

TFYS - 2

ZÁKLADY MODERNÍ FYZIKY

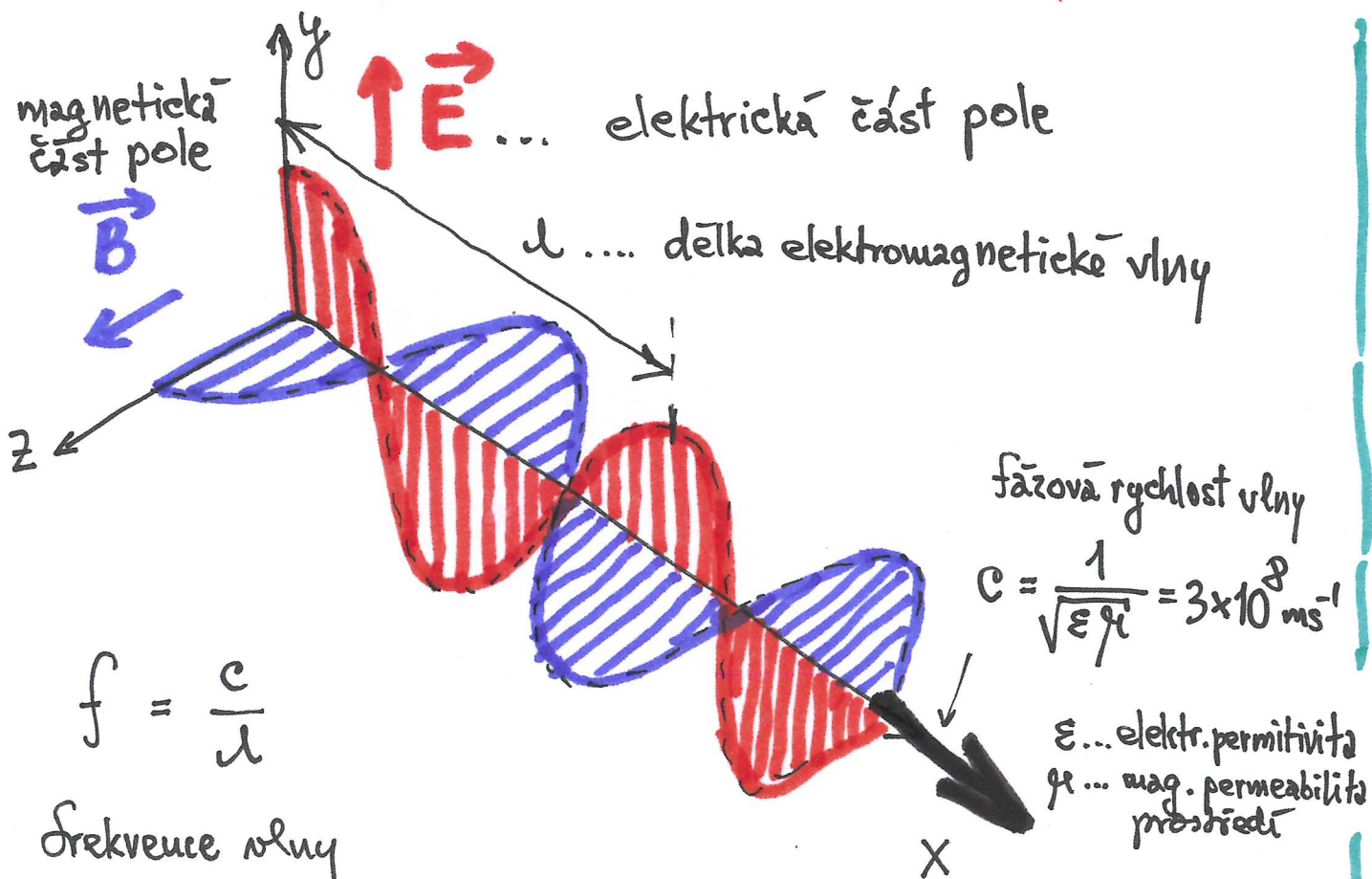
R. Kuchta - KFy

Proč je i pro strojního inženýra užitečné seznámit se s moderní fyzikou :

- Umožňuje to zapojení do finančně velmi lukrativních oborů, jako je vývoj a konstrukce supertvrdých lehkých materiálů, supravodičů, solárních zdrojů energie apod.
- Umožňuje to pronikat do tajů struktury hmoty, a tím pádem předvídat a cíleně modifikovat její vlastnosti.

ČÁSTICOVÉ VLASTNOSTI VLN

Ve druhé polovině 19. století byl objeven jeden z fundamentálních fyzikálních principů přírody –
existence elektromagnetického pole
a jeho šíření prostorem ve formě **harmonických vln**.



Prostřednictvím elektromagnetických vln **se přenáší energie elektromagnetického pole.**

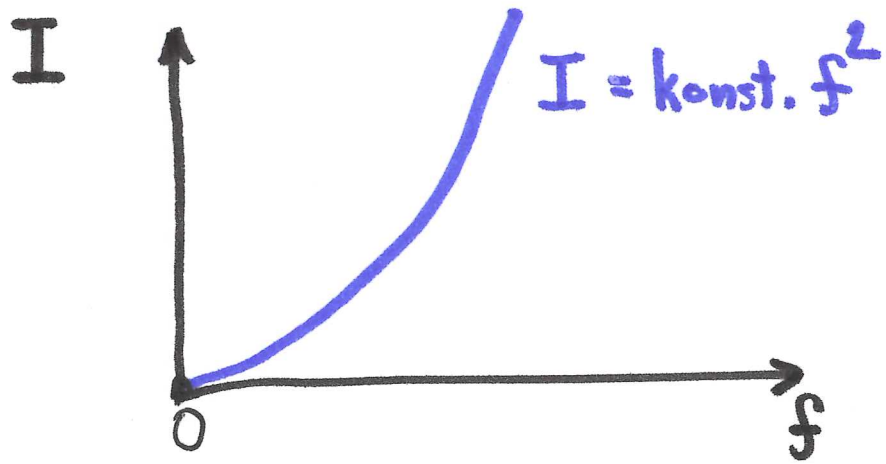
Tomuto přenosu energie se říká **elektromagnetické záření.**

Energie prošlá jednotkou plochy za jednotku času se nazývá **intenzita záření ... I**

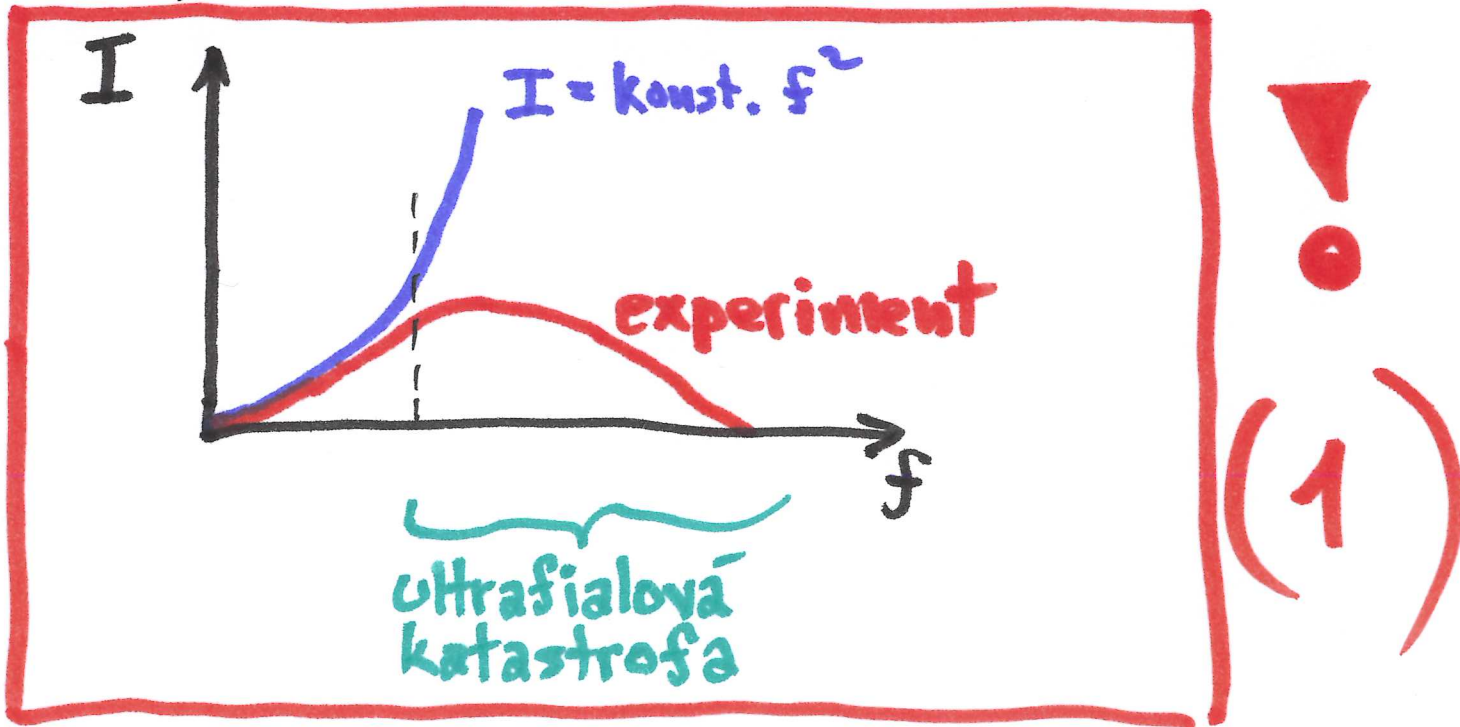
Elektromagnetické záření se nejlépe studuje na **černých tělesech**, tj. objektech, které totálně pohlcují veškeré záření dopadající zvenčí, takže vše, co z nich vychází, je jejich vlastní záření, produkované oscilacemi částic, z nichž se skládají.

Zásadní charakteristikou elektromagnetického záření je představa, že **energie záření může spojité nabývat všech hodnot mezi 0 a ∞ .**

Pro černá tělesa by na základě tohoto požadavku měla platit následující závislost intenzity záření I na jeho frekvenci f :



Srovnání s **experimentálně měřenými hodnotami**
však přineslo **VELKÉ PŘEKVAPENÍ**:



Tento zásadní rozpor mezi teorií a experimentem vyvolal značnou krizi ve fyzikální komunitě a po mnoha letech se hledalo východisko.

To našel Max Planck svou průkopnickou myšlenkou, že

elektromagnetické záření se prostorem šíří nikoli spojitě, ale ve formě proudů konečných energetických kvant (fotonů):

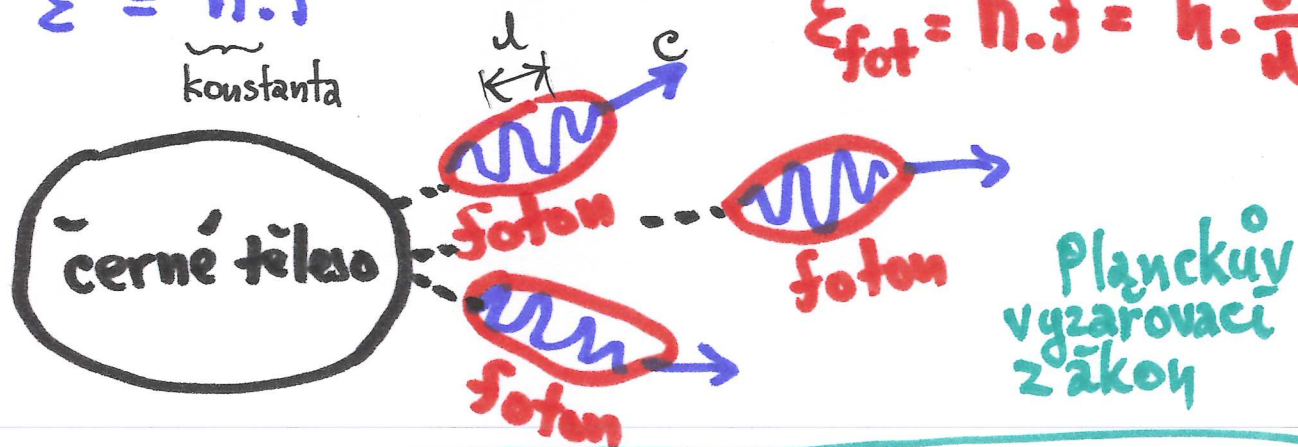
$$E_{\text{elmag}} = n \cdot \epsilon \quad n = 1, 2, 3, 4, \dots \quad (2)$$

$$\epsilon = h \cdot f$$

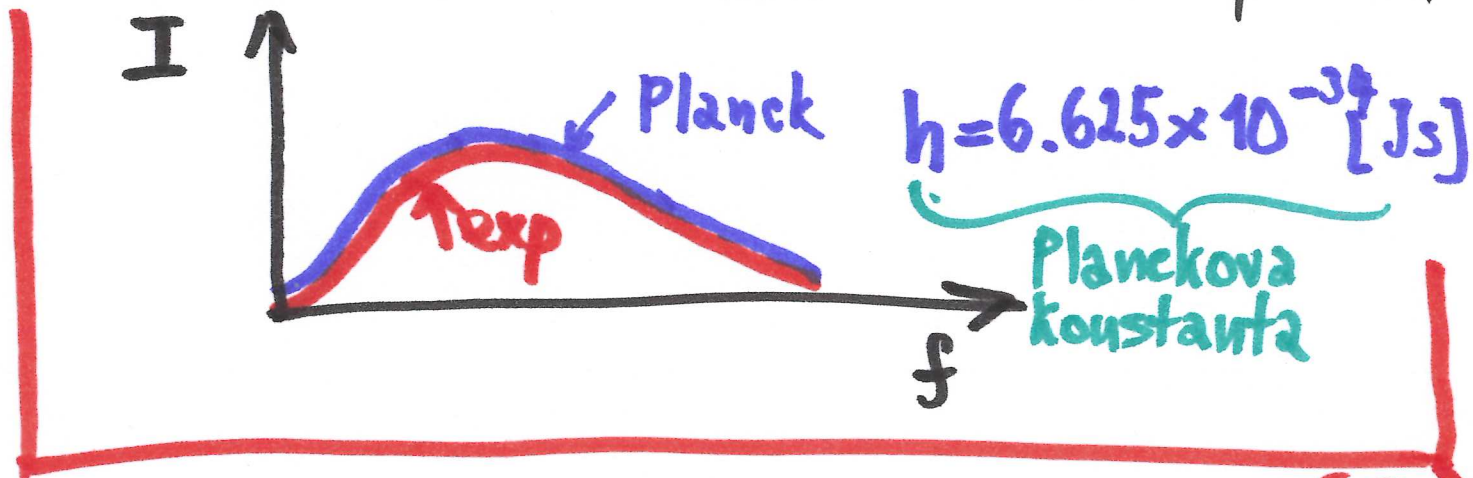
h konstanta

energetické kvantum (foton)

$$\epsilon_{\text{fot}} = h \cdot f = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$



Při vhodné volbě konstanty h Planck dokonce dostal křivku, která na 100% souhlasila s experimentem:



(3)

Z Planckovy myšlenky o fotonech plynou další pozoruhodné závěry:

① Foton má hmotnost:

$$\epsilon_{\text{fot}} = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

dle Plancka

$$\epsilon_{\text{fot}} = m_{\text{fot}} \cdot c^2$$

dle Einsteinova principu ekvivalence hmoty a energie

$$m_{\text{fot}} = \frac{h \cdot \frac{c}{\lambda}}{c^2} = \frac{h}{c \lambda} \quad (4)$$

② Foton má mechanickou hybnost:

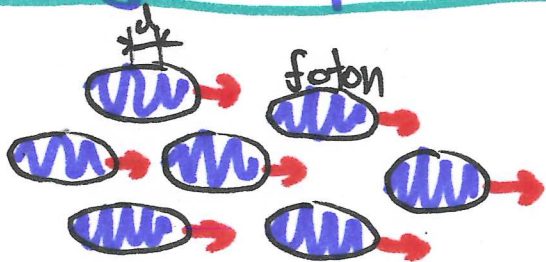
$$p_{\text{fot}} = m_{\text{fot}} \cdot c$$

↑
rychlost
pohybu fotonu

← definiční vztah
mechanické hybnosti

$$p_{\text{fot}} = \frac{h}{c\lambda} \cdot c = \frac{h}{\lambda} \quad (5)$$

Tím se dostáváme k **částicovému charakteru**
elektromagnetických vln:



$$E_{\text{fot}} = \frac{hc}{\lambda}$$
$$m_{\text{fot}} = \frac{h}{c\lambda}$$

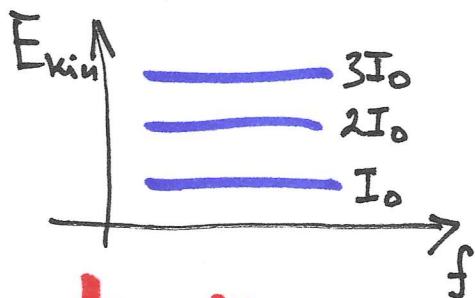
$$p_{\text{fot}} = \frac{h}{\lambda}$$

(6)

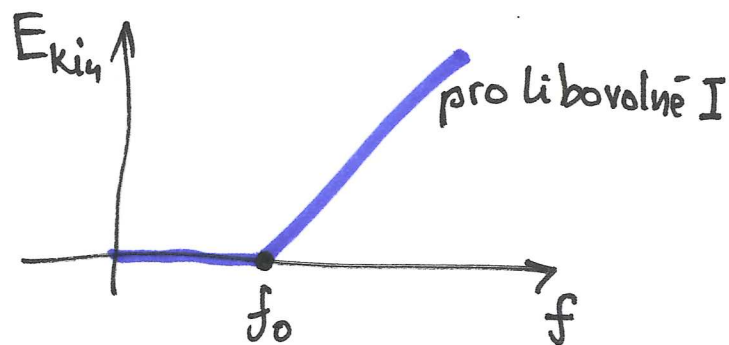
elmag. vlna = soubor fotonů
s částicovými vlastnostmi
(energie, hmotnost, hybnost)

Částicový charakter elektromagnetických vln
umí vysvětlit několik jevů, které jsou nerosozumitelné
pomocí standardního elektromagnetismu:

① Fotoelektrický jev

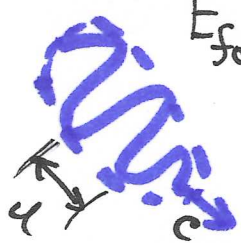


teorie
elektromagnetismu



experiment

Opět evidentní rozpor. Vlastnosti fotonů však
dokážou experimentální výsledek zcela objasnit:

$$E_{\text{fot}} = \frac{hc}{\lambda} = hf$$


kov } ϕ ... vazbová energie elektronu v kovu

Zákon zachování energie říká:

$$E_{\text{fot}} = \phi + E_{\text{kin}}$$

\downarrow

$$E_{\text{kin}} = hf - \phi$$

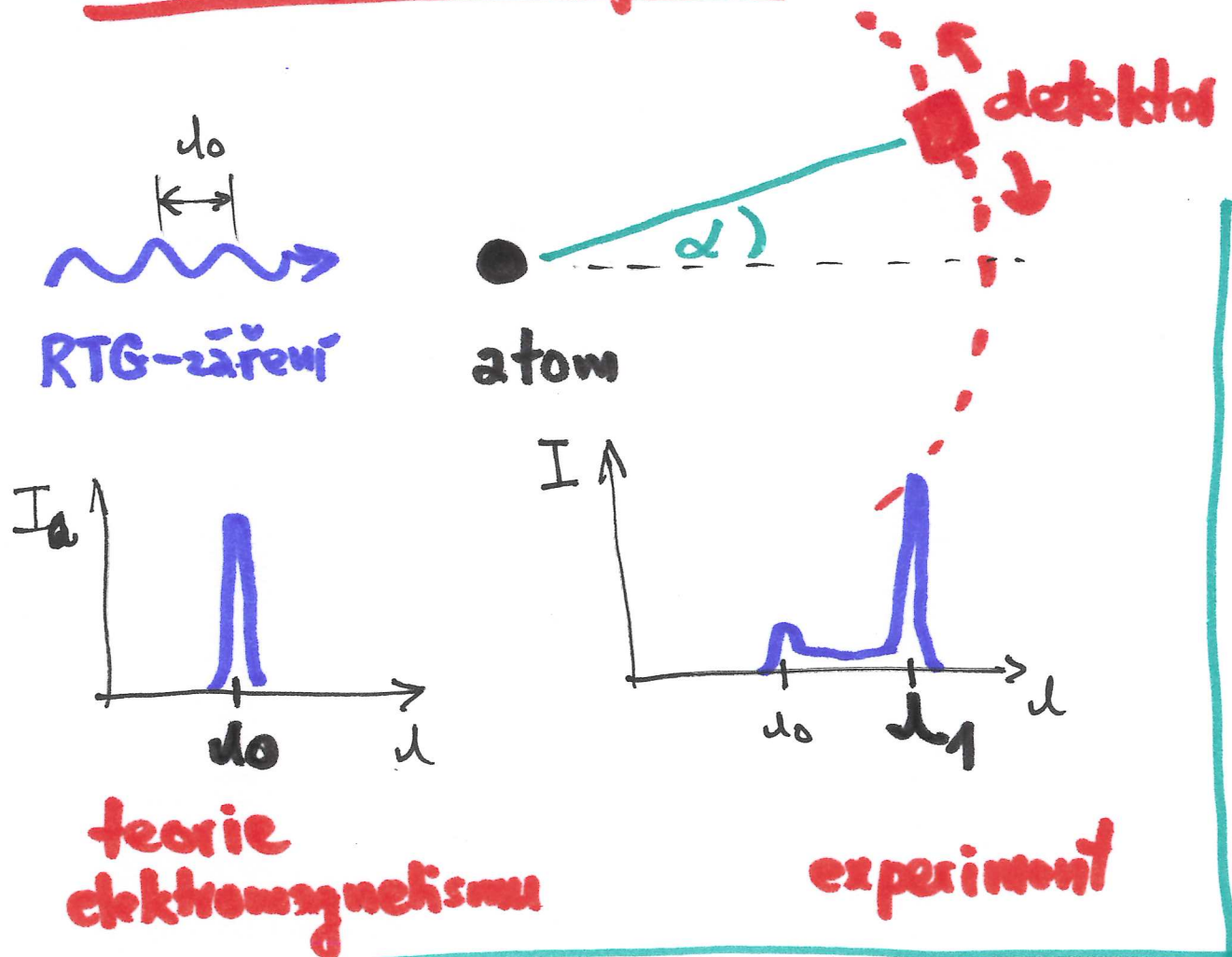


E_{kin} přitom neobsahuje žádnou závislost na I

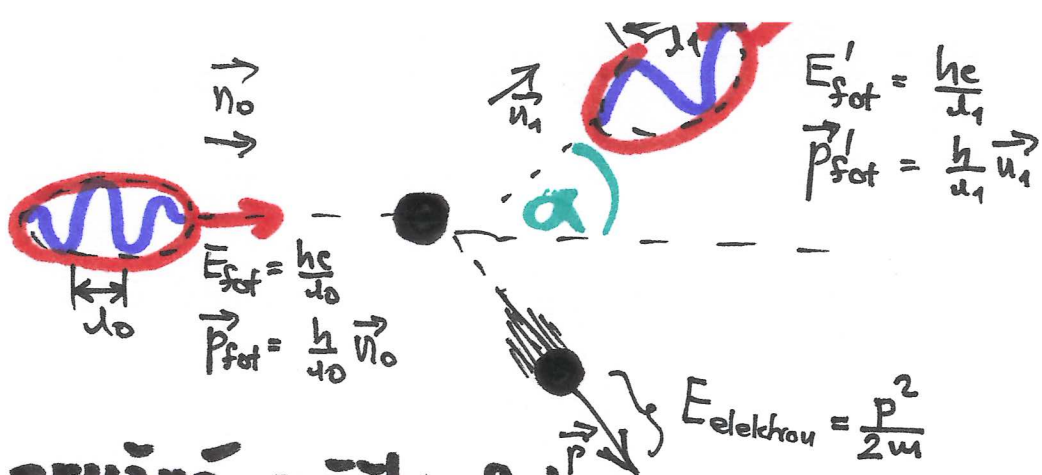
naprostý souhlas s experimentem

(4)

② Comptonův jev



Opět rozpor. Vlastnosti fotonů však zase zabodují
a poskytují přesně vysvětlení experimentu.
Stačí použít nejen energii, ale také i hybnost fotonu :



pružná svázka fotonu a elektronu :

$$E_{\text{fot}} = E'_{\text{fot}} + E_{\text{elektron}} \quad \dots \text{ zachování energie}$$

$$\vec{p}_{\text{fot}} = \vec{p}'_{\text{fot}} + \vec{p} \quad \dots \text{ zachování hybnosti}$$

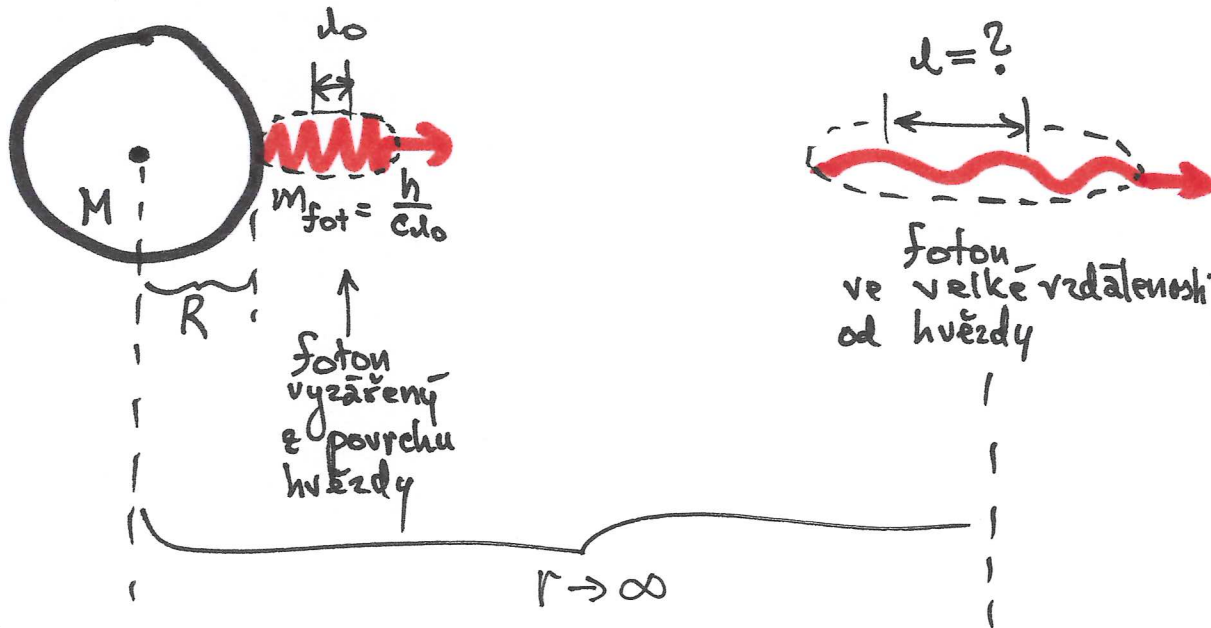
Řešením této soustavy rovnic dostaneme

$$\lambda_1 = \lambda_0 + 2.426 \times 10^{-12} \text{ [m]} (1 - \cos \alpha)$$

což je **v souladu s experimentem.**
 Objasnění Comptonova jevu je tedy důsledkem toho, že foton se chová jako částice s určitou energií a hybností.

③ Chování fotonu v gravitačním poli

hvězda o hmotnosti M
 a poloměru R



Gravitační pole působí na všechny hmotné objekty, tedy i na foton:

Na povrchu hvězdy:
$$E_{\text{fot}}^{\text{grav}}(R) = \underbrace{m_{\text{fot}}}_{\frac{h}{c\lambda_0}} \cdot \left(\frac{-\alpha M}{R} \right)$$

Ve velké vzdálenosti:
$$E_{\text{fot}}^{\text{grav}}(r \rightarrow \infty) = m_{\text{fot}} \cdot \underbrace{\lim_{r \rightarrow \infty} \left(\frac{-\alpha M}{r} \right)}_0 = 0$$

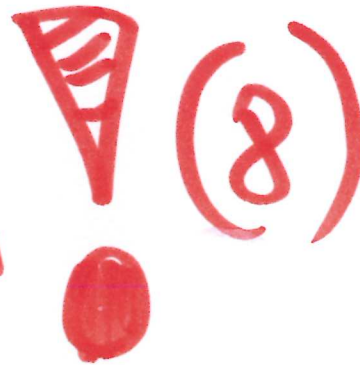
Zachování celkové energie fotonu na povrchu
a velké vzdálenosti pak říká :

$$\frac{hc}{\lambda_0} + E_{\text{fot}}^{\text{grav}}(R) = \frac{hc}{\lambda} + \underbrace{E_{\text{fot}}^{\text{grav}}(r \rightarrow \infty)}_0$$

$$\frac{hc}{\lambda_0} - \underbrace{\left(\frac{h}{c\lambda_0}\right)}_{m_{\text{fot}}} \cdot \frac{\alpha M}{R} = \frac{hc}{\lambda}$$

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{1 - \frac{\alpha M}{Rc^2}}$$

$$\lambda > \lambda_0$$



gravitační zvětšení ve nové délky fotonu.

Zajímavá situace nastane, když ve výrazu (8) bude platit

$$\frac{2M}{Rc^2} = 1$$

tj. $\frac{M}{R} = \frac{c^2}{2} \sim 10^{27} \dots$ cca 8 Slunci ro kouli 1km

Pak výraz (8) dává

$$\underline{\underline{d}} = \frac{d_0}{1-1} = \frac{d_0}{0} \rightarrow \underline{\underline{\infty}}$$

$$m_{\text{fot}} = \frac{h}{ca} \rightarrow 0$$

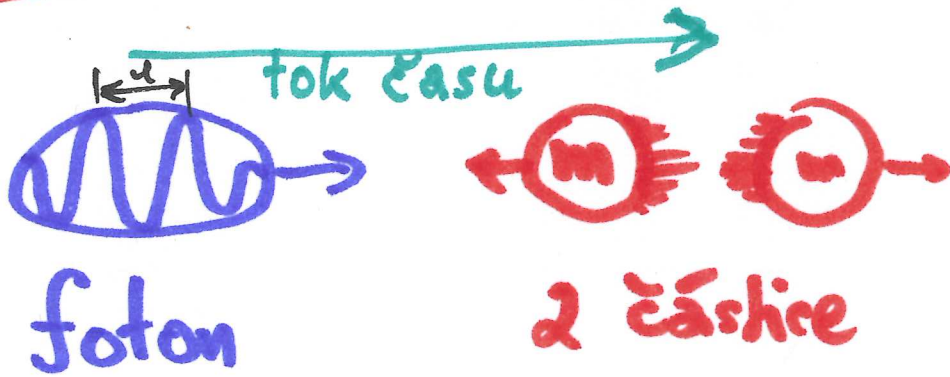
$$E_{\text{fot}} = \frac{hc}{\lambda} \rightarrow 0$$

tj. žádný reálný foton ve velké vzdálenosti od hvězdy nezaregistrujeme.

Hvězda se chová jako ČERNÁ DĚRA.

! (9)

④ Křeače 2 anihilace částicových párů



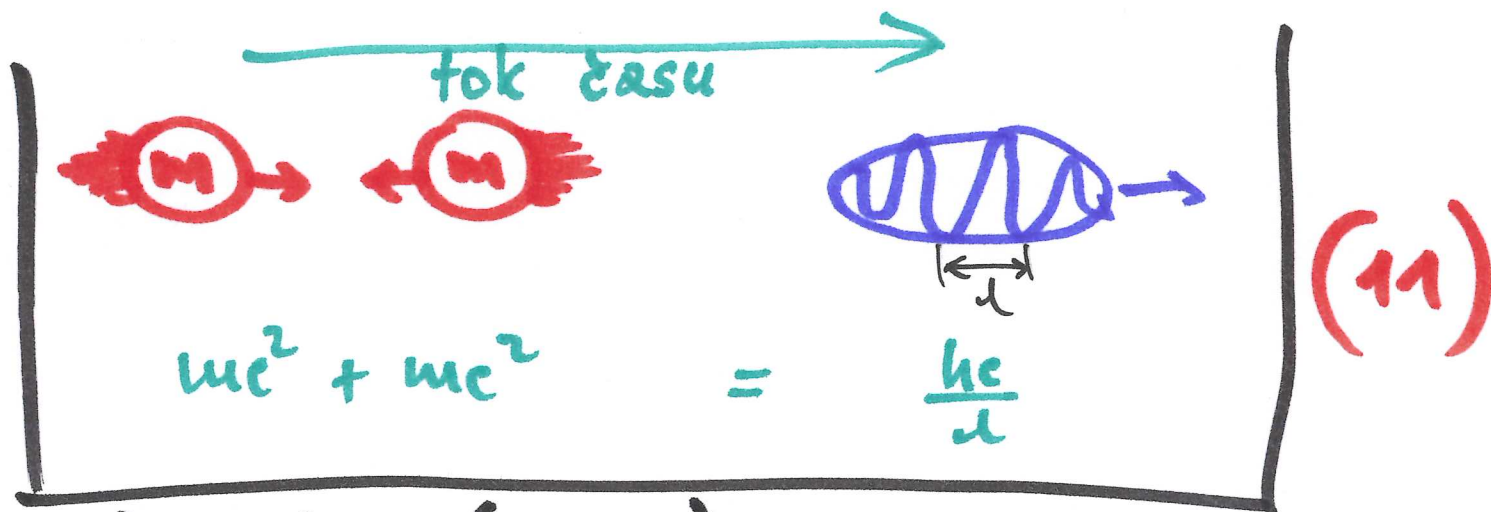
$$\frac{hc}{\lambda} = mc^2 + mc^2$$

energie fotonu

energie vzniklých částic

(10)

Křeače (tvorba) dvou částic
z jednoho fotonu



Anihilace (zánik) dvou částic
přeměnou na foton