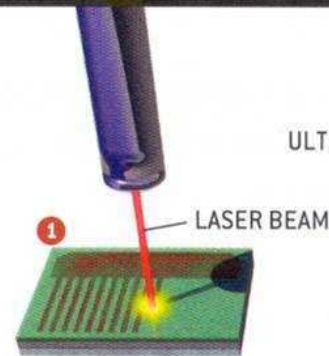


Stanford Linear Accelerator (SLAC) - Image

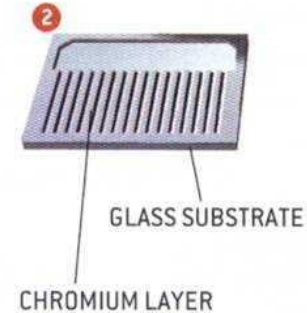
Conventional Lithography

CONVENTIONAL PHOTOLITHOGRAPHY

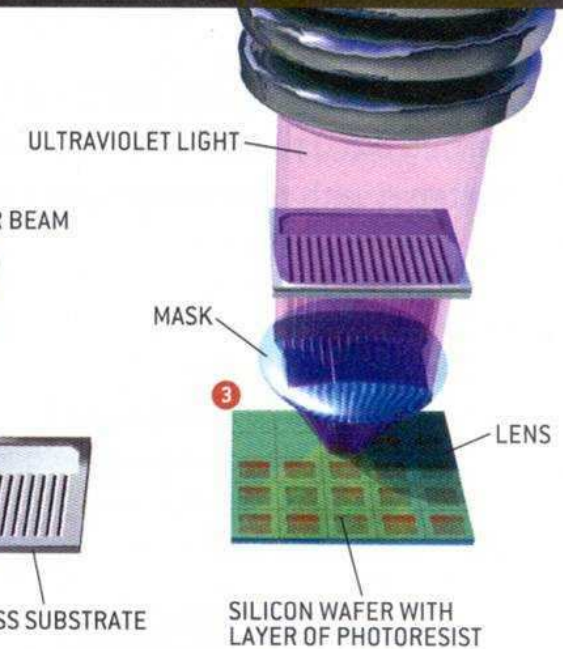
1 A laser beam writes the circuit pattern for a microchip on a layer of light-sensitive polymer that rests atop a layer of chromium and a glass substrate. The sections of polymer struck by the beam can be selectively removed.



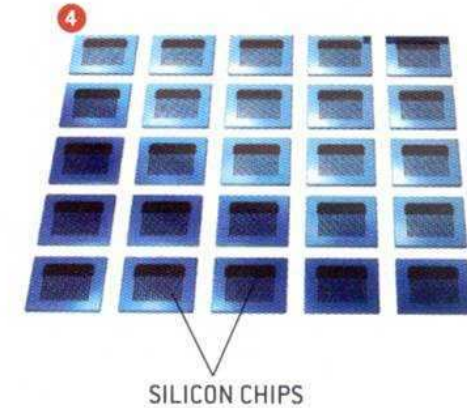
2 The exposed sections of chromium are also removed, and the rest of the polymer is dissolved. The result is a mask—the equivalent of a photographic negative.



3 When a beam of ultraviolet light is directed at the mask, the light passes through the gaps in the chromium. A lens shrinks the pattern by focusing the light onto a layer of photoresist on a silicon wafer.

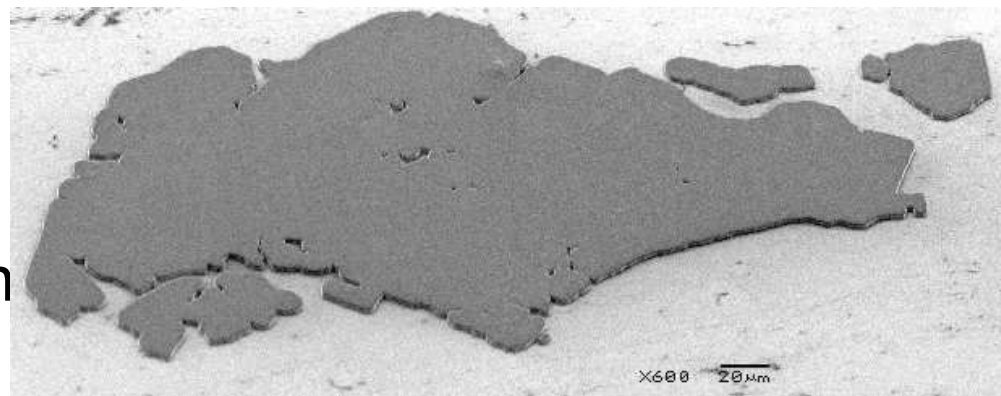
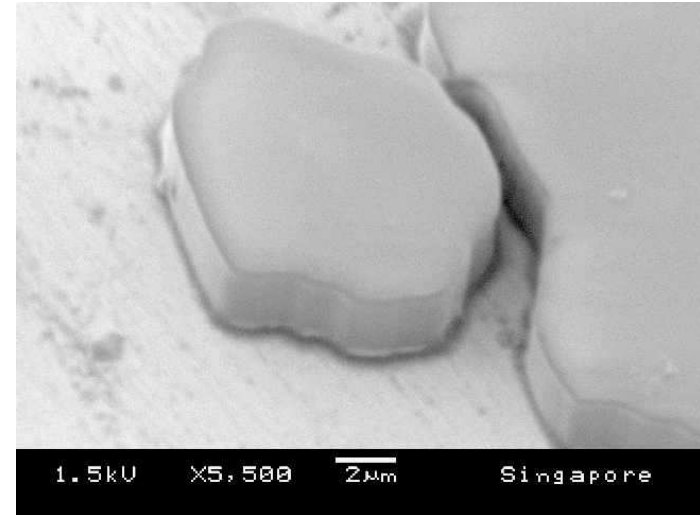


4 The exposed parts of the photoresist are removed, allowing the replication of the pattern in miniature on the silicon chips.

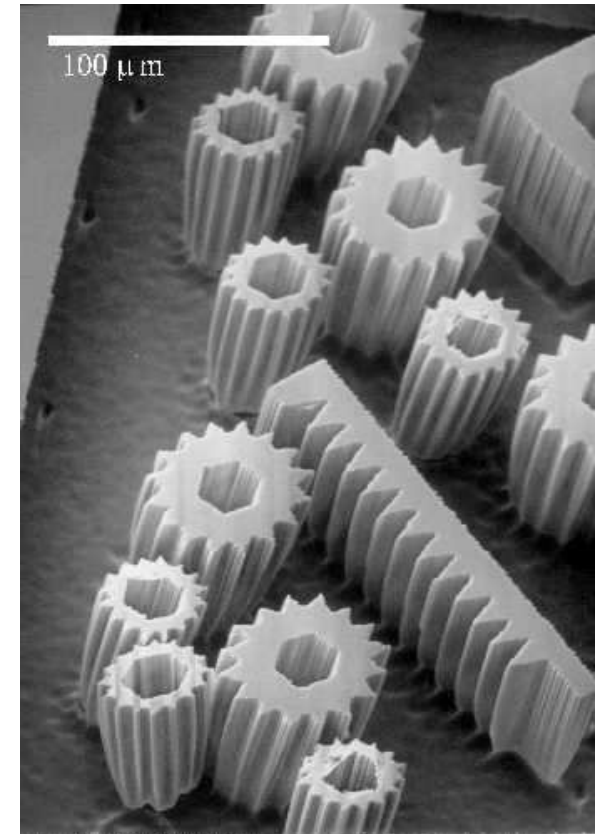
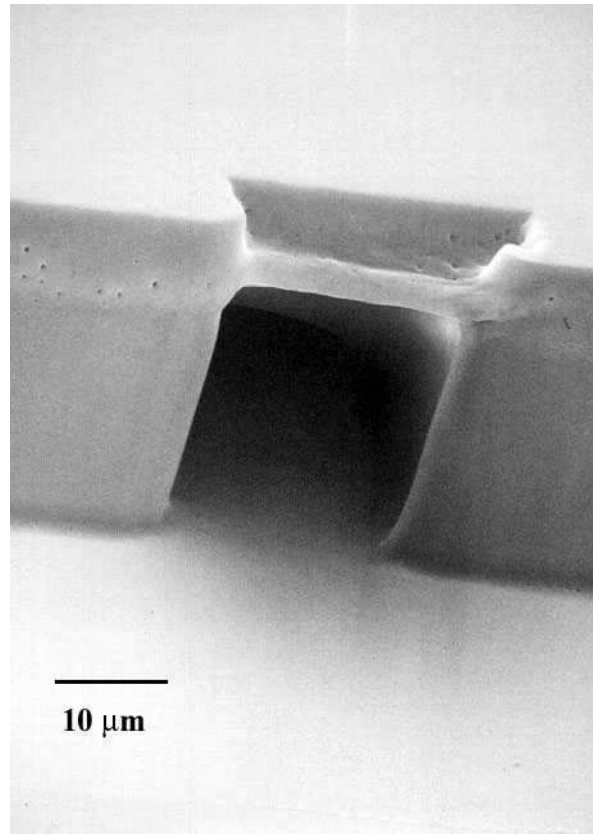
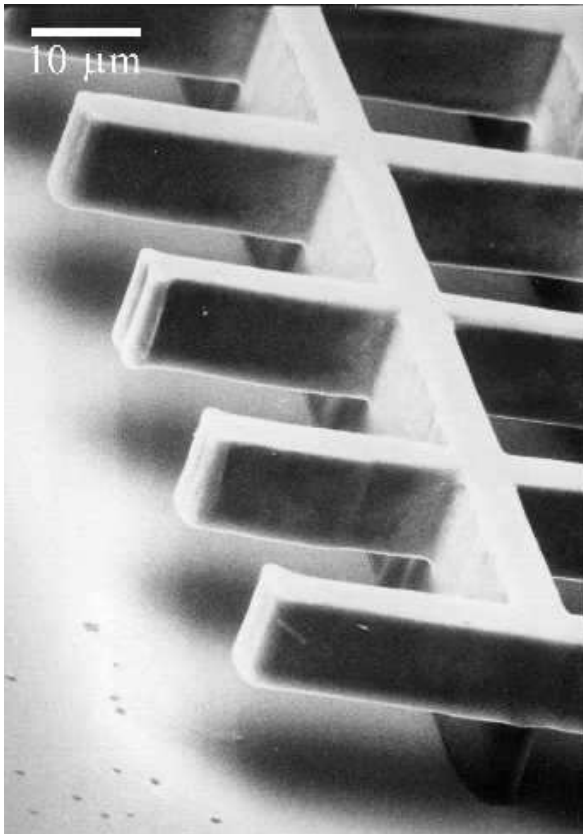


Limits of Conventional Lithography

- The conventional method of photolithography hits its limit around 200 nm (UV region)
- It is possible to use X-rays but is difficult to focus
- Use electron or proton beams instead ...



Proton Beam Micromachining (NUS)



Particle-wave duality

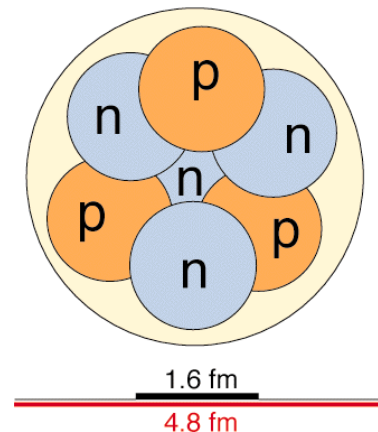
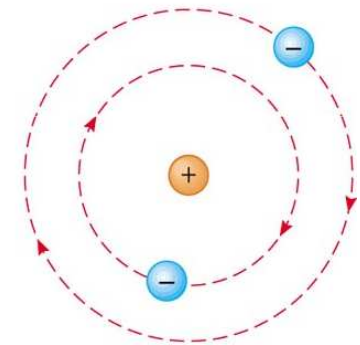
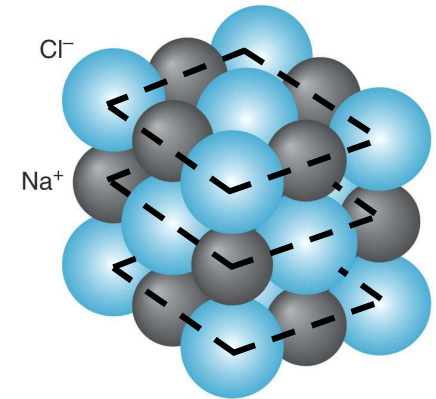
- Seperti cahaya, partikel juga bersifat dualisme
 - Dapat menunjukkan sifat seperti partikel (tumbukan, dsb)
 - Dapat menunjukkan sifat seperti gelombang (interferensi, difraksi , dsb).
- Namun kedua sifat tersebut tidak pernah muncul secara bersamaan.
- Partikel seperti itu dapat dijelaskan memakai “bahasa partikel” atau “bahasa gelombang” tergantung fenomenanya

interferensi partikel

- ide interferensi ini digunakan untuk mempelajari tentang struktur materi

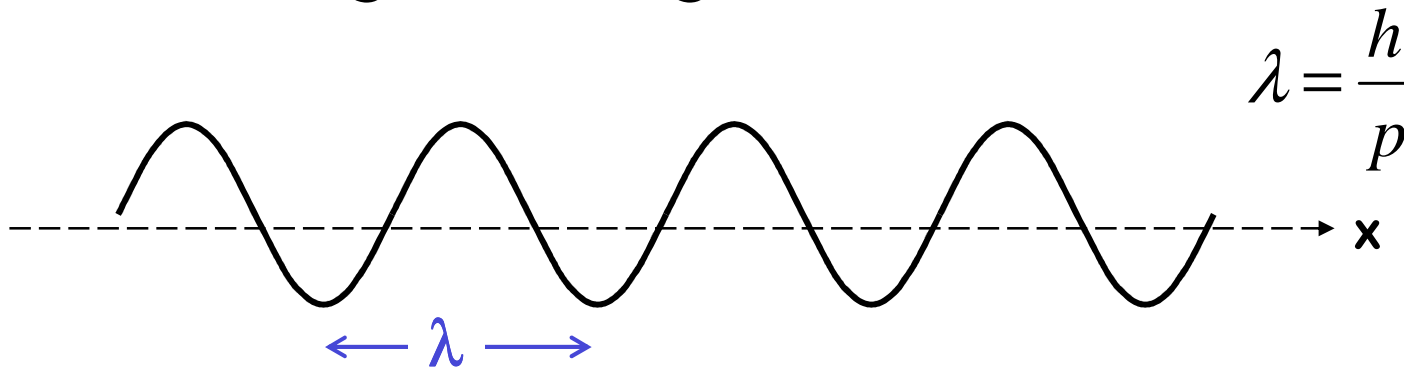
$$\lambda = \frac{1240 \text{ eV} - nm}{\sqrt{2 \times m_0 \text{ MeV}}} \frac{1}{\sqrt{KE}}$$

- Elektron 100 eV : $\lambda = 0.12 \text{ nm}$
 - Kristal kristal juga atom
- Elektron 10 GeV :
 - Inti atom(nucleus), 3.2 fermi, 10^{-6} nm
- Proton 10 GeV :
 - Inside the protons and neutrons: .29 fermi



Let's study electron waves

- Ini adalah gelombang materi:



...dimanakah elektronnya?

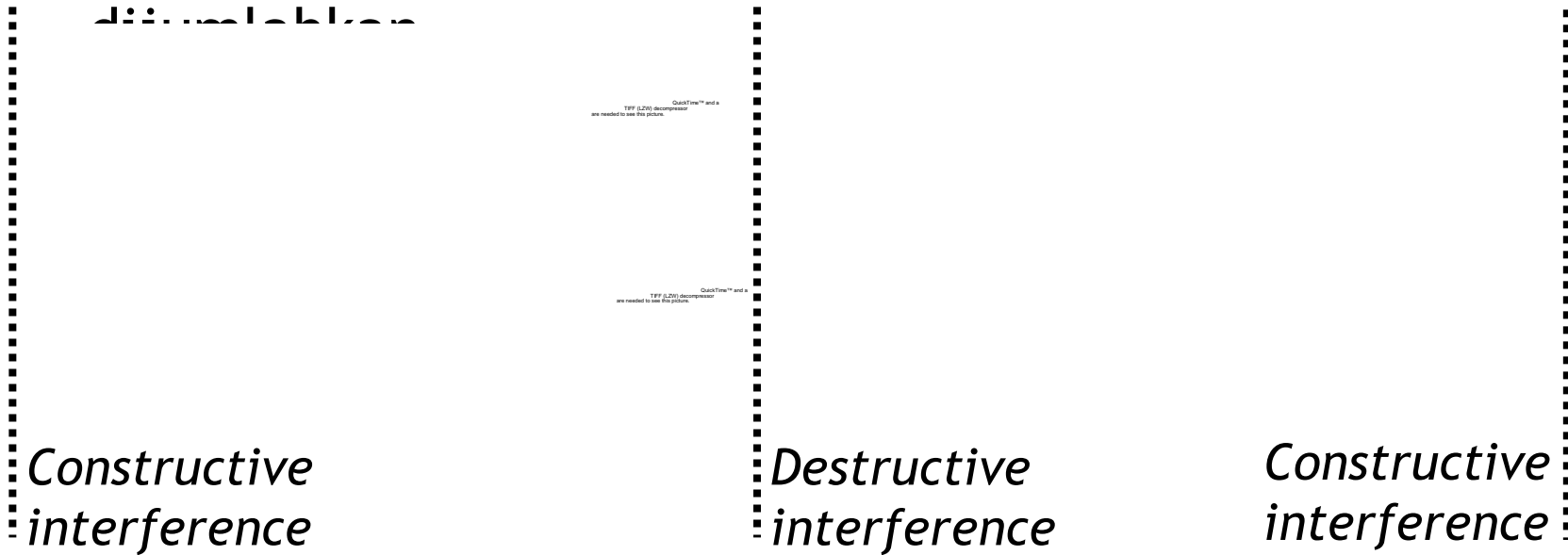
- Gelombang mengembang takterbatas dalam arah +x dan -x

Analogi dengan bunyi

- Gelombang bunyi juga memiliki karakteristik yang sama
- Tetapi sering kita dapat menentukan lokasi gelombang bunyi
 - *contoh. Pantulan echoes* dari dinding . Dapat membuat pulsa bunyi
- contoh:
 - Cepat rambat bunyi di udara = 340 m/s
 - Spatial extent dari pulsa bunyi = 3.4 meters.

Beat frequency: spatial localization

- What does a sound ‘particle’ look like?
 - contohnya ialah ‘beat frequency’ (layangan)
 - Dua gelombang bunyi yang frekuensinya hampir sama dijumlahkan

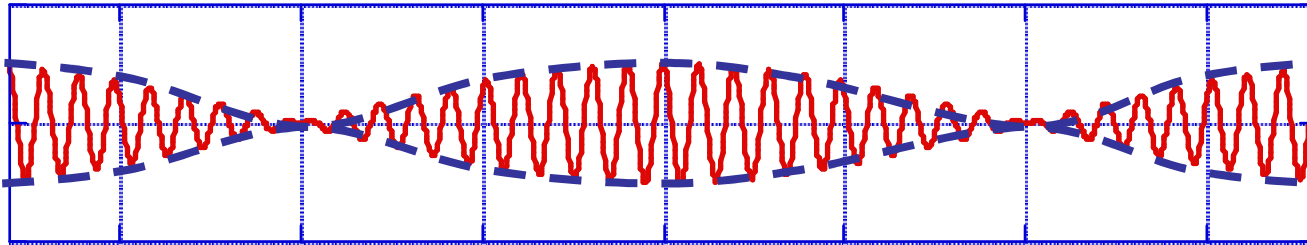


amplitude besar

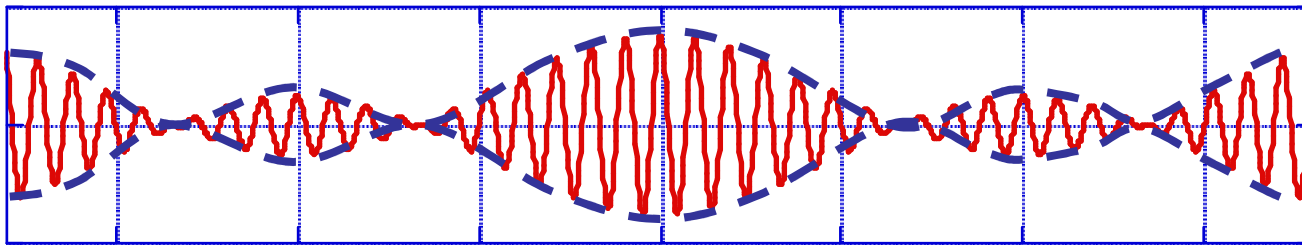
Amplitude kecil

Amplitude besar

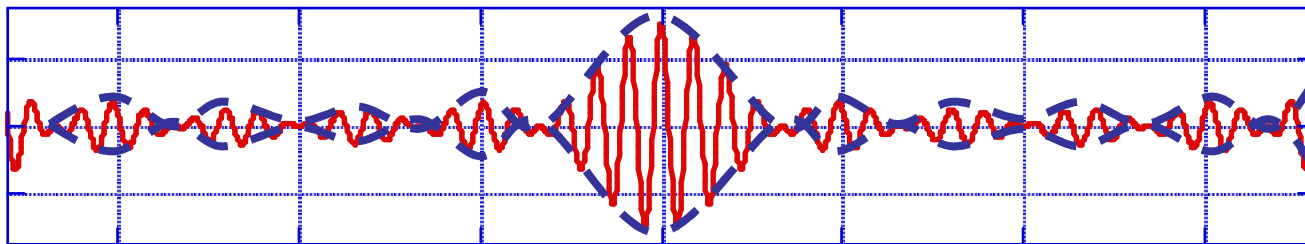
Making a particle out of waves



440 Hz +
439 Hz

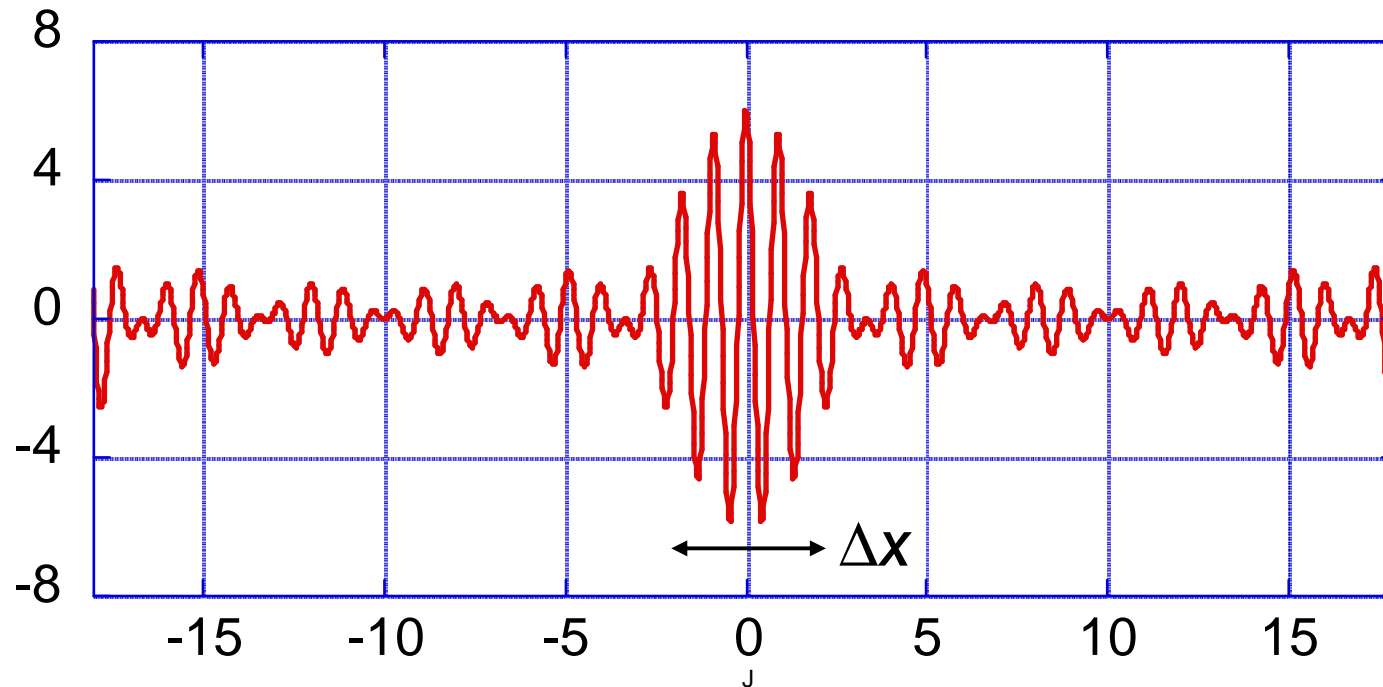


440 Hz +
439 Hz +
438 Hz



440 Hz +
439 Hz +
438 Hz +
437 Hz +
436 Hz

Spatial extent dari gelombang bunyi terlokalisasi

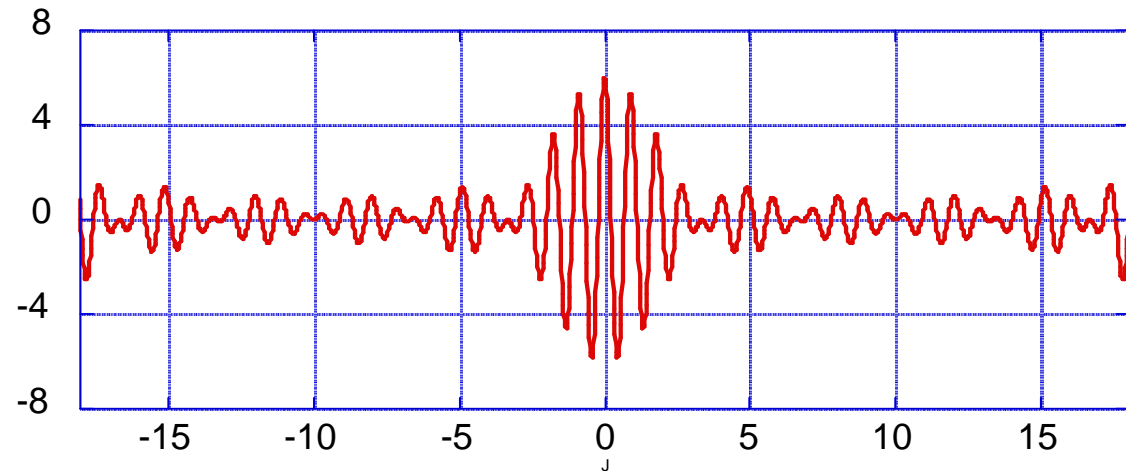


- Δx = spatial spread dari 'wave packet'
- Spatial extent mengecil ketika spread termasuk panjang gelombang membesar.

Kejadian sama untuk matter wave

- Membangun partikel terlokalisasi dengan cara menjumlahkan gelombang gelombang yang panjang gelombangnya berbeda sedikit.
- Menurut de Broglie $\lambda = h / p$, masing masing dari komponen ini memiliki momentum yang berbeda sedikit.
 - Kita katakan bahwa terdapat ‘ketidakpastian(uncertainty)’ dalam momentum atau energi
- Dan tetap masih tidak dapat diketahui lokasi exact dari partikel!
 - Gelombang masih menyebar meliputi Δx (‘uncertainty’ posisi)
 - Δx dapat direduksi, tetapi panjang gelombang jadi lebih menyebar (menjadikan penyebaran dalam momentumnya).

Interpretasi



- Untuk bunyi kita dapat mengatakan bahwa pulsa bunyi berada dipusat pada suatu posisi, tetapi memiliki sebaran.
- Tidak seperti itu untuk partikel mekanika quantum.
- Banyak pengukuran mengindikasikan bahwa elektron adalah suatu point particle.
- Interpretasi, menentukan besar dari ‘wave-pulse’ elektron di suatu titik dalam ruang adalah sama dengan menentukan **probability** menemukan elektron pada titik tersebut.

Heisenberg Uncertainty Principle

- menggunakan
 - Δx = uncertainty posisi
 - Δp = uncertainty momentum
- Heisenberg menunjukkan bahwa perkalian
 $(\Delta x) \cdot (\Delta p)$ selalu lebih besar dari $(h / 4\pi)$

Planck's
constant

Sering ditulis sebagai $(\Delta x)(\Delta p) \sim \hbar/2$

dimana $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ disebut 'h-bar'

The Uncertainty Principle

The more precisely the position is determined, the less precisely the momentum is known in this instant, and vice versa.

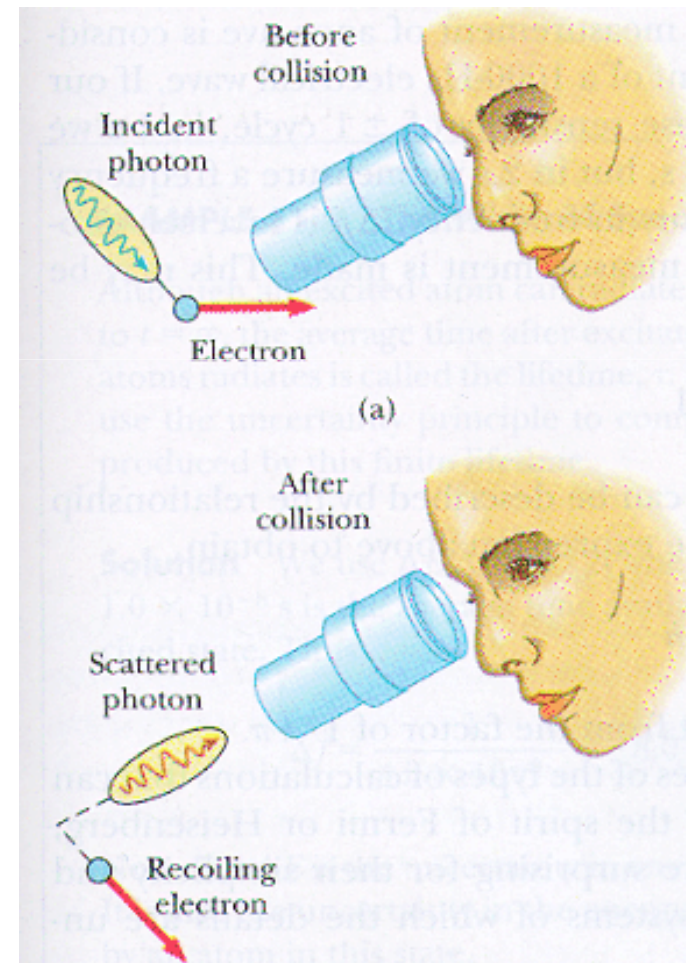
Werner Heisenberg, 1927

$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}$$



Position dan Momentum partikel

- Dalam mekanika Quantum tidak mungkin menentukan posisi dan momentum (kecepatan) dari suatu partikel secara simultan (pada saat yang bersamaan) dengan ketelitian tak hingga.
 - suatu partikel sebenarnya tidak memiliki posisi dan momentum pada saat yang sama.



Thinking about uncertainty

$$(\Delta x)(\Delta p) \sim \hbar/2$$

Untuk suatu classical particle, $p=mv$, jadi ketidakpastian untuk momentum berhubungan dengan ketidakpastian untuk kecepatan.

$$(\Delta x)(\Delta v) \sim \hbar/2m$$

Dikatakan bahwa ketidakpastian kecil untuk benda massive, tetapi menjadi sangat penting untuk benda benda sangat ringan , seperti elektron elektron.

Benda besar atau massive tidak menunjukkan efek dari mekanika quantum.