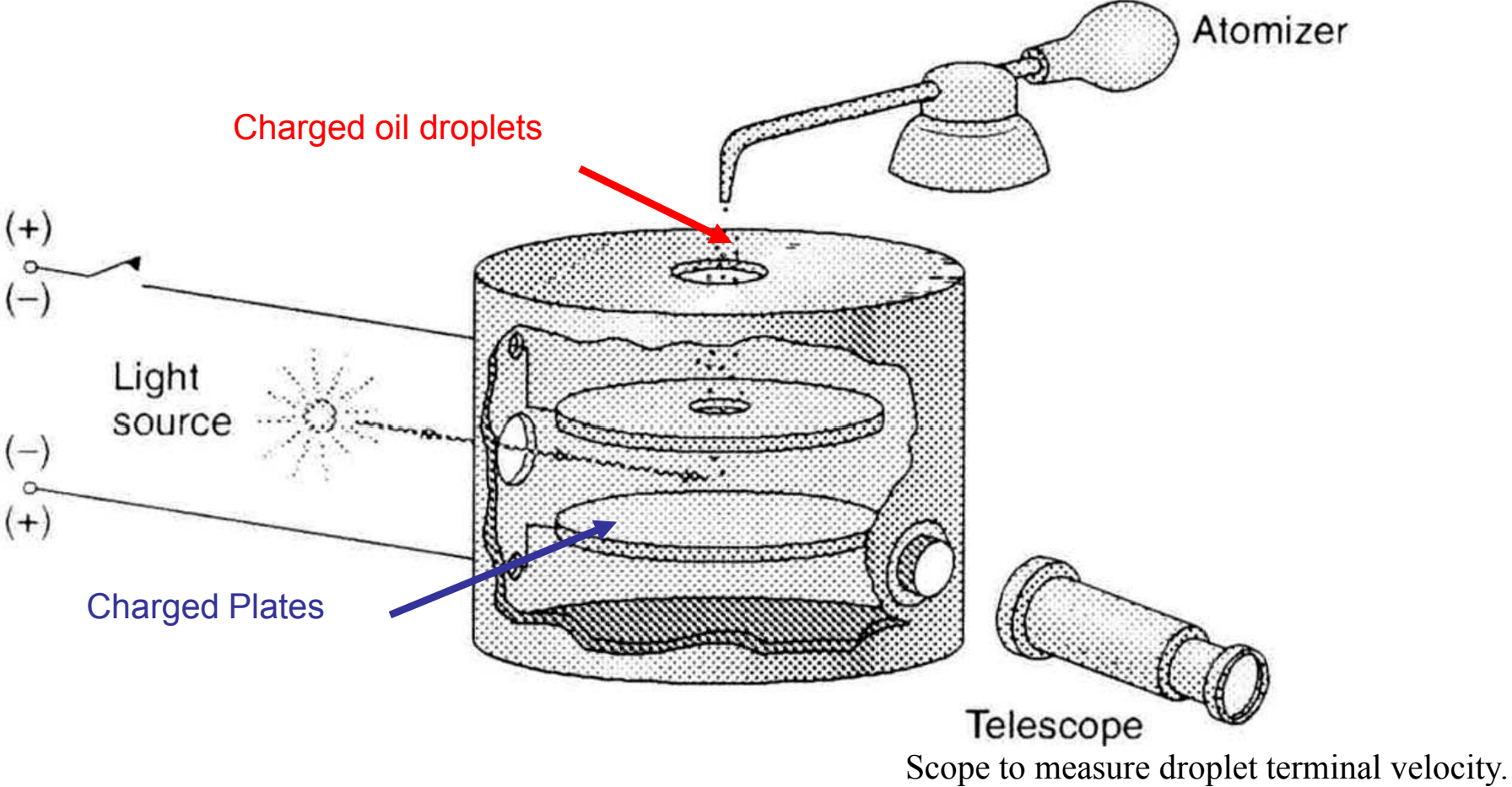


Electrons: Millikanův pokus.



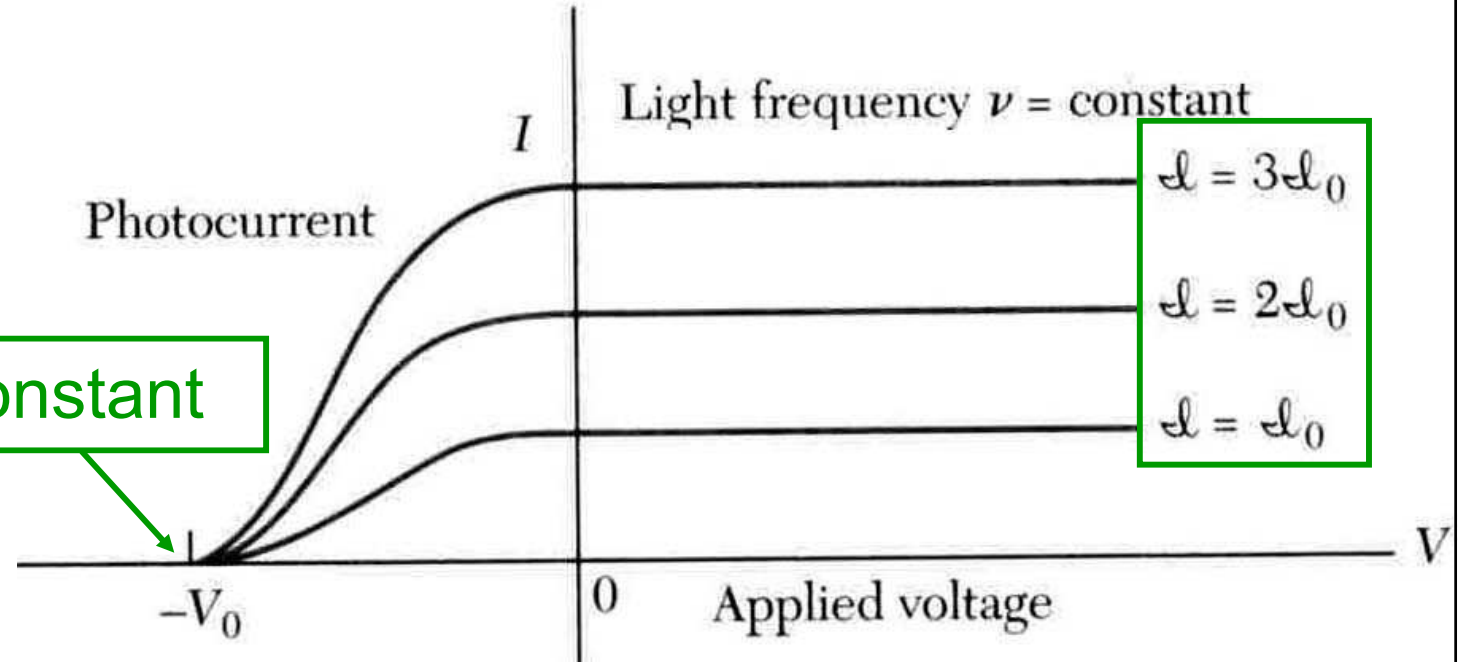
Rekapitulace fotoefektu:

1. Při ozařování vodičů se z nich může uvolňovat záporný elektrický náboj (elektrony).
2. Pro každý materiál existuje prahová frekvence f_0 , taková, že pro všechny $f > f_0$ jev vždy nastane.
3. Mezi začátkem ozařování a emisí elektronů neexistuje časová prodleva.
4. Hustota fotoproudu roste s intenzitou dopadajícího záření.
5. Kinetická energie E_k vyletujících elektronů nezávisí na intenzitě ozařování.
6. Kinetická energie E_k vyletujících elektronů roste s frekvencí dopadajícího záření.

Photoelectric Effect:

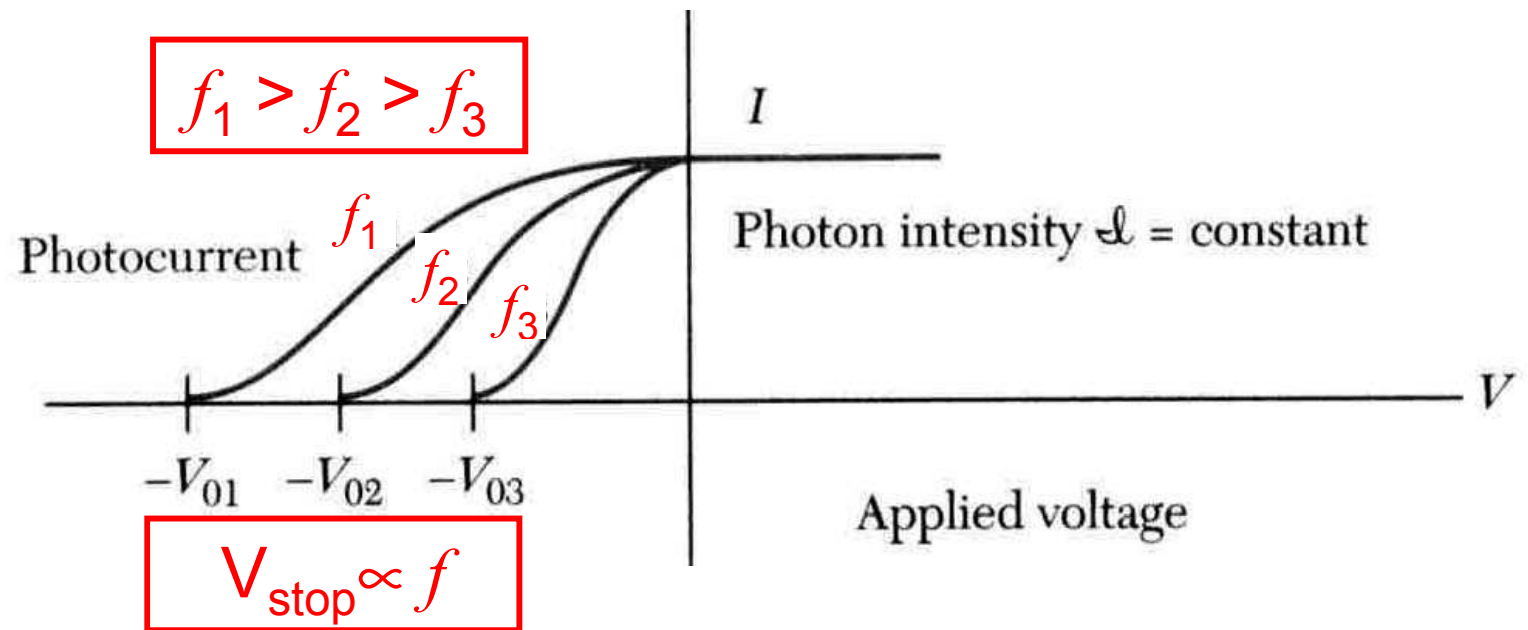
Intensity I
dependence

$$V_{\text{stop}} = \text{Constant}$$



Frequency f
dependence

$$f_1 > f_2 > f_3$$

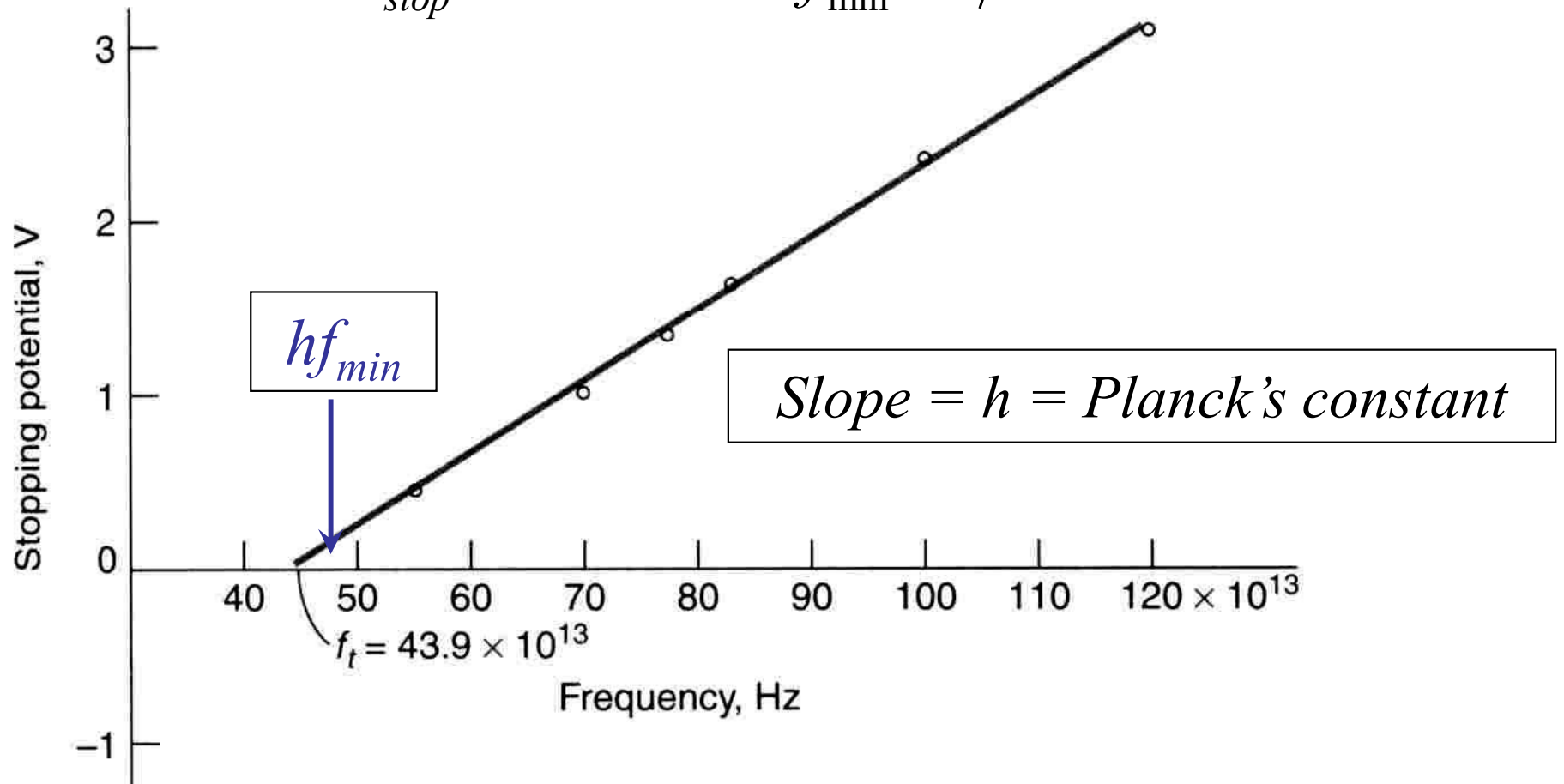


$$V_{\text{stop}} \propto f$$

Photoelectric Effect: V_{stop} vs. Frequency

$$eV_{stop} = hf - \phi$$

$$V_{stop} = 0 \Rightarrow hf_{min} = \phi$$



Fotony

Einstein považoval fotony za objekty s řadou vlastností typických pro částice. Přiřadil jim energii, hybnost i hmotnost,

$$E = h \cdot f$$

Fotony se pohybují rychlostí světla --> relativistické objekty

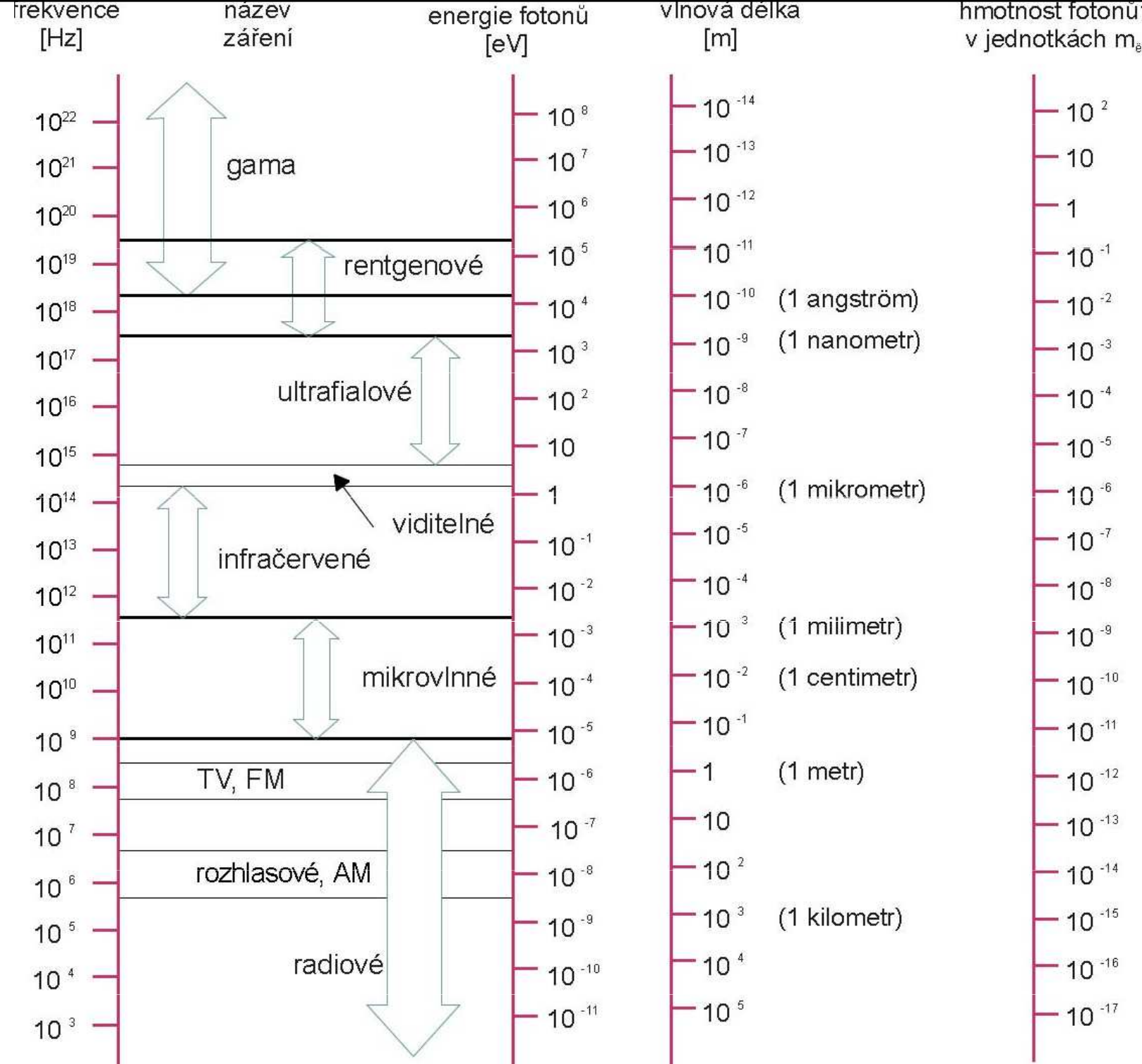
$$m = \frac{E}{c^2} = \frac{hf}{c^2}, \quad \text{relativistická hmotnost fotonu}$$

Podle STRy jsou energie a velikost hybnosti částice dány výrazy

$$E = mc^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad p = mv = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

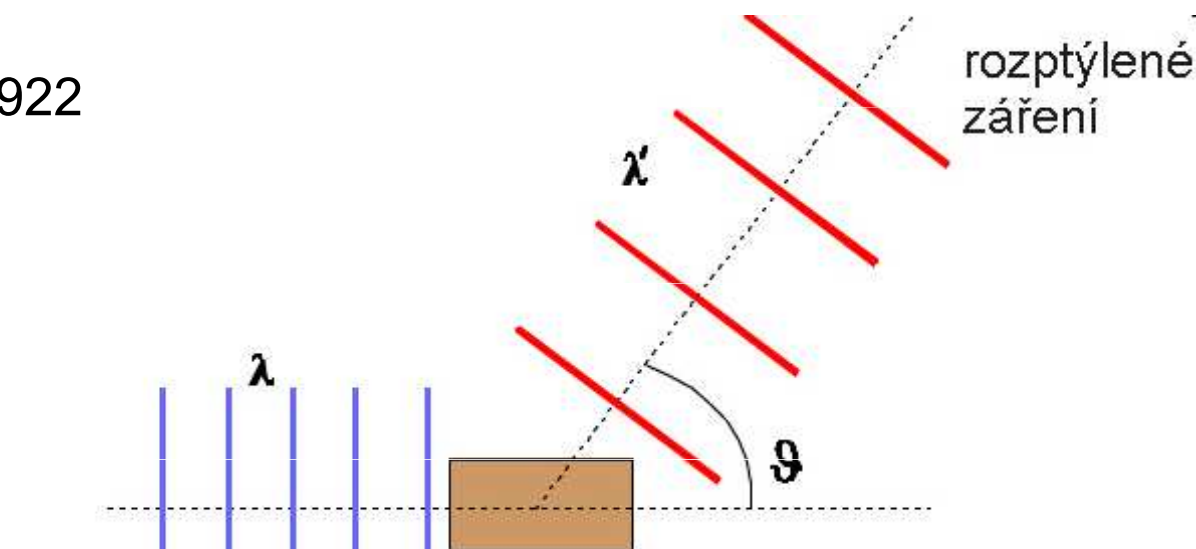
Pro velikost hybnosti pak platí

$$p = mv = mc = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda}.$$



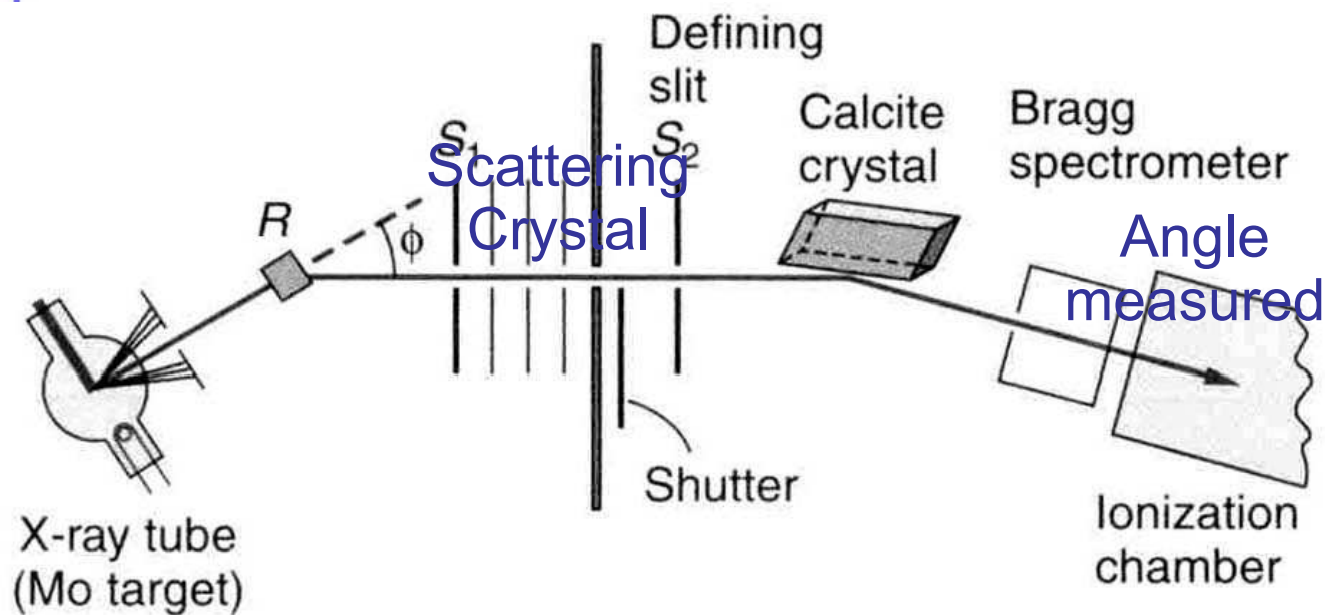
Comptonův rozptyl: “částicové” chování fotonu

1922

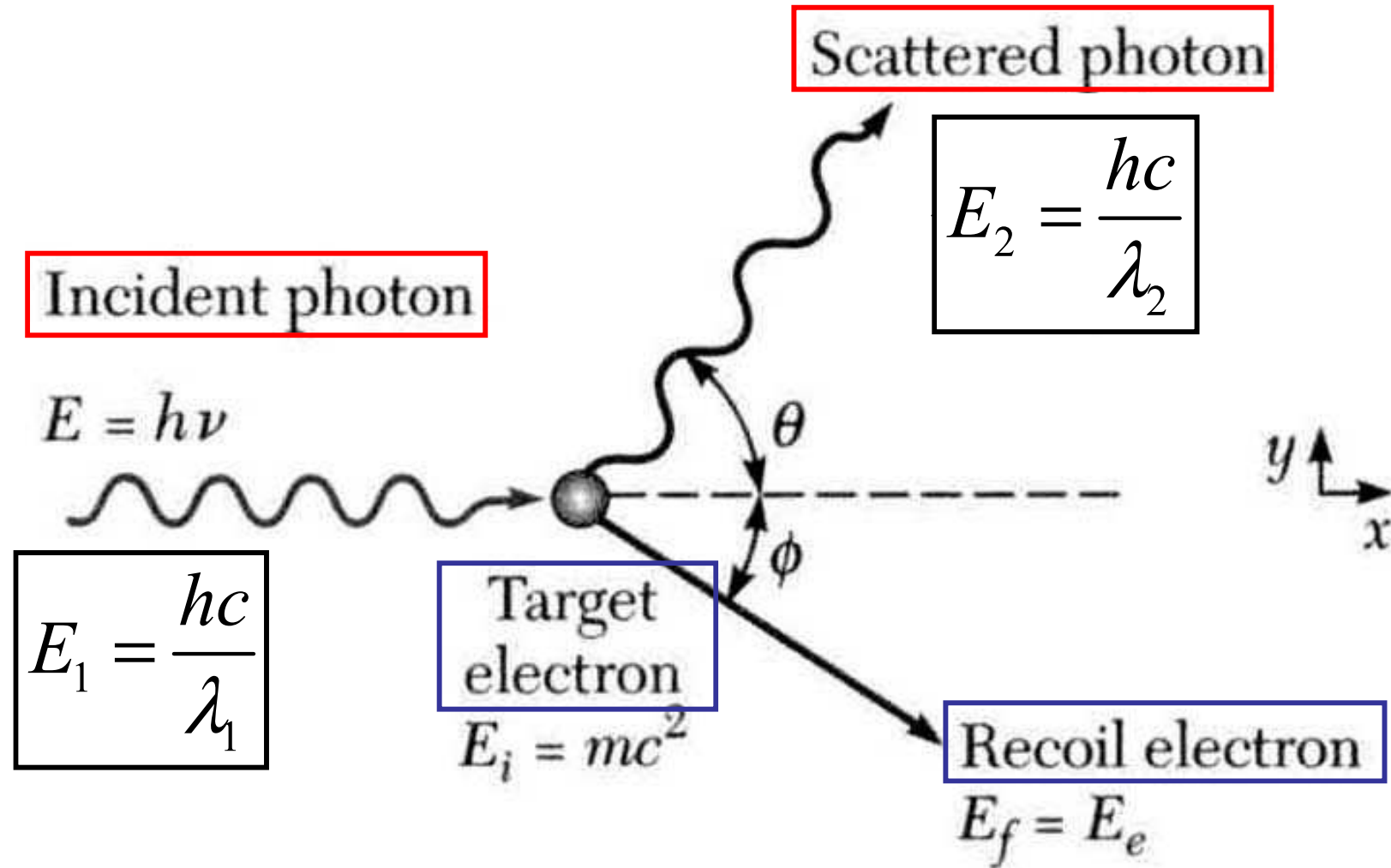


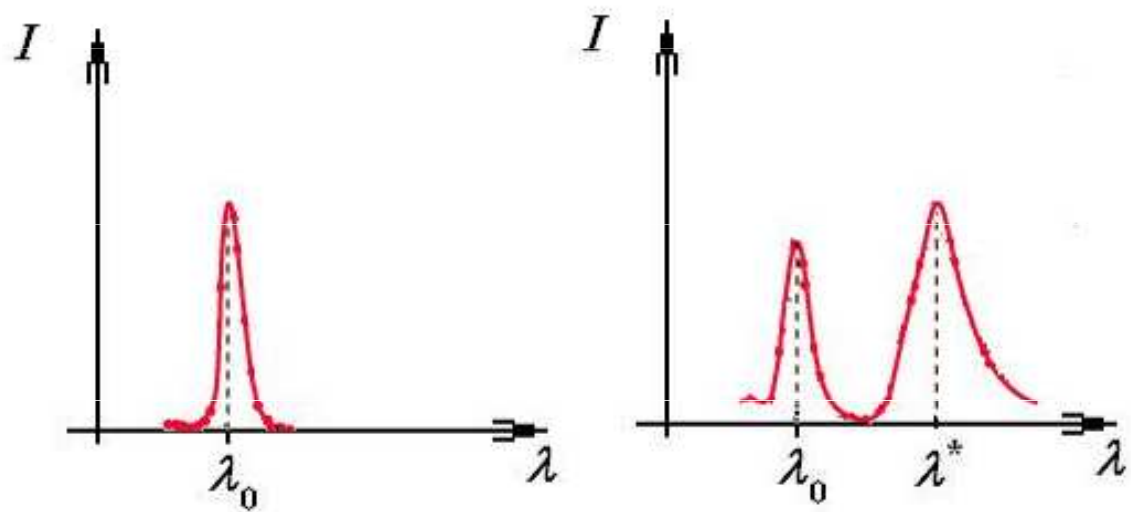
Scattered X-ray

Incoming X-ray



Compton: Schema





Rozborem **experimentálních dat** Compton určil, že závislost vlnové délky na úhlu rozptylu lze popsat vztahem: λc byla experimentálně určená konstanta.

$$\Delta\lambda = \lambda c(1 - \cos \phi), \quad \lambda c = 0.0024 \text{ nm}$$

Teoretická odvození klasicky nevedla ke shodě s experimentálními výsledky, Compton odvodit vztah pomocí předpokladu, že na dopadající záření lze pohlížet jako na soubor objektů (fotonů), které mají energii $E = hf$ a hybnost P . Na rozptyl záření na vzorku pohlížel jako na srážky fotonů s elektrony. Podle STR má částice s klidovou hmotností m_0 , která se pohybuje rychlostí v , hmotnost:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Rychlost fotonů je ovšem rovna c a tedy by pro jejich hmotnost mělo platit: $m = \frac{m_0}{0}$.

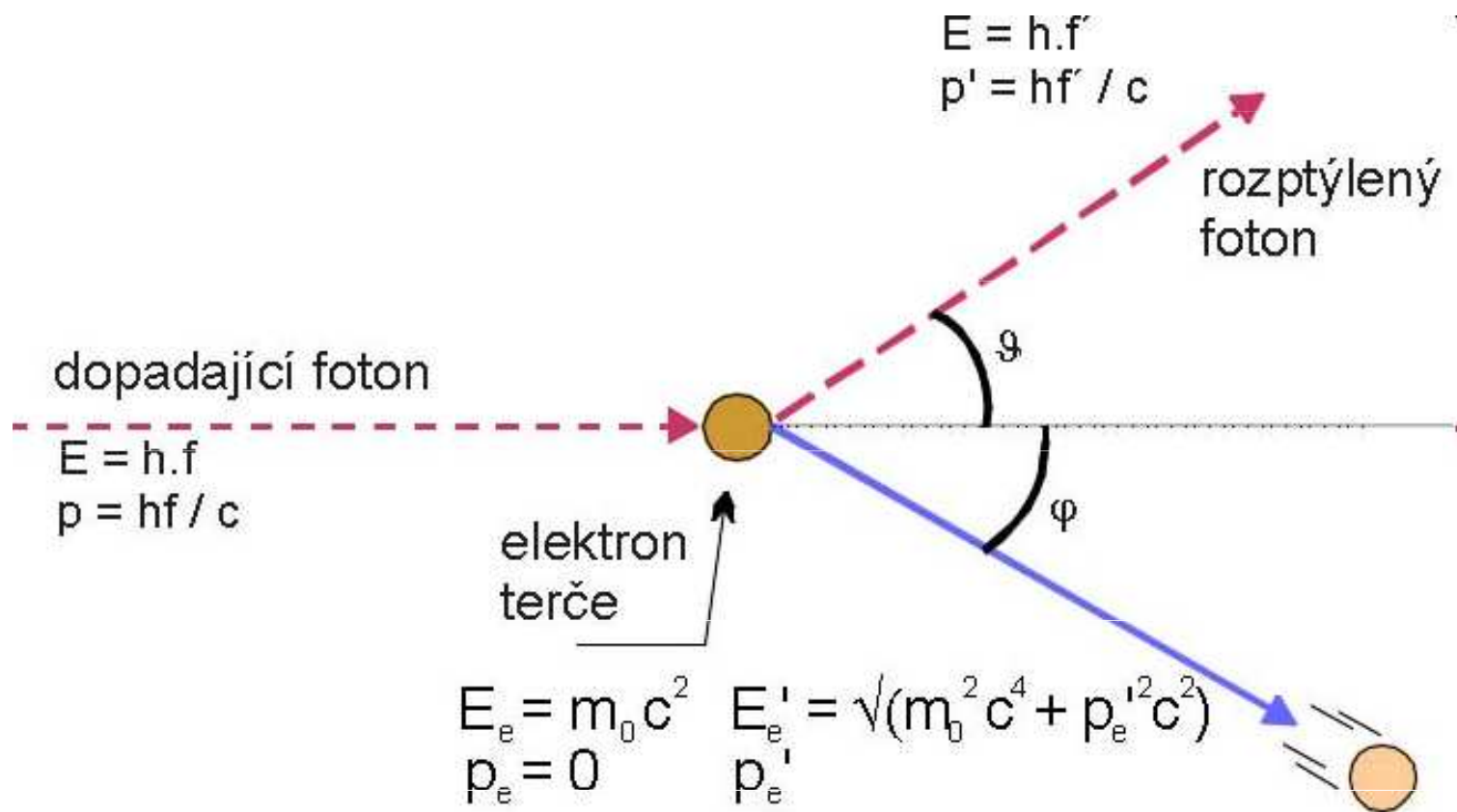
Pro nenulovou klidovou hmotnost je výraz nekonečně velký. Proto musí být klidová hmotnost fotonu nulová.

Podle teorie relativity dále mezi velikostí hybnosti p objektu a jeho celkovou energií E platí vztah:

$$E = \sqrt{p^2 c^2 + m_0^2 c^4}.$$

Protože je klidová hmotnost fotonu nulová, bude mezi energií ε jednoho fotonu a velikostí jeho hybnosti P platit:

$$\varepsilon = \sqrt{P^2 c^2}.$$



$$hf + E_e = hf' + E_e'$$

$$\mathbf{p} + \mathbf{0} = \mathbf{p}' + \mathbf{p}_e'$$

$$hf = hf' + (E_e' - E_e).$$

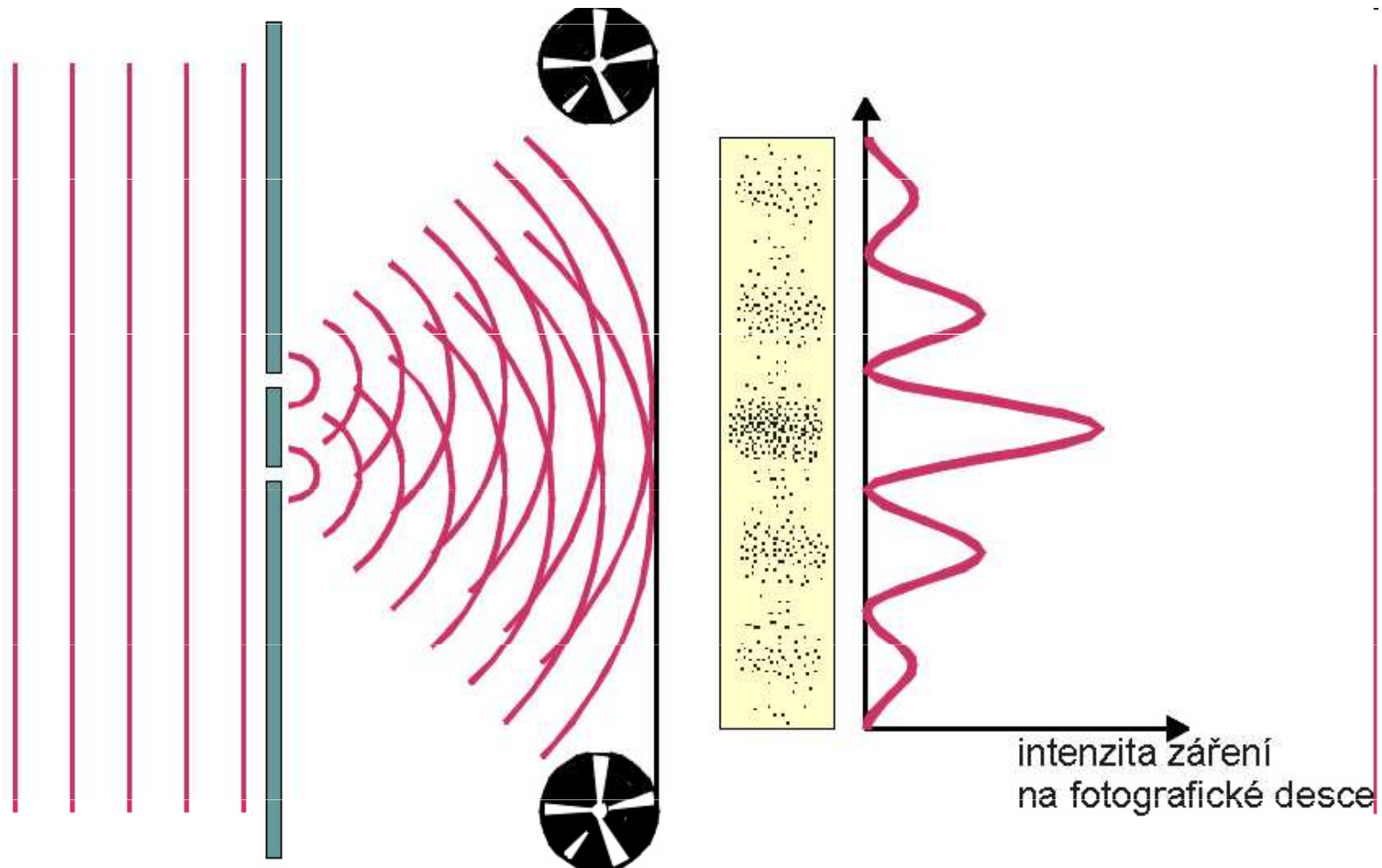
Odtud plyne $hf > hf'$.

Frekvence rozptýleného záření je menší než záření dopadajícího

fyzikální obraz elektromagnetického záření

vlnová i částicová povaha je vlastní elmg záření.

Tentýž paprsek, který se ohýbá difrakcí na štěrbině či mřížce, může způsobit emisi fotoelektronů z kovu. Vlnová teorie a kvantová hypotéza nejsou rozporné, vzájemně se doplňují při popisu vlastností elektromagnetického záření.



De Broglieho vlnová hypotéza

předložil v roce 1924 francouzský fyzik Louis DE BROGLIE.

De Broglieho hypotéza

Každému **volnému** hmotnému objektu s hybností p je přiřazena rovinná monochromatická vlna o vlnové délce dané výrazem

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

Hybnost objektu o hmotnosti m , který se pohybuje rychlostí v , je $p=mv$, tedy jeho vln.délka

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

kde m je relativistická hmotnost.

Pro rychlosti $v \ll c$ je kinetická energie hmotného objektu dána vztahem

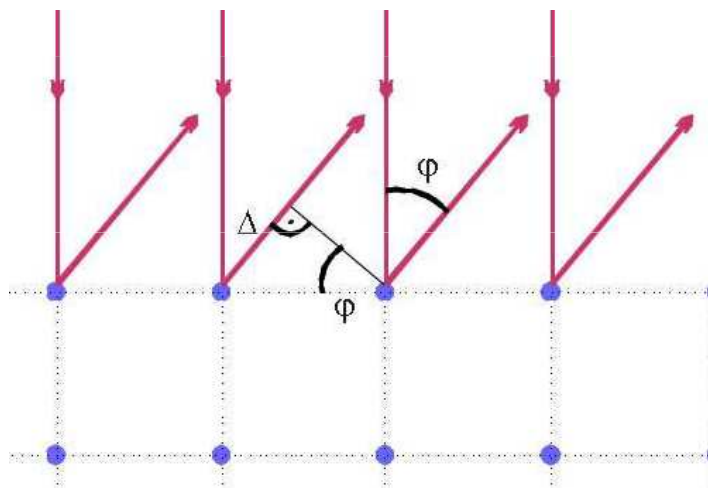
$$E_k = \frac{p^2}{2m} \quad \lambda = \frac{h}{\sqrt{2mE_k}}$$

Davissonův-Germerův pokus

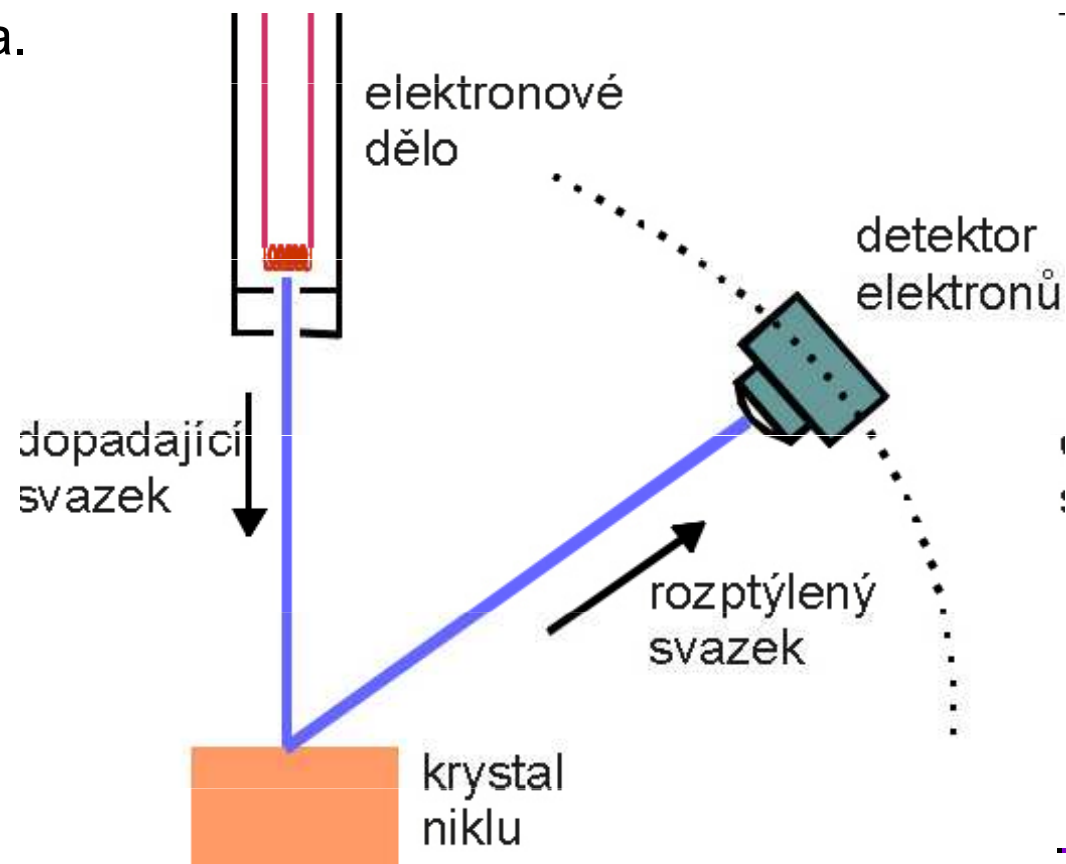
Vlnové vlastnosti hmotných objektů experimentálně potvrdili v roce 1927 DAVISSON a GERMER.

Při měření intenzity rozptýlených elektronů v závislosti na směru, pozorovali zřetelná maxima a minima.

K vysvětlení užili de Broglieho vlnovou hypotézu. Navrhli interpretaci, podle níž se elektrony rozptylují na atomech krystalu obdobně jako paprsky RTG.



svazek urychlených elektronů



$$\lambda = \frac{a \sin \varphi}{k}$$

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_e eU}}$$

fyzikální obraz hmotných objektů mikrosvěta

Světlo jako vlna

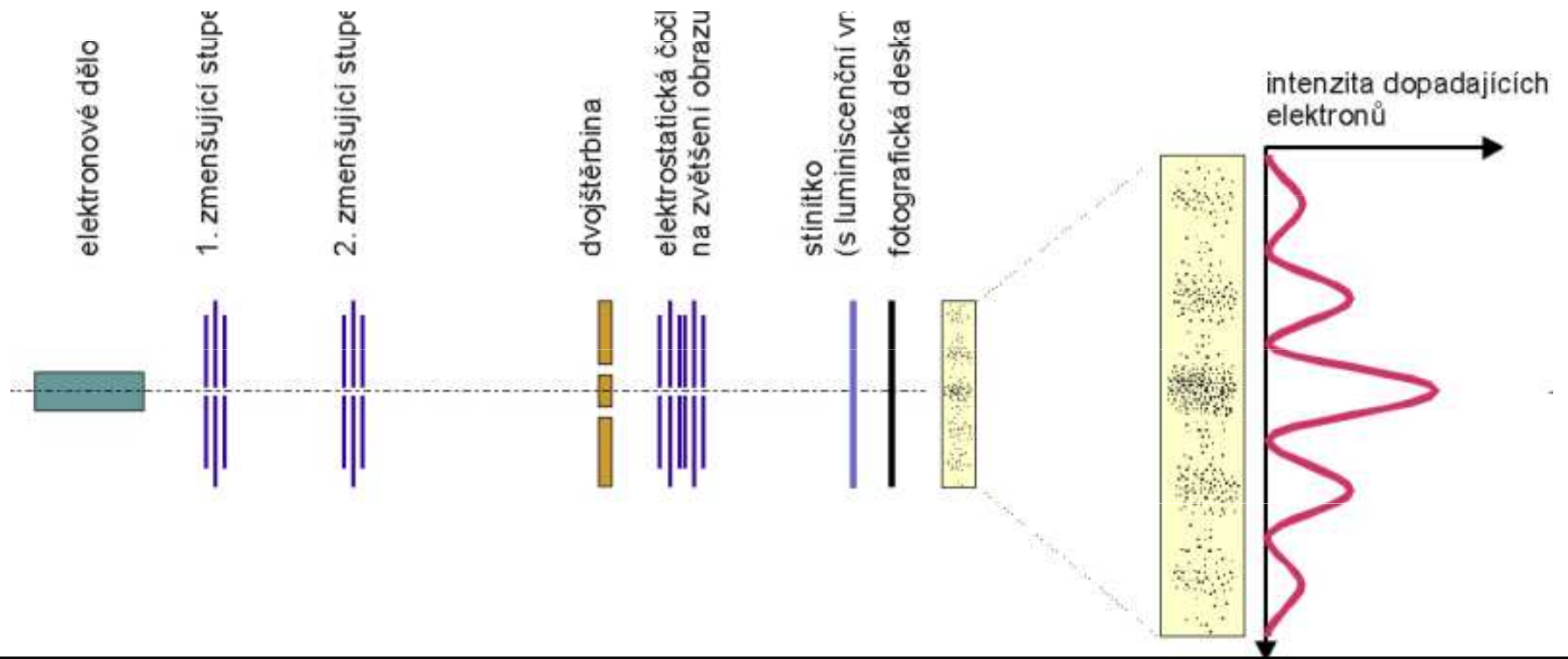
Fotoefekt
Albert Einstein
(1905)

Světlo jako
kulička (foton)

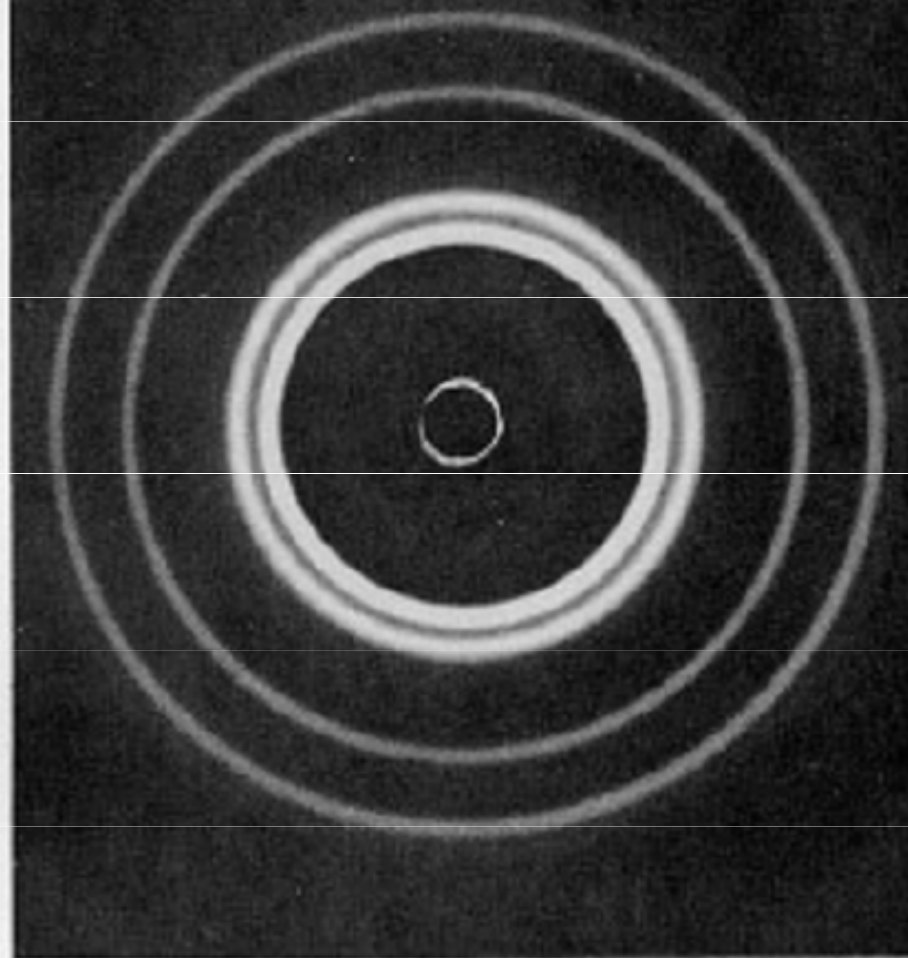
Elektron jako vlna

de Broglie (1924)
Germer, Davisson
(1927)

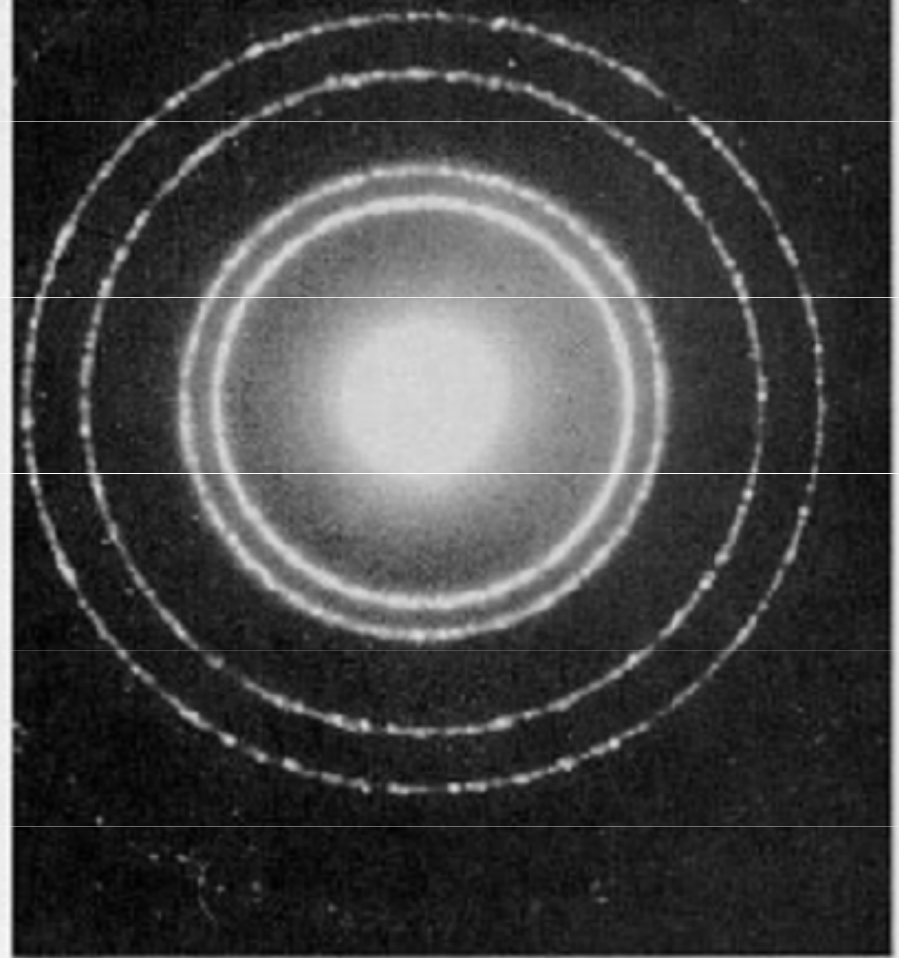
Elektron jako kulička



Diffraction pattern of X-ray beam passing through Al foil



Diffraction pattern of electron beam passing through Al foil



Principy kvantové teorie

- Chování částic se někdy více blíží chování „kuliček“, jindy zase „vln“. Nelze ale vést striktní hranici mezi těmito typy chování.
 - Mohou se vyskytovat jen některé hodnoty energie i jiných veličin (kvantování).
 - Některé veličiny nelze určit současně a obě dokonale přesně (princip neurčitosti).
-
- Obvykle nelze jednoznačně předpovědět výsledek konkrétního měření. Lze určit jen možné výsledky, jejich četnost a střední hodnotu.
 - Měření často zničí původní stav.
 - Časový vývoj popisuje Schrödingerova rovnice.
 - Částice stejného druhu jsou nerozlišitelné.

Kvantová mechanika dle Schrödingera

- Vlnová funkce $\psi = \psi(\vec{r}, t)$
- Schrödingerova rovnice

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi = \hat{H} \psi, \quad \hat{H} \psi = E \psi$$

$$\text{kde } \hat{H} = \hat{T} + \hat{V} = \frac{\hat{p}^2}{2m} + V(\hat{r})$$

- (Naivní) princip korespondence

$$p_i \rightarrow \hat{p}_i = -i\hbar \frac{\partial}{\partial x_i}, \quad x_i \rightarrow \hat{x}_i = x_i, \quad E \rightarrow i\hbar \frac{\partial}{\partial t}$$