

Jak můžeme „vidět“ částice?

- **Proč chceme částice „vidět“ tj. proč je chceme detekovat?**
- **Princip detekce částic, elektronů, těžkých nabitých částic, neutrálních částic**
- **Některé detektory částic: kalorimetry, proporcionální komory (čerenkovské počítače, polovodičové detektory..)**

Proč chceme částice detekovat?

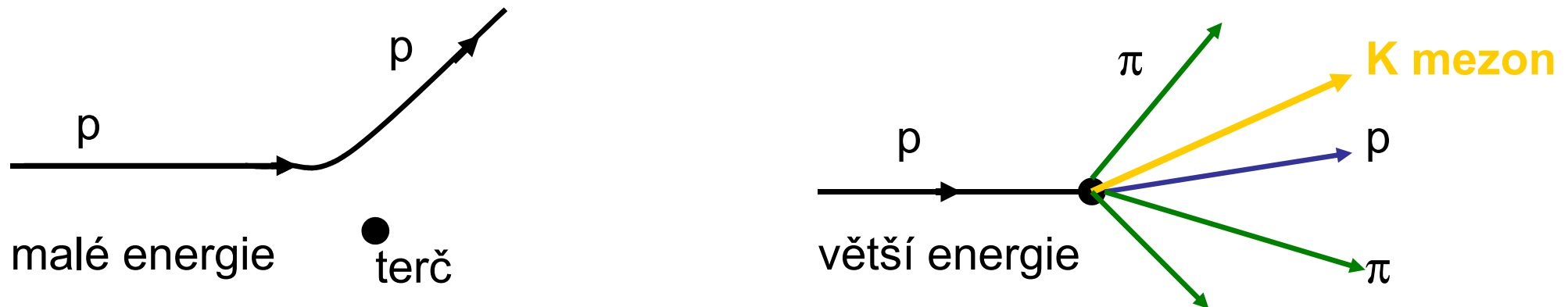
Kromě všeobecně známých částic (elektron, proton, neutron, foton) bylo objeveno mnoho dalších částic (např. piony, mezony K, miony, hyperony atd.), které mají různé hmotnosti, jsou nestabilní, mají různé další vlastnosti.

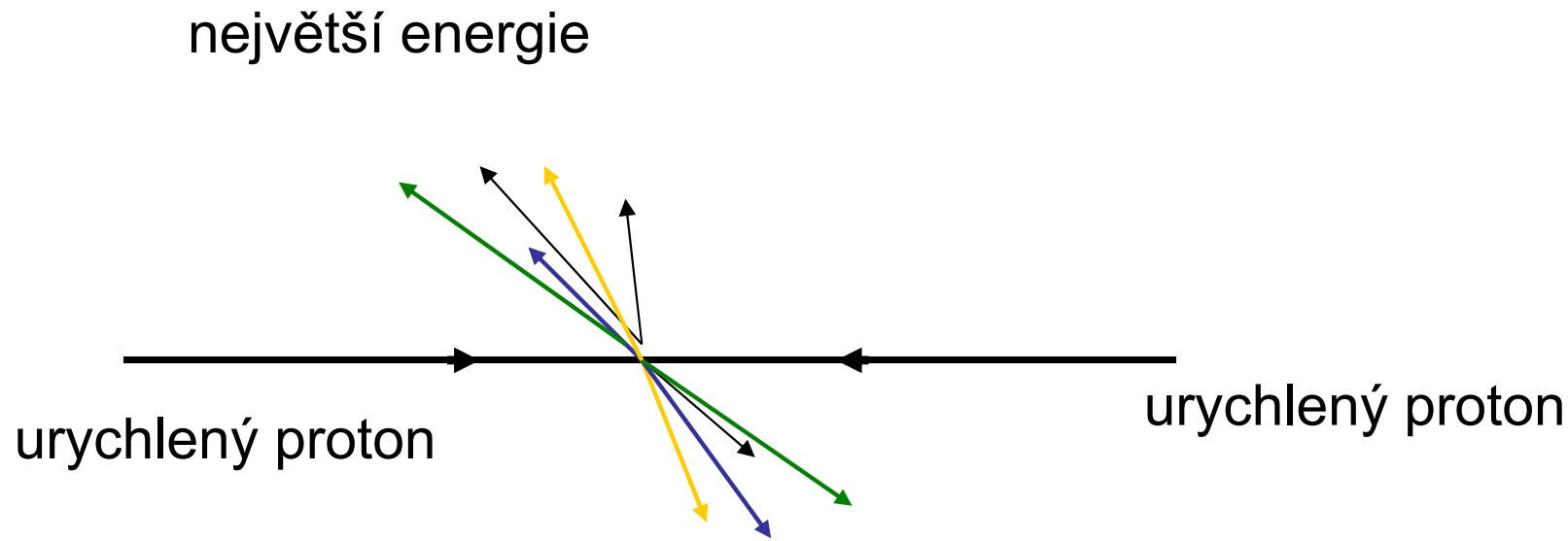
Zajímá nás proč vznikají, jak interagují, proč mají různé vlastnosti....

Interakce: elektromagnetické, silné a slabé

Částice vznikají v interakcích, při nichž je k dispozici dostatečné množství energie

např. urychlený proton + terč \longrightarrow protony+piony+.....





Jaké energie používáme? V současné době umíme částice urychlit na energii ~ 100 x miliard elektronvoltů

(1 eV = 1.6×10^{-19} J, střední kinetická energie molekul plynů při normálních podmínkách je 0.040 eV, střední kinetická energie neutronů vznikajících při štěpení jader U^{235} v reaktorech je 5 milionů eV)

Proč chceme částice detekovat?

Chceme vědět, co se děje v místě srážky, tj. během interakce primárních částic, což ale nemůžeme „vidět“. Proto se dovíme o procesu interakce nepřímo a to tak, že detekujeme vzniklé částice.

Co můžeme zjistit při detekci částic: **energie, hybnosti a směr pohybu částic, případně typ částic**

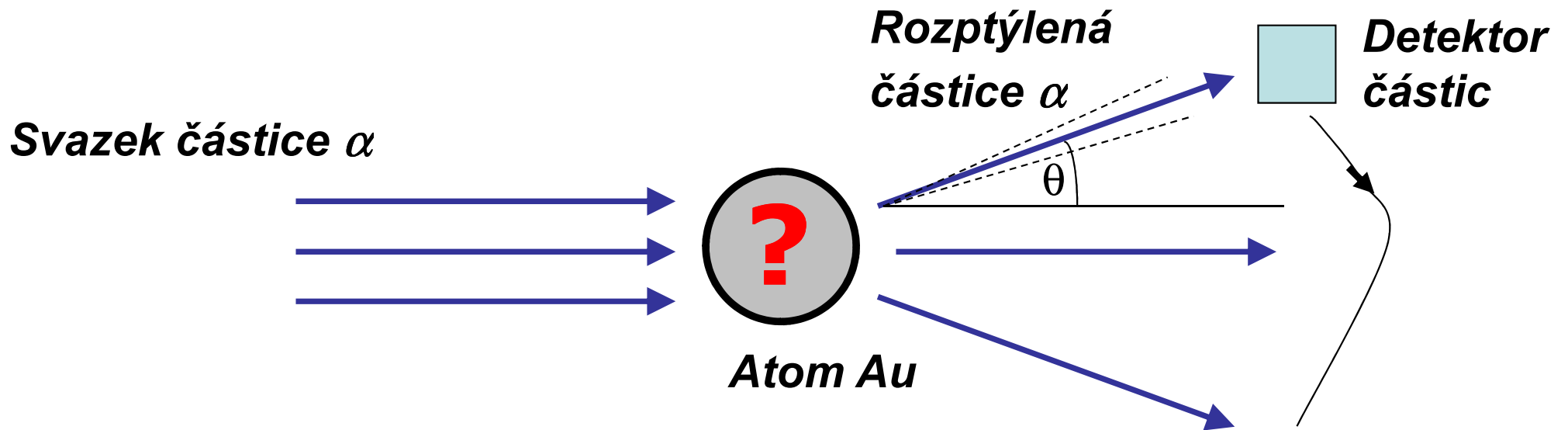
Z těchto informací se snažíme dedukovat, jakým způsobem interakce proběhla. Změřené veličiny srovnáme s výpočty, které zahrnují hypotézy, jak probíhají interakce

Pro detekci částic se zhotovují detektory, které se umísťují do aparatur jejichž složitost obvykle roste s růstem energií částic

Př. Ruthefordův experiment, který zjistil, že atomy mají jádro (v r. 1912)

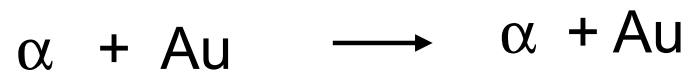
experiment H1 na zkoumání struktury protonu (1990-2007)

Rutherfordův experiment



Z informací detektoru zjistíme, kolik částic rozptýlených do úhlu θ dopadlo do detektoru. Měníme-li polohu detektoru dostaneme závislost počtu detekovaných částic N na úhlu θ . **Tato závislost se liší, pokud je atom homogenní objekt, nebo má strukturu, tj. jádro.**

Rutherfordův experiment

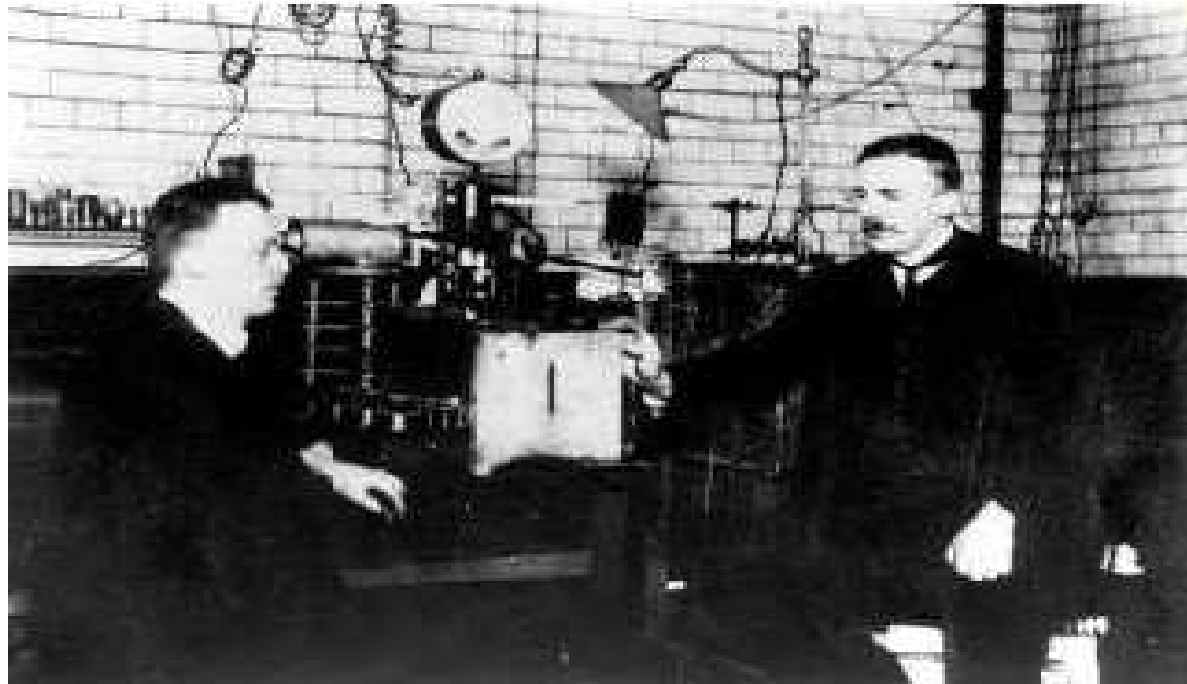
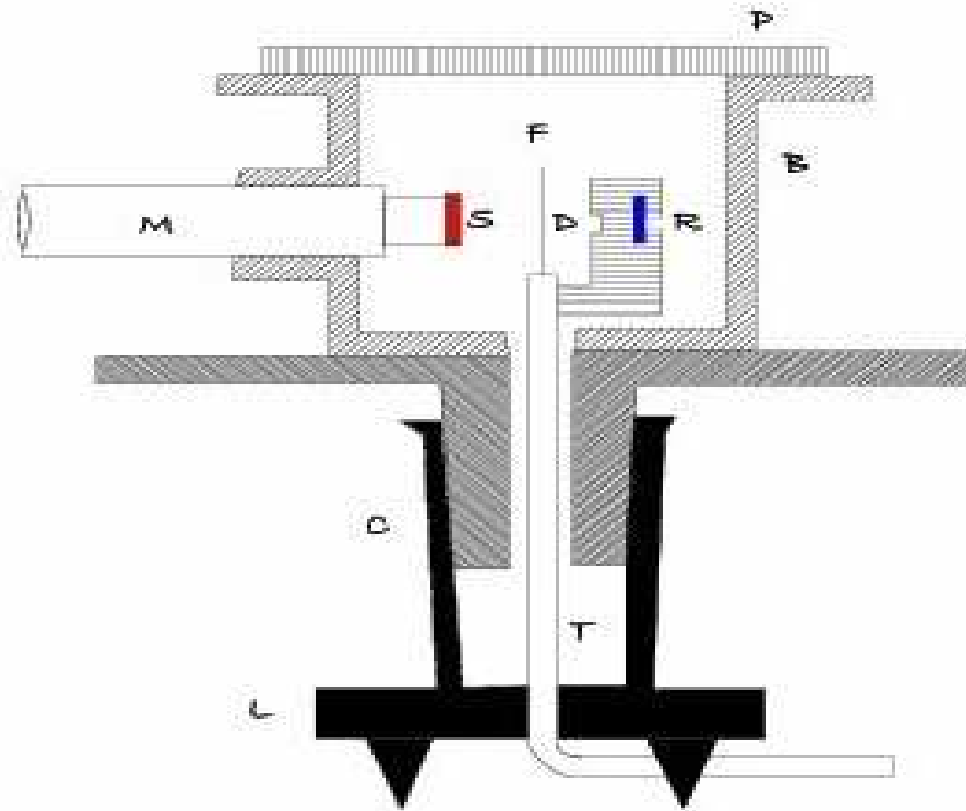


R zdroj α částic Po^{214}

F zlatá fólie

S scintilační stínitko

M mikroskop



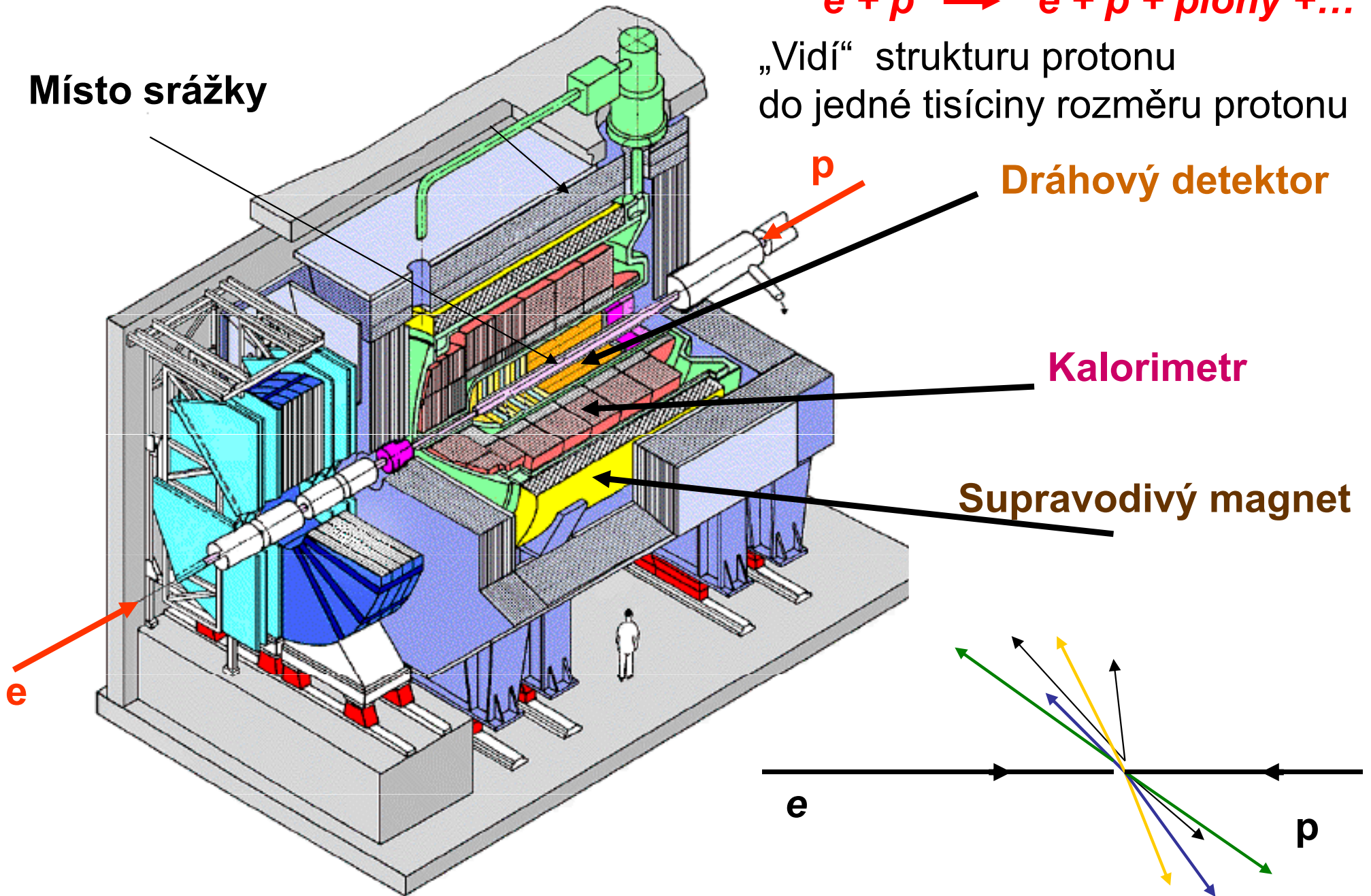
H1 experiment

(Deutsches Elektronen Synchrotron, Hamburk)



„Vidí“ strukturu protonu
do jedné tisíciny rozměru protonu

Místo srážky



Dráhový detektor

Kalorimetr

Supravodivý magnet

e

p

Princip detekce částic

Vždy přes interakce nabitých částic s atomy či jádry materiálu, který jim dáme do cesty. Tyto interakce jsou v detektorech převedeny na pozorovatelný signál.

Nabité částice

Neutrální částice

těžké částice
(protony , piony...)

neutrony

elektrony
pozitrony

záření γ , tj. fotony s velkou energií

miony (mezony μ)

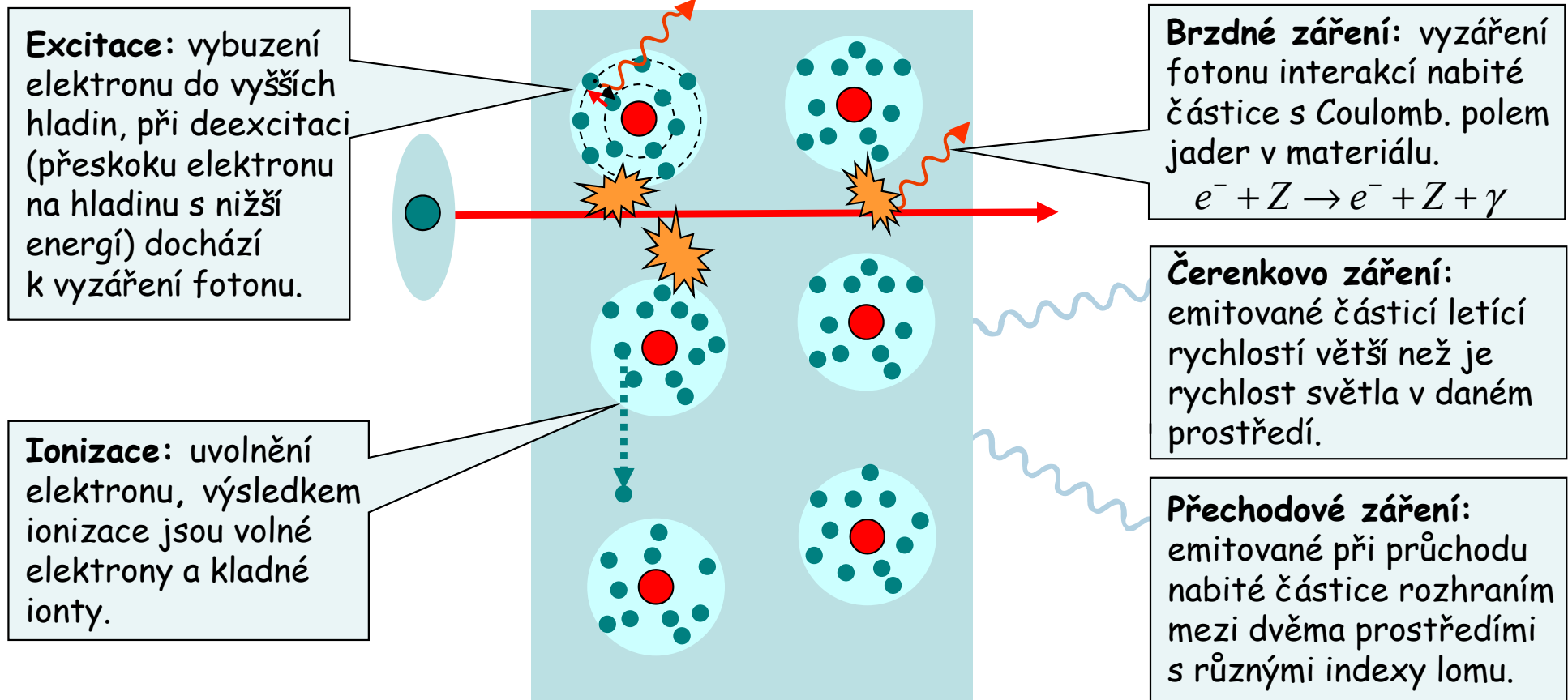
neutrino

Mononásobné coulombovské interakce s prostředím

Hlavně „jedno“-interakce s přenosem energie k nabitým částicím

Interakce nabité částice

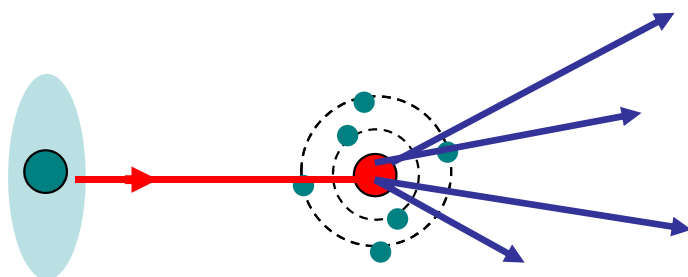
Elektrické pole letící nabité částice je schopno vybudit (**excitovat**) elektrony v atomech a molekulách nějaké látky nebo je dokonce z atomů vytrhnout - **ionizovat**. Letící nabitá částice ionizací látky ztrácí energii, brzdí se. Svou energii ztrácí také zářením. Všechny tyto procesy znamenají, že částice „zanechává stopy“, které lze při její detekci využít.



Interakce nabité částice

Energetické ztráty nabitých částic závisí na jejich rychlosti a na typu částic. Při stejné rychlosti mají **nejmenší ztráty miony, pak těžké nabité částice a největší ztráty mají elektrony a pozitrony.**

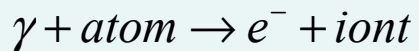
Těžké částice kromě elektromagnetických interakcí s atomy mohou při dostatečně vysokých energiích interagovat silně s jádrem atomů, přičemž může vzniknout mnoho sekundárních částic různého druhu.



Interakce fotonů

Interakce fotonů je zcela odlišná od interakce nabitých částic. Svazek fotonů se při průchodu materiálem zeslabuje, fotony jsou v atomech absorbovány. To je způsobena třemi ději ...

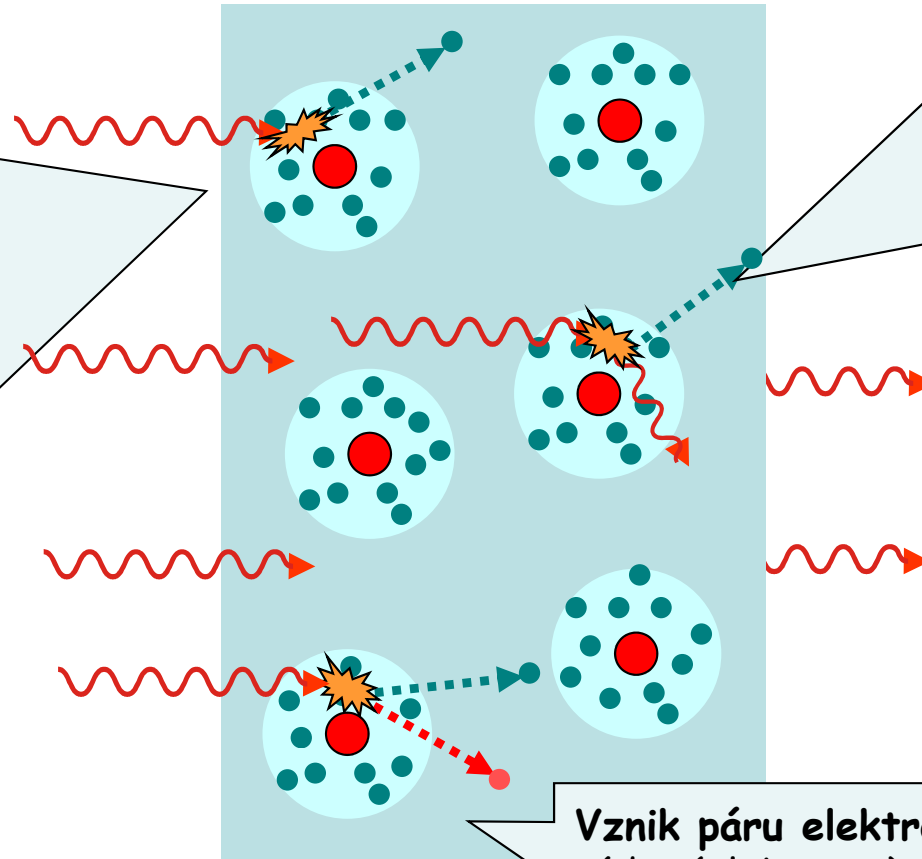
Při **fotoefektu** se absorbuje foton, který uvolní elektron z atomu (k absorpci dochází hlavně v K slupkách). Zachování energie znamená, že vylétávající e^- má kinetickou energii $E_{k,e^-} = E_\gamma - E_{vazba}$ (rozdíl energii dopadajícího fotonu a energie potřebné na uvolnění elektronu). Výsledkem fotoefektu je tedy absorpce fotonu, vznik volného elektronu a ionizovaného atomu.



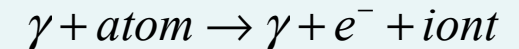
J. Dolejší, Učebnice

částicové fyziky

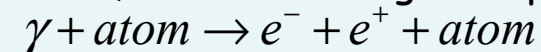
J. Dolejší, Učebnice částicové fyziky



Comptonův rozptyl je rozptyl fotonu na „volném“ elektronu v atomu. Směr letu dopadajícího fotonu se změní a zasažený elektron je nakopnut - získá kinetickou energii. Tuto energii foton ztratil a tak odlétá s menší energií, tj. s větší vlnovou délkou.



Vznik páru elektron-pozitron z fotonu v poli jádra (elektronu). Aby nalétávající foton mohl e^+e^- produkovat, musí mít energii alespoň $2m_e c^2$.



Odkaz: kapitola o urychlovačích

Interakce nabité částice

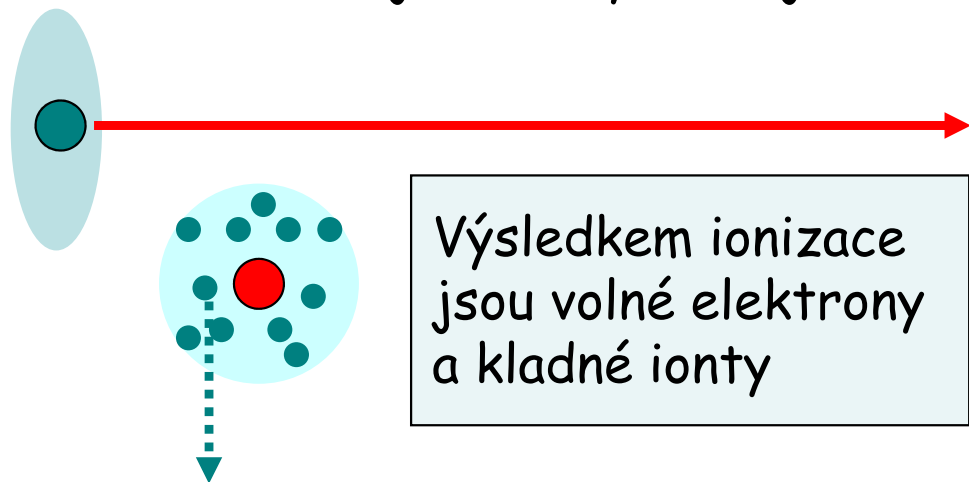
Jak můžeme efekty vznikající při energetických ztrátách detekovat?

- **Ionizační elektrony.** Umístěním materiálu do elektrického pole odvedeme ionizační elektrony či kladné ionty ke kladnému nebo zápornému pólu, čímž vznikne elektrický proud, který můžeme změřit.
- **Záření z excitací atomů, čerenkovské záření.** Např. pomocí fotonásobičů, v nichž se světlo konvertuje na elektrický proud
→ *Vzniká zejména v scintilačních materiálech (scintilátorech)*

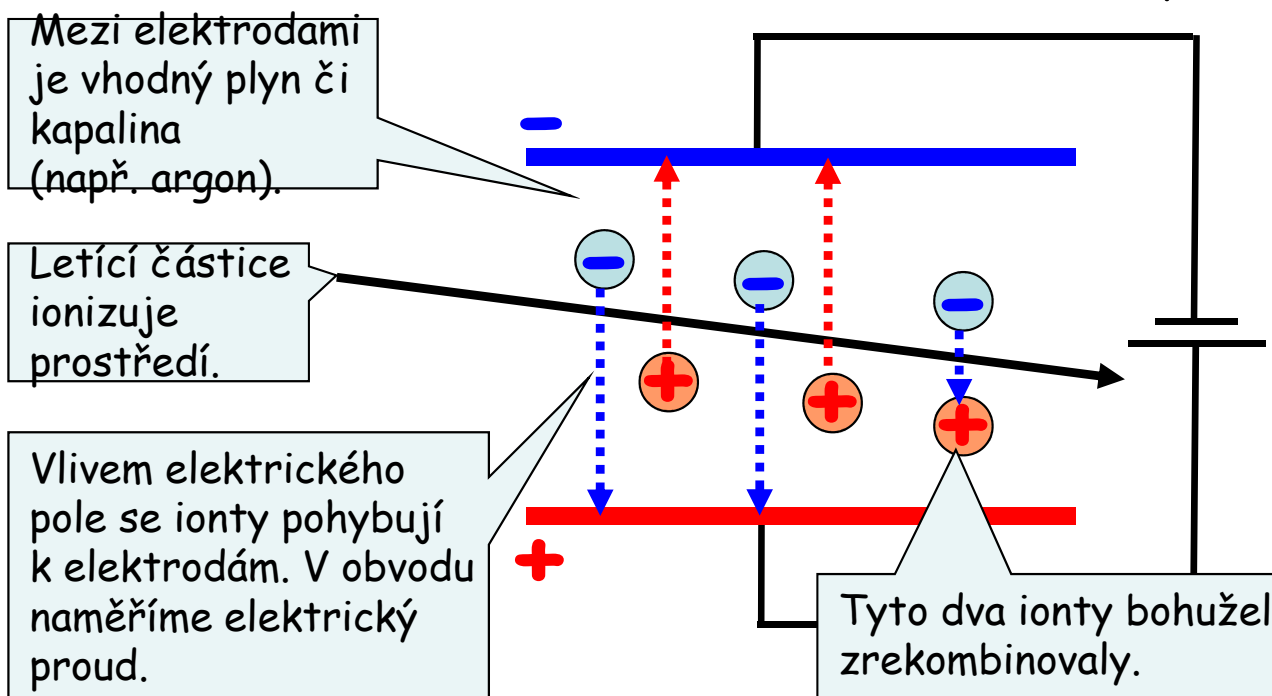
Velikost elektrického proudu je úměrná množství energetických ztrát a ty jsou zase úměrné energii částice, procházející materiálem. Proto ze změřeného proudu můžeme určit energii částice.

Ionizační detektory

Elektrické pole letící nabité částice je schopno vybudit elektrony v atomech a molekulách nějaké látky nebo je dokonce z atomů vytrhnout - ionizovat je.

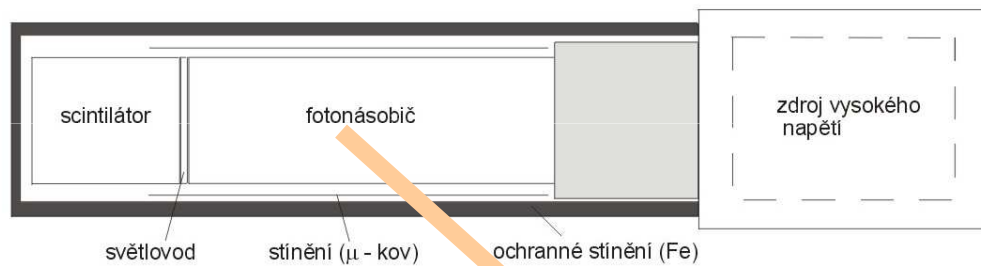


Letící nabitá částice ionizací ztrácí energii, brzdí se. Vytvořené ionty lze využít k detekci - stačí přidat elektrody a přiložit na ně vhodné napětí. Výsledkem detekce je elektrický signál, se kterým lze dále pracovat!



Přesná funkce detektoru závisí na hodnotě přiloženého napětí - podle toho rozlišujeme ionizační komoru, proporcionální komoru a Geiger-Müllerův počítač.

Scintilační detektory



Současná podoba
scintilačního detektoru

Důležitou částí scintilačního detektoru je **fotonásobič** (Curran, Baker 1944), který přeměňuje velmi slabý světelný záblesk ze scintilátoru na měřitelný elektrický signál. Skládá se z fotokatody vyrobené z fotocitlivého materiálu, vstupní elektronové optiky, systému dynod a anody, ze které je odbírán signál.



Dynody

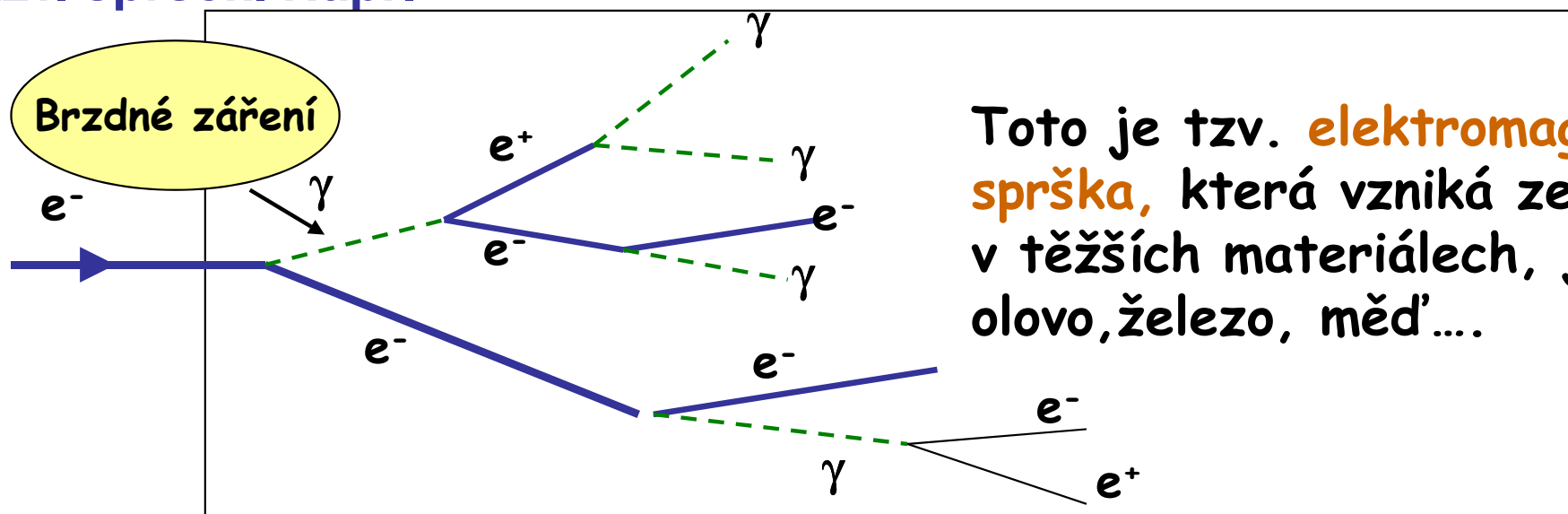


Měření energie částic

Abychom změřili energii částice, musíme ji plně absorbovat v nějakém materiálu. Částice předá celou svou energii na efekty, které můžeme měřit. Při vysokých energiích urazí částice relativně velkou vzdálenost v materiálu. Detektory na měření energií takovýchto částic se nazývají **kalorimetry**.

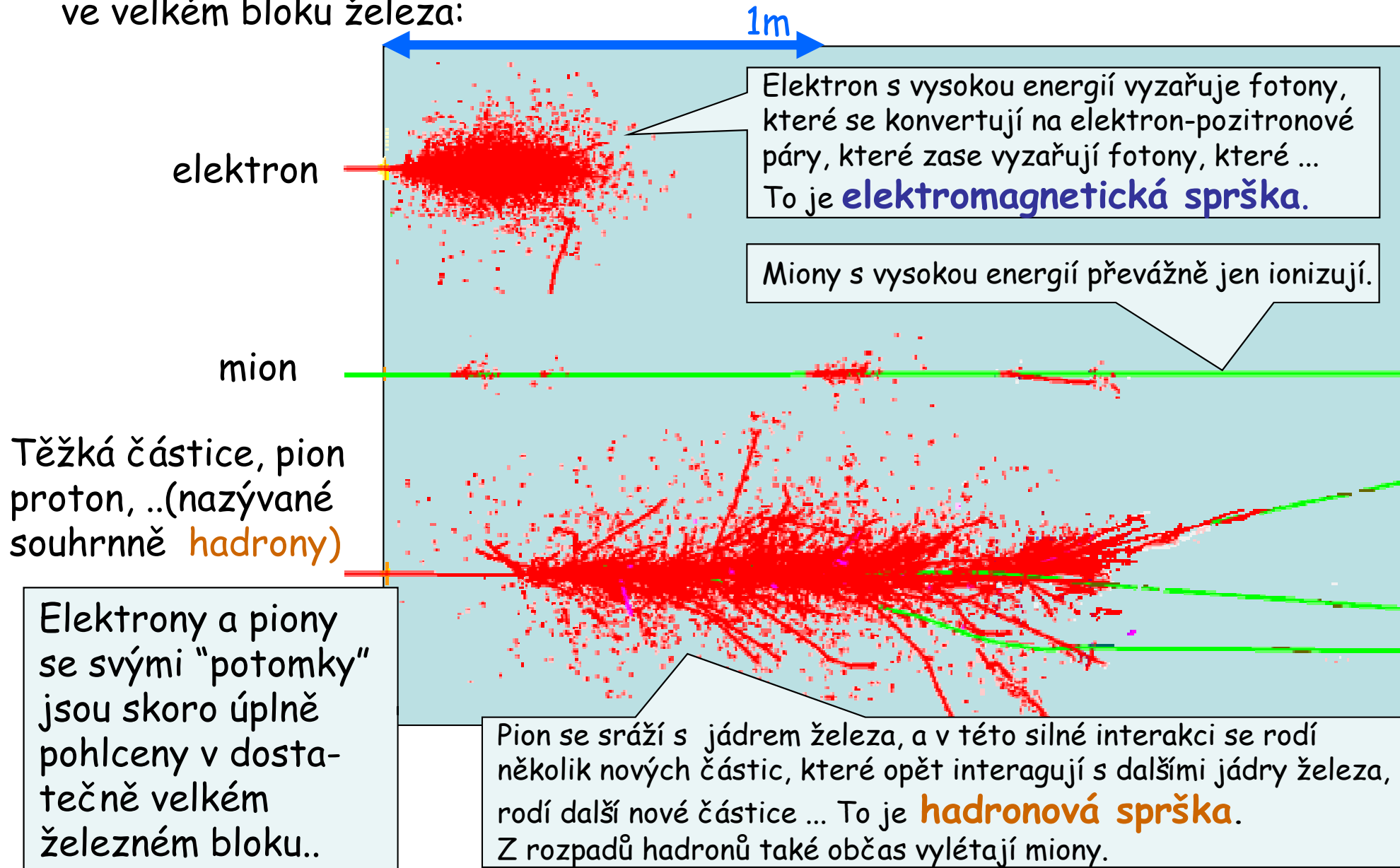
(Tento název je trochu matoucí, neboť v kalorimetrech neměříme teplo. Částice s energií 1 miliarda eV (1 GeV) zvětší teplotu 1 l vody, která má teplotu 20° C, o $3.8 \cdot 10^{-14}$ K, což je neměřitelné!)

Při průchodu energetických částic materiálem dochází k vytváření tzv. spršek. Např.



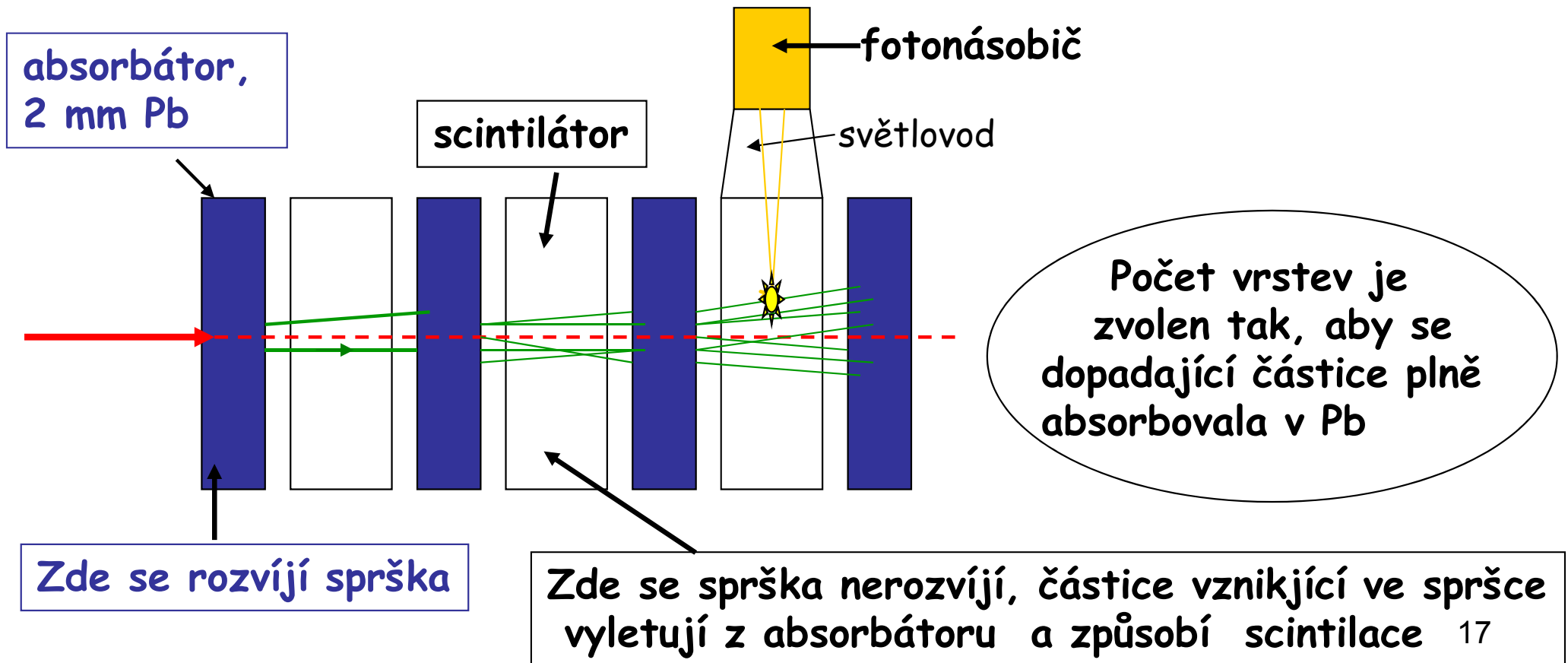
Kalorimetry

Podívejme se na interakci různých částic se stejnou energií (zde 300 GeV) ve velkém bloku železa:

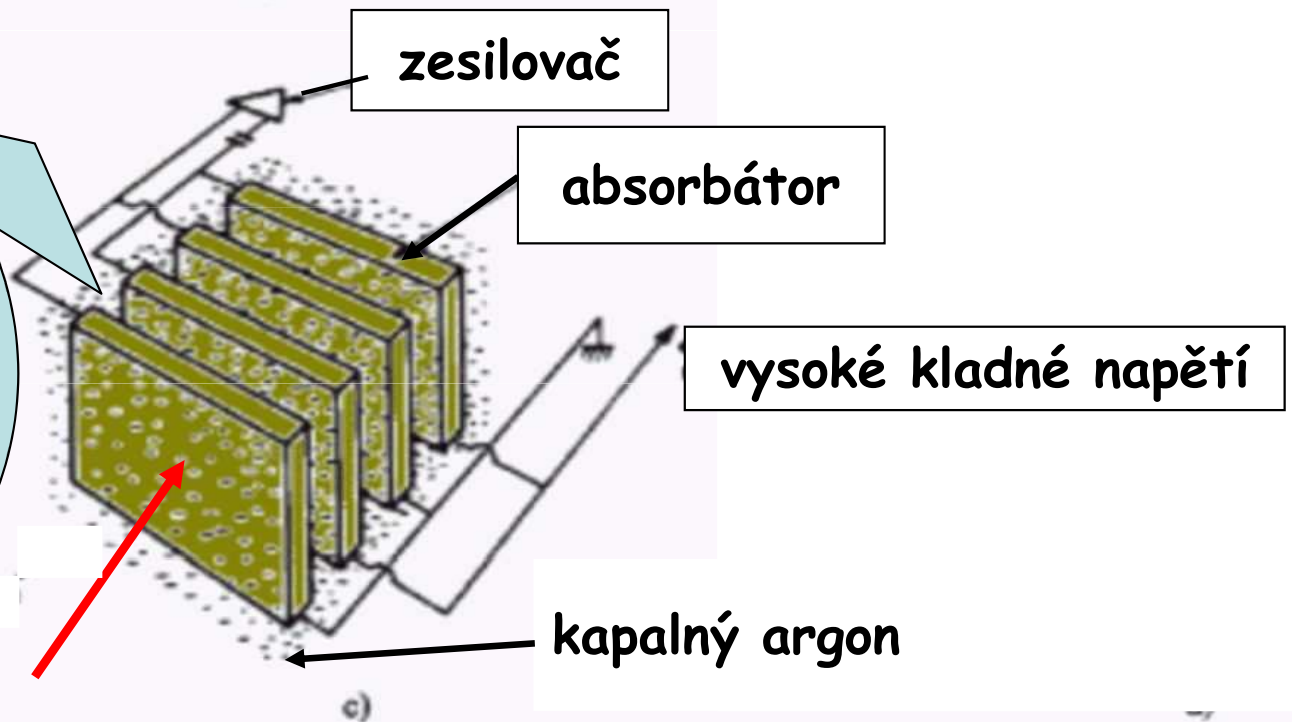
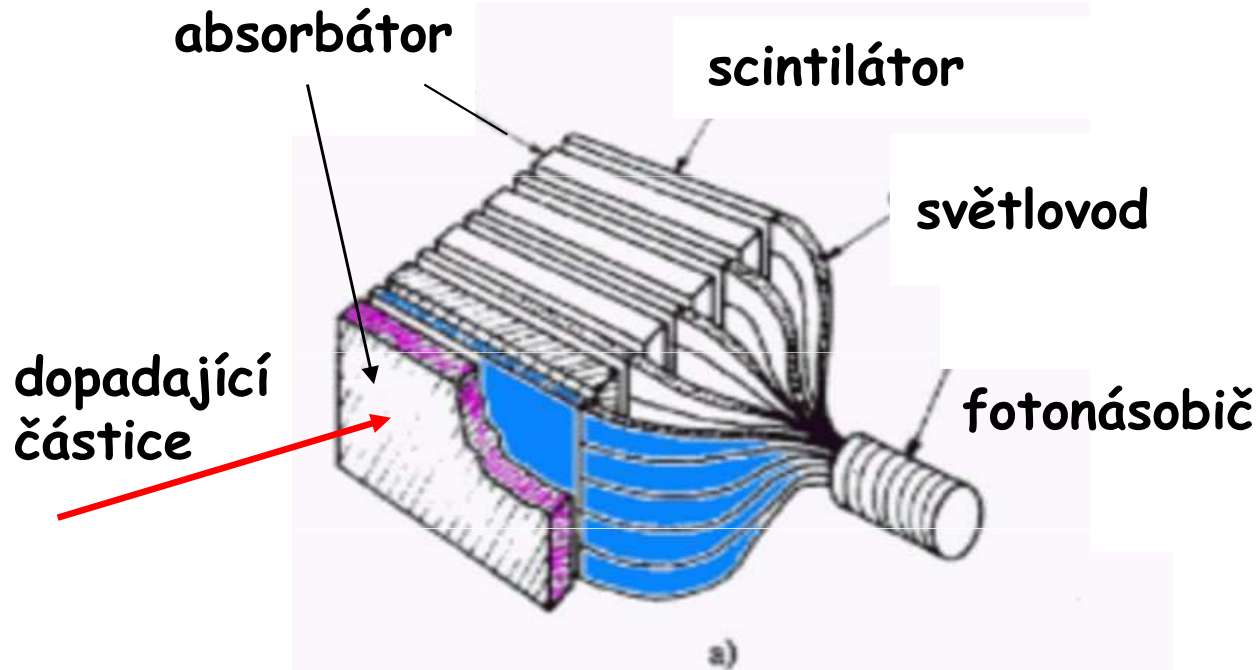


Kalorimetry

- **Homogenní** : *Absorbátor funguje současně jako detektor*, tj vydává scintilační světlo, nebo čerenkovské záření, např. olovnaté sklo. Absorbátor musí být úplně transparentní a dostatečně dlouhý – náročné na realizaci.
- **Vzorkovací (sampling)**: Mají dvě části : *absorbátor* (Fe, Pb, Cu..,) a *detekční médium* (ionizační komora s kapalným Ar nebo scintilátor). Jsou častěji používané.



Kalorimetry



2 sousedící desky absorbátoru tvoří ionizační komoru. Částice ze spršky ionizují Ar v mezeře. Ionizační elektrony jsou odvedny na desku s kladným napětím. Vzniklý elektrický signál se odvede na zesilovač

Kalorimetry

Jak můžeme určit energii částic ze signálů kalorimetrů?
Signál je úměrný energii částic E , tj. např. proud I

$$I = K * E$$

Jak určíme konstantu K ?

Kalorimetr se ozařuje svazky částic, jejichž energie E_0 je přesně známá.
Protože I změříme, spočteme konstantu podle $K=I/E_0$.

Energie částice, které se produkují v interakci, pak určíme jako $E=I/K$.

Jestliže se produkuje více částic a chceme určit energii každé částice, je třeba kalorimetry segmentovat tak, abychom dostali nezávislý signál od každé částice.

Kalorimetry

Vodivá deska, např. Cu, kladné napětí

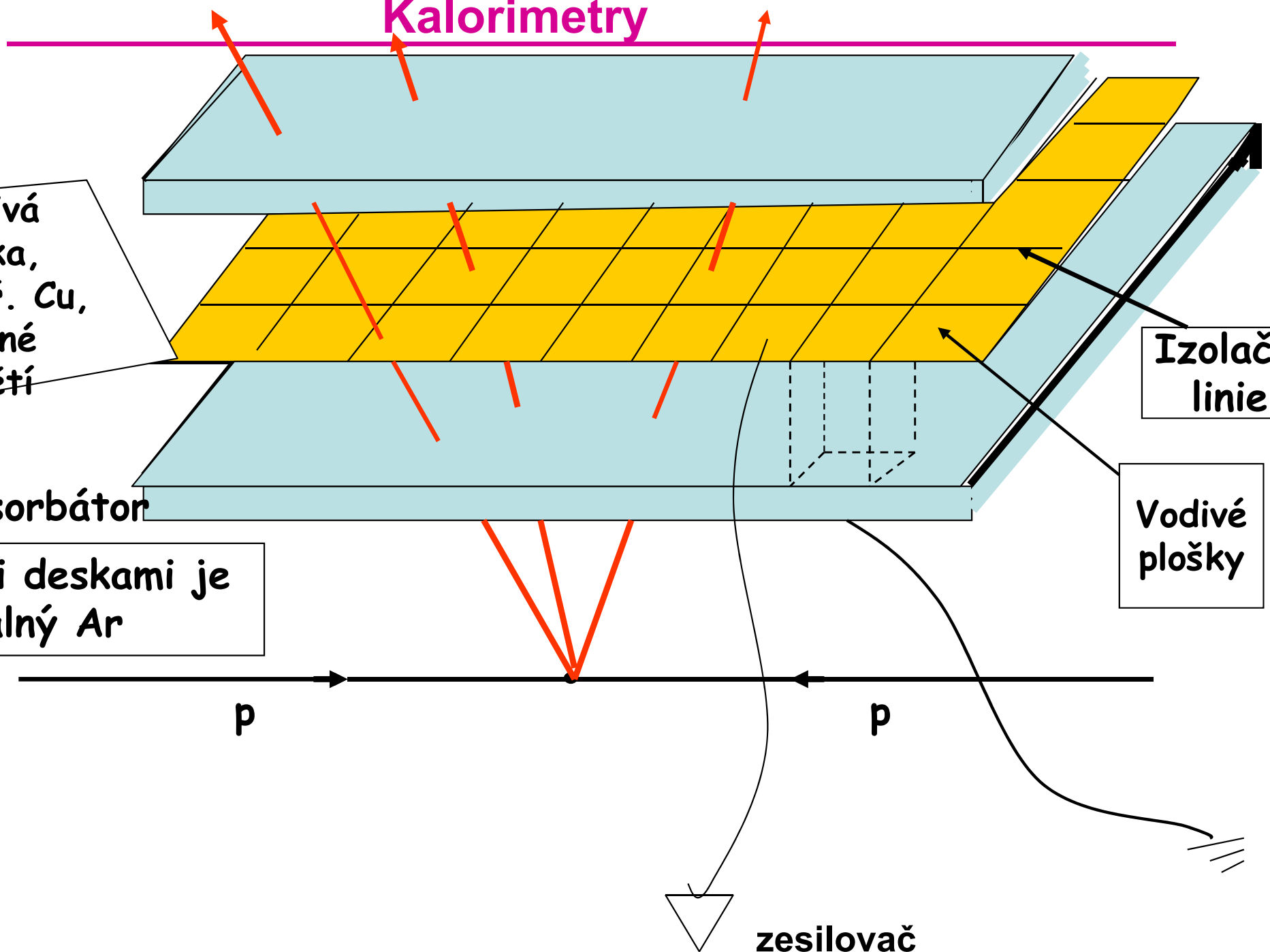
absorbátor

Mezi deskami je kapalný Ar

Izolační linie

Vodivé plošky

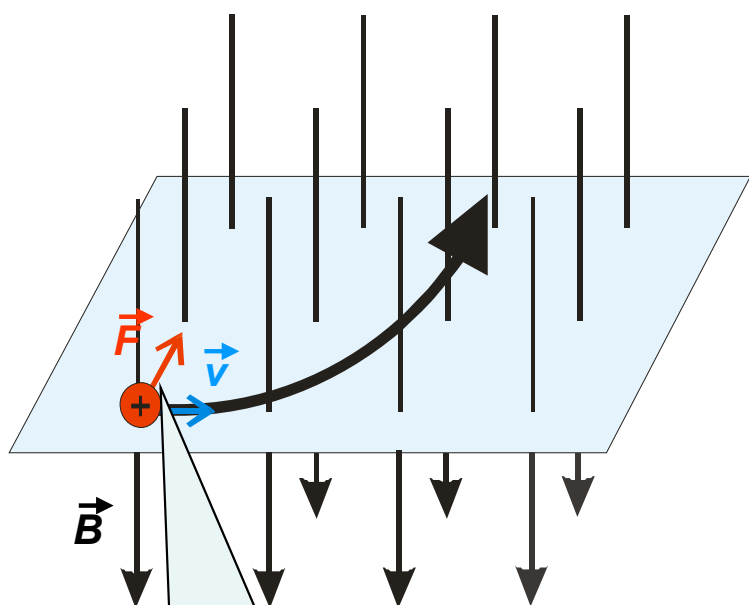
zesilovač



Měření hybností a směru letu nabitých částic

Princip: pohyb nabitých částic v magnetickém poli

Nejjednodušší pohyb: částice letí kolmo na magnetické pole B a pohybuje se podél kružnice



Lorentzova síla $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$ zakřivuje dráhu částice.

Na nabitou částici působí Lorentzova síla, která je silou dostředivou

q je náboj částice

$$qvB = \frac{mv^2}{R}$$

Pro poloměr tedy platí:

$$R = \frac{mv}{qB} = \frac{p}{qB}$$

Hybnost $p = RqB$

Jak zjistíme poloměr R ? Musíme znát souřadnice míst, kudy částice prošla.

Jak tyto souřadnice určíme? Vložíme do směru pohybu částice detektory.

Měření hybností a směru letu nabitých částic

Základními detektory jsou **mnohohrátové proporcionální komory**. Jejich principem jsou plynové ionizační detektory.

Problém:

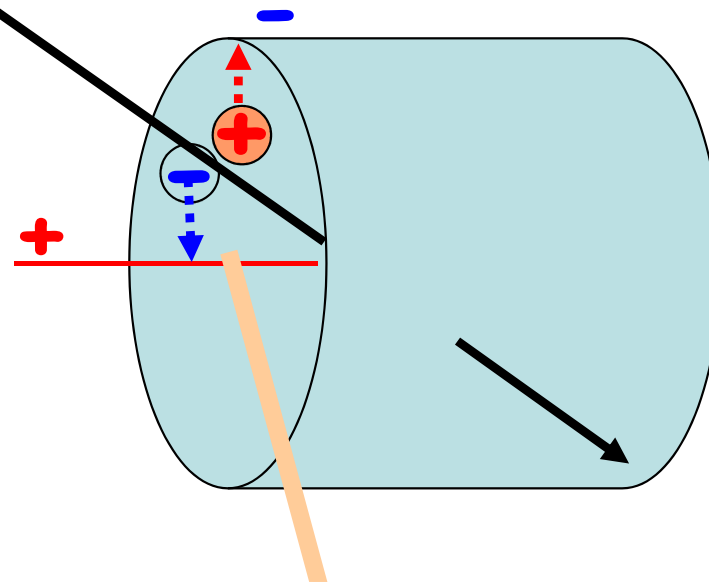
Energie potřebná na vznik iontů je v plynu 20-40 eV. **Např. v argonu** je tato energie 26 eV, minimální ionizační ztráty v argonu jsou 2,7 keV/cm, tzn. **na 1 cm vznikne přibližně 100 párů - jejich náboj (+ i -) je $100 \times 1,6 \times 10^{-19}$ C!** To není jednoduché naměřit. **Potřebujeme zvýšit počet iontů - zesílit signál!**

Způsob zesílení signálu ukážeme na jednoduché válcové proporcionální komoře.

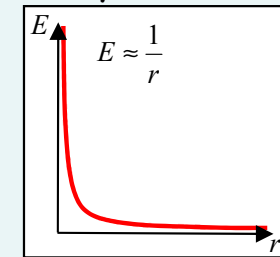
Válcová proporcionální komora

Válcová proporcionální komora je tvořena válcovou kovovou katodou, v jejíž ose je umístěn tenký anodový drát - mezi nimi je vysoké napětí, v blízkosti anody tak vzniká silné elektrické pole.

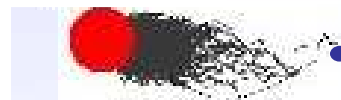
Průletem nabité částice vzniká lavina elektronů, počet elektronů a iontů v lavině je úměrný počtu primárních elektronů. Proudový puls, který dostaneme na anodě, je tedy zesílený a úměrný energii prolétávající částice (faktor zesílení závisí na přiloženém napětí $\sim 10^6$, signál je tedy mnohem větší než u ionizačních komor).



Anoda má tvar tenkého drátu, proto je gradient elektrického pole v jeho blízkosti veliký. Graf intenzity:



anoda



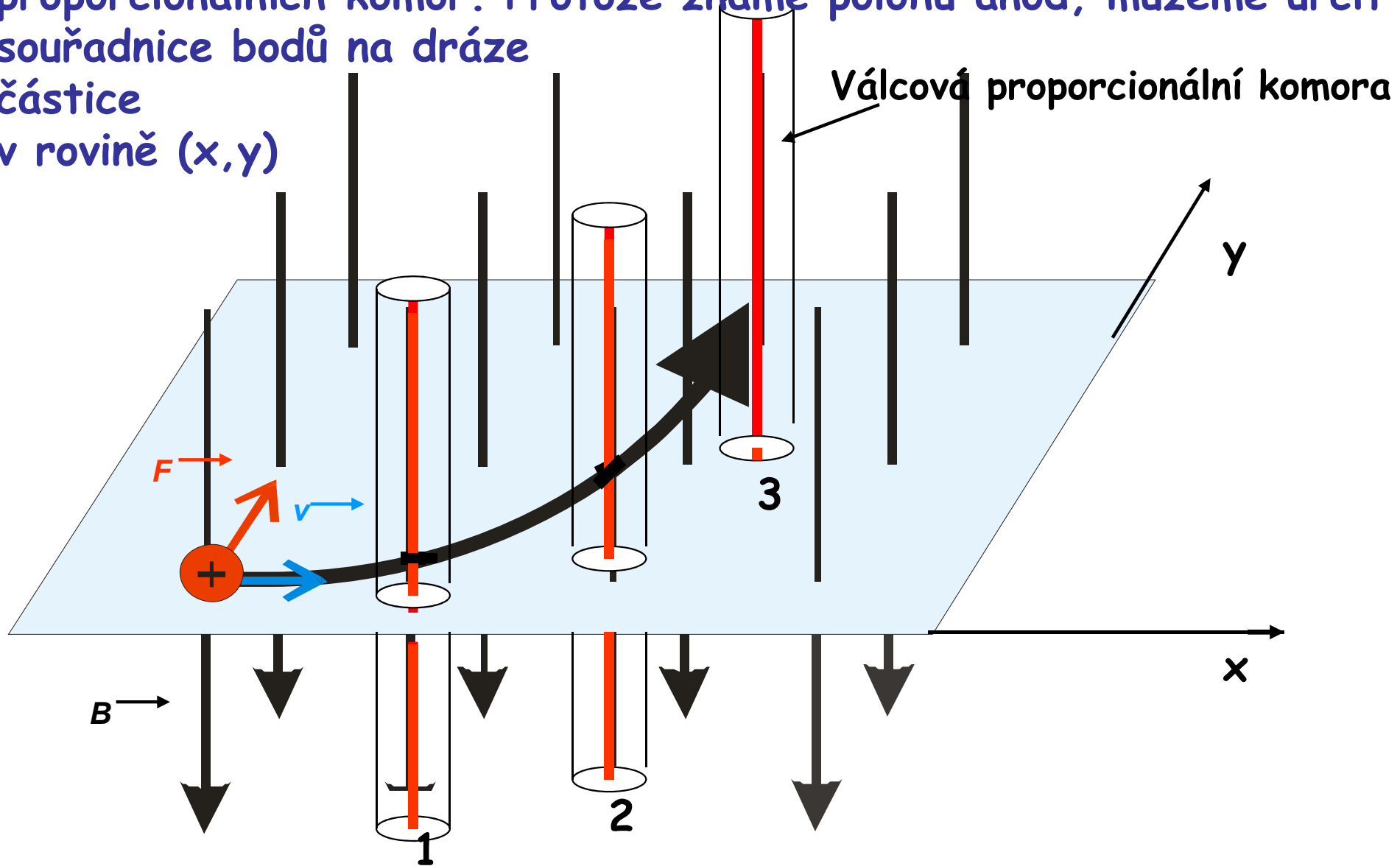
Primární elektron

(průměr anody $20 \mu\text{m}$, lavina vzniká těsně u anody)

Při dostatečně vysokém napětí je elektron v silném poli okolo středového drátu urychlen tak, že sám ionizuje. Vzniká tak **lavina elektronů** pohybujících se k anodovému drátu. Kladné (těžké, pomalé a líné) ionty zde nekreslíme.

Válcová proporcionální komora

Částice prochází kolem anod a způsobí signál na anodách proporcionálních komor. Protože známe polohu anod, můžeme určit souřadnice bodů na dráze částice v rovině (x,y)



Válcová proporcionální komora

Známe dvojice souřadnic (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3)

Abychom dostali poloměr kružnice R , řešíme soustavu rovnic třech rovnic

$$(x_i - X)^2 + (y_i - Y)^2 = R^2, \quad i=1,2,3, \quad (X, Y) \text{ jsou souřadnice středu kružnice}$$

Z poloměru potom určíme hybnost

Tato metoda v praxi nefunguje. Protože částice letí daleko, muse-li bychom mít hodně těchto jednodrátových komor, což je technicky náročné.

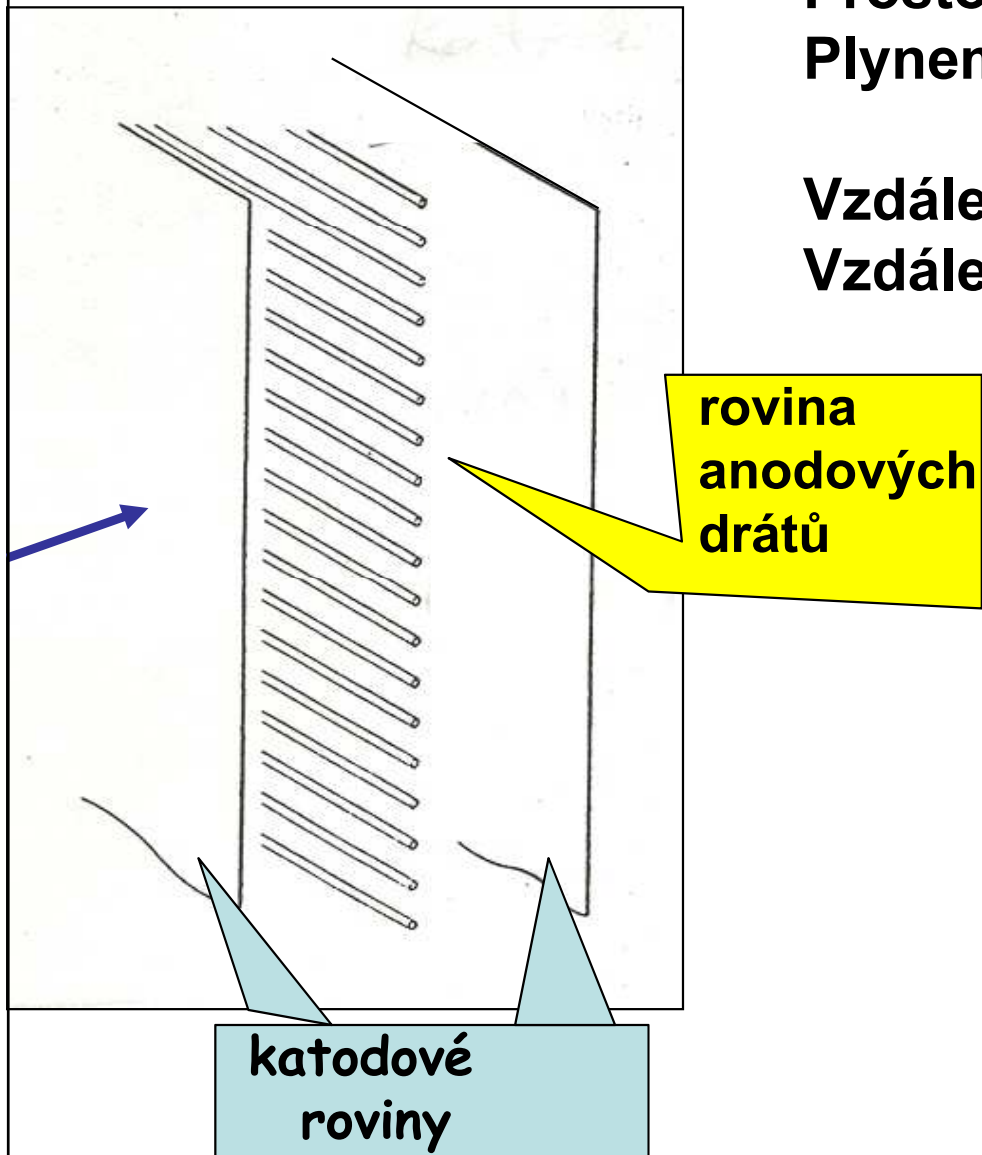
Tento problém byl vyřešen vynálezem **mnohodrátových proporcionálních komor**

Mnohodrátové proporcionální komory

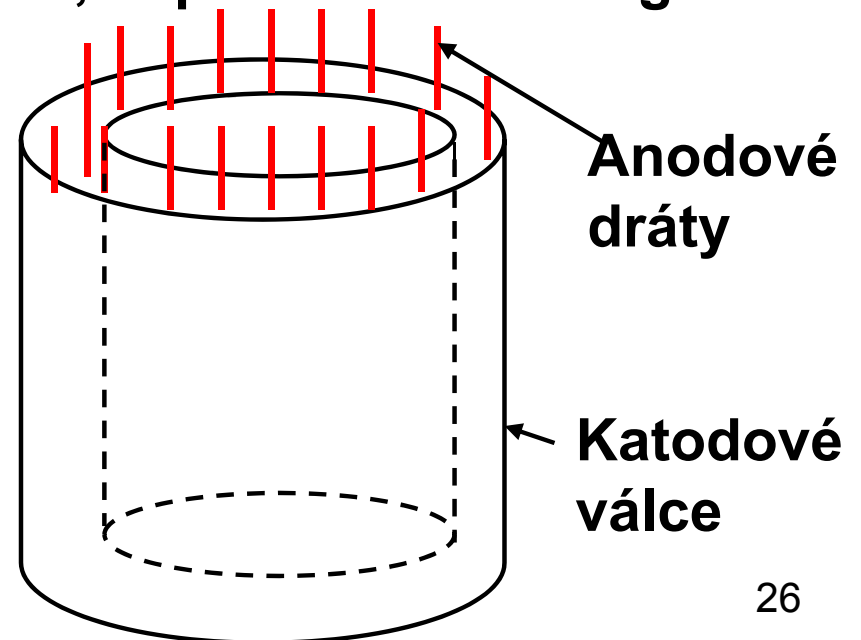
Princip: rovina anodových drátů, umístěná mezi dvě katodové roviny

Prostor mezi rovinami je zaplněn vhodným
Plynem (argon + izobutan)

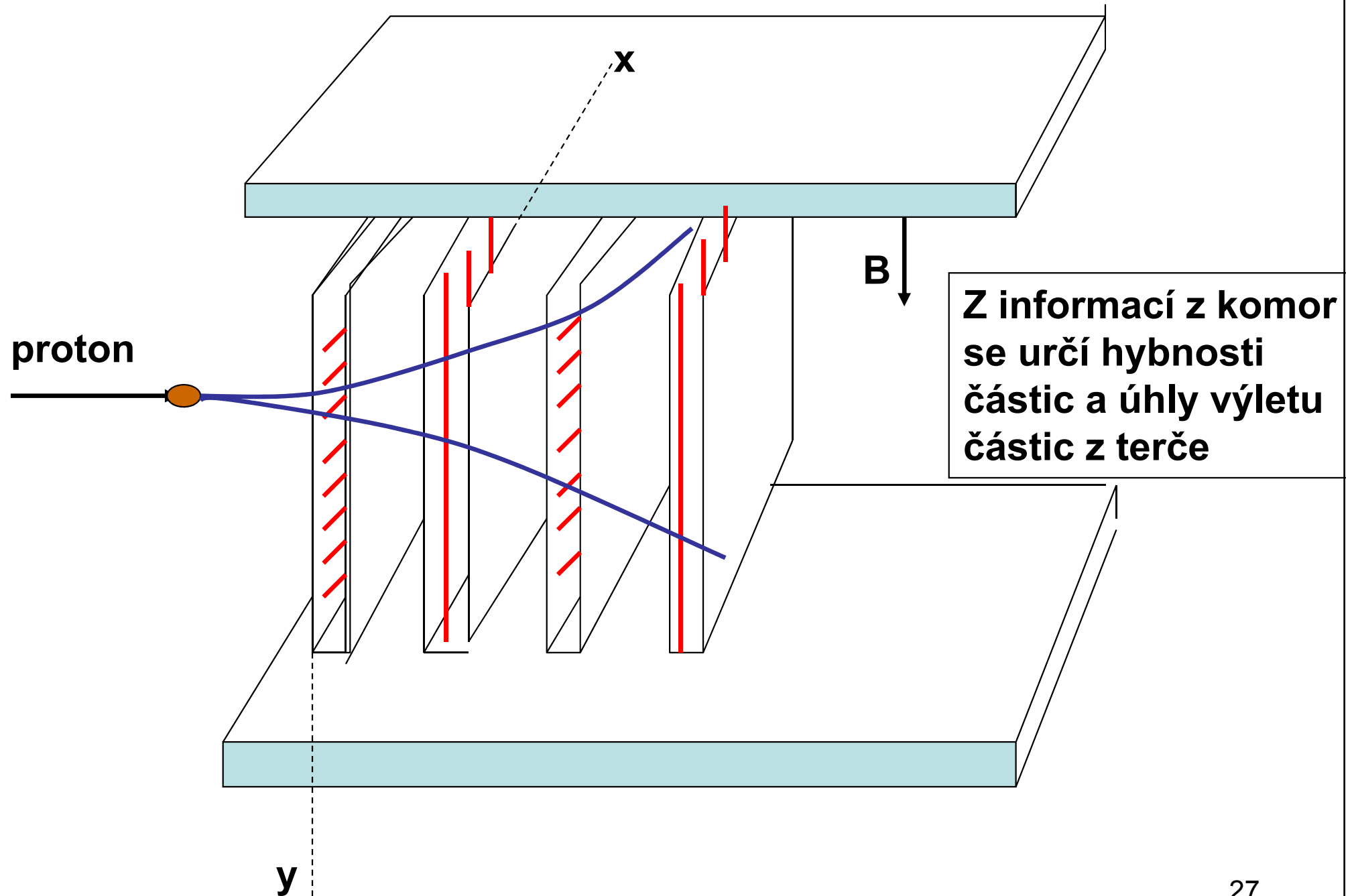
Vzdálenosti drátů jsou na úrovni několika mm
Vzdálenost anodových drátů od katody do 1 cm
Průměry drátů do 20 μm



Existuje mnoho modifikací těchto komor, např. válcová konfigurace

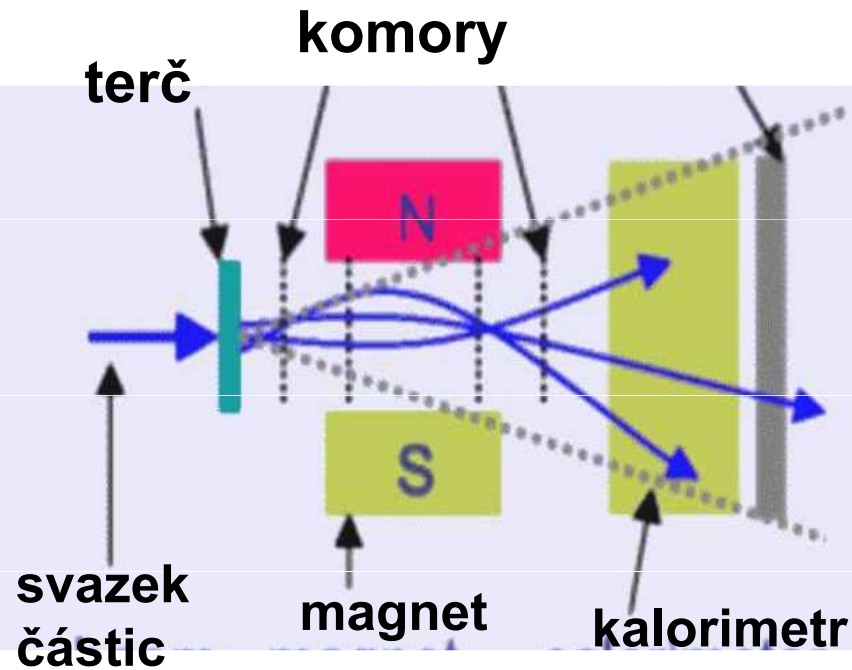


Mnohohrátkové proporcionální komory

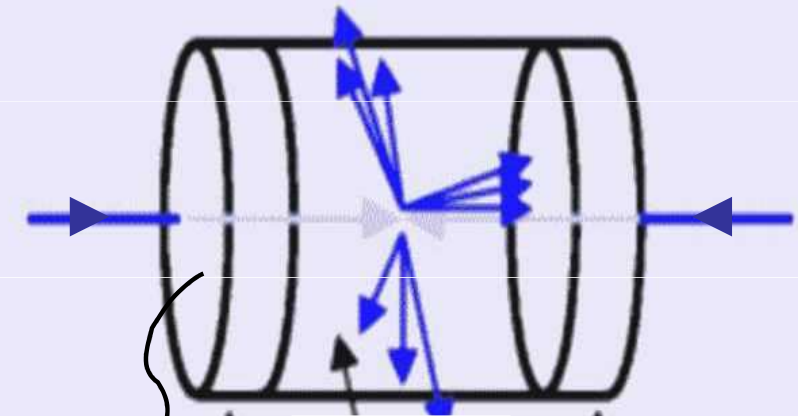


Uspořádání detektorů v aparaturách

Pevné terče



Srážky dvou svazků částic



Detektory mají
Válcový tvar

Detekce mionů

magnet

Vnitřní dráhový
detektor - komory

t

Hadronový
kalorimetr

elektromagnetický
kalorimetr

Co je třeba, aby detektory spolehlivě fungovaly?

- **Výběr základního detekčního materiálu (prověřuje se např. světelný zisk scintilátorů, útlum)**
- **Vývoj elektroniky připojené přímo na detektor (zesilovače, digitalizace...)**
- **Vývoj elektroniky pro sběr dat. V moderních aparaturách je mnoho subdetektorů, jejichž signály se musí synchronně sbírat a ukládat na vhodná média**
- **Prověřování činnosti detektorů na testovacích svazcích**

- **Při navrhování detektorů se používají simulační programy, které simulují procesy v detektorech.**
- **Vývoj programů pro on-line sběr údajů z detektorů.**
- **Vývoj programů pro analýzu údajů z detektorů.**

- **Vývoj tzv, rekonstrukčních programů. Např. Umožňuje ze souřadnic získaných z komor určit dráhy částic a pak jejich hybnosti**