

Ako fyzika elementárnych častíc skúma svet častíc

Záhada atómu

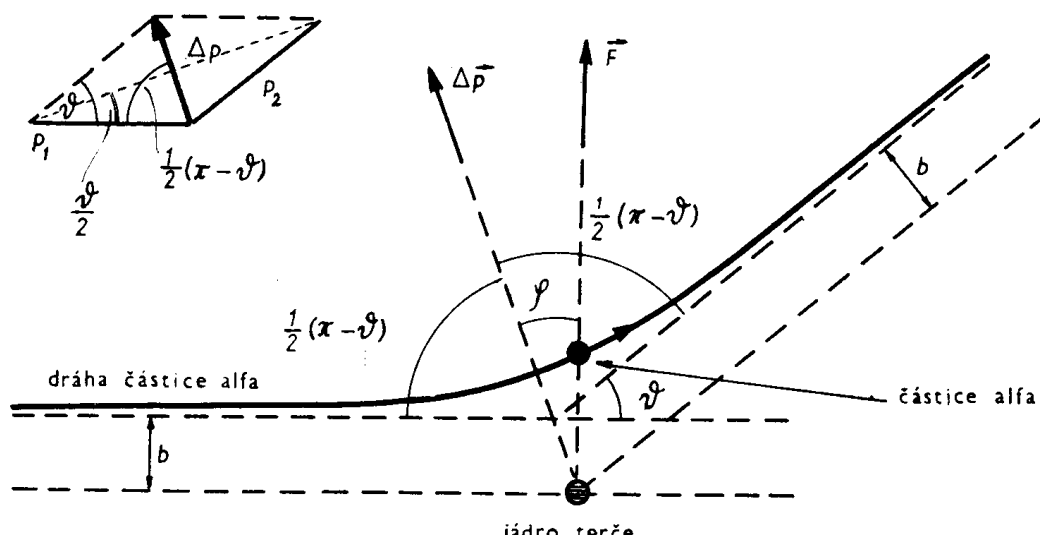
Základná otázka na začiatku 20.storočia: **Aká je štruktúra atómu?**

R. 1898 J.J.Thompson: Atóm je homogenná guľa kladne nabitej hmoty, v ktorej plávajú elektróny. Kladne nabitá hmota dodáva praktický všetku hmotnosť atómu.

Kľúčový experiment: Na skúmanie štruktúry atómu navrhol E. Rutherford experiment, ktorého podstata spočíva v ostreľovaní kovovej fólie časticami alfa.

Experiment uskutočnili Geiger a Marsden, ktorí pri tom použili:

- Častice alfa s kinetickou energiou $E=7.7\text{ MeV}$
- Zlatú fóliu hrúbky $3\times 10^{-7}\text{ m}$



Obr. 1: Rutherfordov experiment - vzťah zrážkového parametra b a uhla rozptylu φ .

Výsledok experimentu bol nasledovný:

1. Väčšina častíc prechádza fóliou bez odchýliek
2. Niektoré častice sa odchyľujú na veľké uhly

Druhý bod protirečí Thompsonovmu modelu atómu, lebo α -častice sú podstatne ťažšie ako elektrón (viac ako 7 000-krát).

Z tohoto experimentu E. Rutherford urobil nasledovný záver :

Atóm pozostáva s drobného jadra – v ňom je sústredený kladný náboj a temer celá hmotnosť atómu a z elektrónov krúžiacich okolo neho.

Podstata Rutherfordovho experimentu

Rozptyl reálnych častíc (častica α a atómové jadro) sa porovnáva s rozptylom bodových častíc, medzi ktorými pôsobí coulombovská sila

$$F = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2},$$

kde Q_1 a Q_2 sú náboje častíc a r je ich vzdialenosť.

V prípade rozptylu bodových častíc coulombovská sila jednoznačne viaže parameter zrážky s uhlom rozptylu (viď. Obr.1). Nebodovosť štruktúry častice sa prejaví ako odklon od zákona rozptylu bodových častíc pri zrážkových parametroch porovnateľných s rozmerom častice.

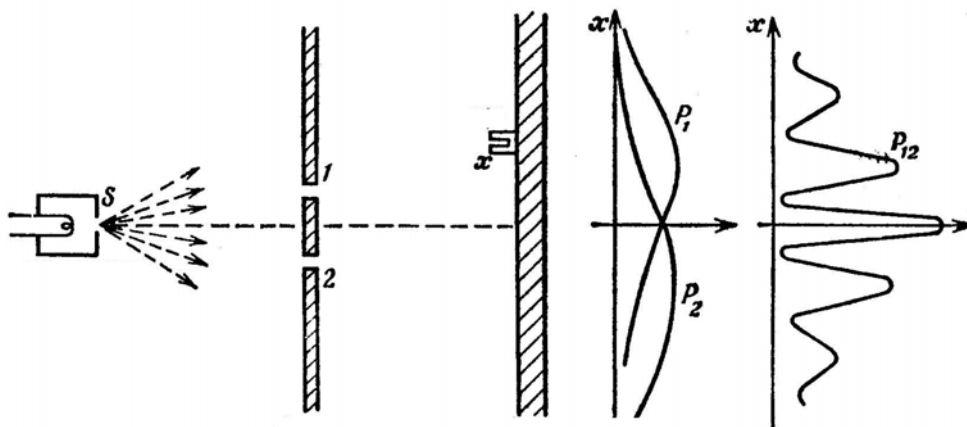
Nedostatok Rutherfordovho modelu atómu.

Podľa klasickej teórie elektromagnetického poľa elektrón krúžiaci okolo atómového jadra musí vyžiarovať, v dôsledku čoho sa bude pohybovať po špirále až „spadne“ na atómové jadro. Tento proces by pritom nemal trvať dlhšie ako $\sim 10^{-11}$ s. Teda atóm by mal byť veľmi nestabilným útvarom. Reálna skúsenosť však hovorí niečo iné – atóm je stabilný útvar. V rámci klasickej teórie nebolo možné dať do súladu výsledky Rutherfordovho experimentu a predpovede teórie. Zosúladiť experiment a teóriu sa podarilo až v rámci kvantovej teórie, ktorá časticu začala chápať netradičným spôsobom – pripísala jej vlnové vlastnosti.

Zrod kvantovej teórie

Z hľadiska kvantovej teórie sa ukázal byť experiment, ktorý je schématický znázornený na obrázku Obr. 2.

Častica alebo vlna? Skúmame prechod elektrónov cez dvoj-štrbinu, schéma experimentu je na Obr. 2.



Obr. 2: Prechod elektrónov cez dvoj-štrbinu: z elektrónového dela elektróny prechádzajú cez dvojštrbinu a sú registrované detektorom polohy.

Záveru uvedeného experimentu sú nasledovné:

- Elektrón sa správa ako vlnenie s vlnovou dĺžkou $\lambda = h/p$, h – Plankova konštanta, p - hybnosť častice.
- Pri registrácii sa elektrón správa ako bodová častica.

Výsledok: pojem dráhy elektrónu nie je dobre definovaný – priestorový pohyb elektrónu je popísaný vlnovou funkciou, ktorá udáva amplitúdu pravdepodobnosti vyskytu častice v danom mieste a čase.

V klasickej fyzike je častica jednoznačne určená:

$$\text{polohou } \vec{r}(t) \text{ a hybnosťou } \vec{p}(t) = m \vec{v}(t).$$

Vektor polohy a hybnosti (resp. rýchlosti) jednoznačne definujú trajektóriu (dráhu) častice. V kvantovej fyzike je stav častice určený vlnovou funkciou $\psi(\vec{r}, t)$, ktorej význam je nasledovný:

$$|\psi(\vec{r}, t)|^2 \Delta x \Delta y \Delta z \equiv \text{pravdepodobnosť výskytu častice v oblasti} \\ (x, x + \Delta x) \times (y, y + \Delta y) \times (z, z + \Delta z)$$

Trajektória častice nie je definovaná v klasickom slova zmysle - má význam hovoriť len o pravdepodobnosti výskytu častice v danom mieste a v danom čase. V kvantovej fyzike sa poloha (súradnica) a hybnosť (rovnako ako energia a čas) nedajú súčasne presne určiť a podliehajú **Heisenbergovej relácii neurčitosti**:

$$\Delta p \Delta x \geq h/2 \quad \Delta E \Delta t \geq h/2$$

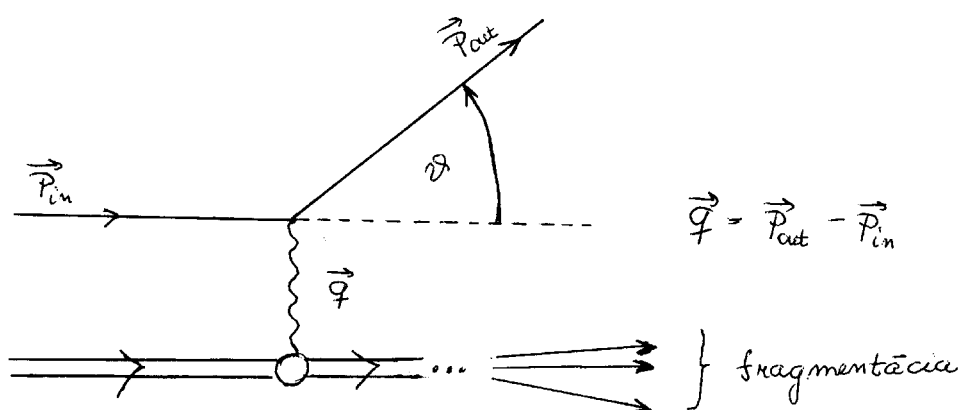
Podstata skúmania štruktúry častíc

Pri skúmaní štruktúry elementárnych častíc fyzika využíva ich vlnové vlastnosti. Podľa De Broglieovej hypotézy častici s hybnosťou $\vec{p}$ prislúcha vlnová dĺžka λ :

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

Uvažujme rozptyl bodovej častice na inej - vo všeobecnosti nebodovej - častici. Príkladom takéhoto rozptylu je rozptyl elektrónu (bodová častica) na protóne (nebodová častica).

Podľa súčasných predstáv rozptyl je sprostredkovaný virtuálnym fotónom (viď. Obr.3)



Obr. 3: Rozptyl bodovej na nebodovej častici

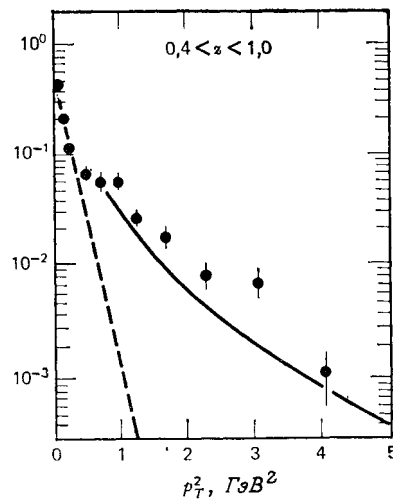
Vlastnosti virtuálneho fotónu sú dané hybnosťou, ktorú prenáša ($\vec{q}$), ktorá definuje jeho vlnovú dĺžku ($\lambda = h/|\vec{q}|$).

- Prenesená hybnosť je daná vstupou ($\vec{p}_{in}$) a výstupnou ($\vec{p}_{out}$) hybnosťou rozptyľovanej častice, pritom platí: $|\vec{q}| \sim \sin \vartheta/2$.
- Čím je menšia vlnová dĺžka virtuálneho fotónu (λ), tým menšie komponenty štruktúry umožňuje vidieť. Ak charakteristický rozmer rozptyľového centra (nebodovej častice) R je oveľa menší ako λ , t.j. $R \ll \lambda$, potom rozptyľové centrum sa správa ako bodová častica. Vtedy dochádza k tzv. bodovému rozptylu, ktorý teoreticky vieme dobre popísať. Odklon od bodového rozptylu je príznakom nebodovej štruktúry rozptyľového centra.
- Ak pri danej vlnovej dĺžke λ zaregistrujeme štruktúru rozptyľového centra snažíme sa rozptyľové centrum chápať ako sústavu bodových komponentov – nových elementárnejších častíc.
- Je treba sledovať aj „osud“ rozptyľového centra, ktoré pri krátkych vlnových dĺžkach λ môže fragmentovať a fragmenty tiež nesú informáciu o komponentoch štruktúry nebodovej častice.

Čo sa pozoruje v experimente?

Čo je treba experimentálne pozorovať v prípade vyššie zmieneného rozptylu?

- Merať zmenu hybnosti bodovej (rozptyľovanej) častice – prakticky to znamená merať jej energiu a uhol výletu. To nám umožní určiť prenesenú hybnosť a teda vlnovú dĺžku „skanujúceho“ fotónu. Odklon uhlového rozdelenia rozptyľovanej častice od formy rozdelenia pre bodový rozptyl poskytuje informáciu o štruktúre.



Obr. 4: Závislosť počtu rozptýlených častíc od kvadrátu priečnej hybnosti p_T .

- Je potrebné rekonštruovať parametre (energie, uhly výletu, náboj) častíc vznikajúcich v zrážke, ktoré nesú informáciu o štruktúre zrážajúcich sa častíc. Hlavný problém pri rekonštrukcii spočíva v tom, že vznikajúce častice sú kratkožijúce ($10^{-6} - 10^{-23}$ sec).

Ako rekonštruovať kratkožijúce častice?

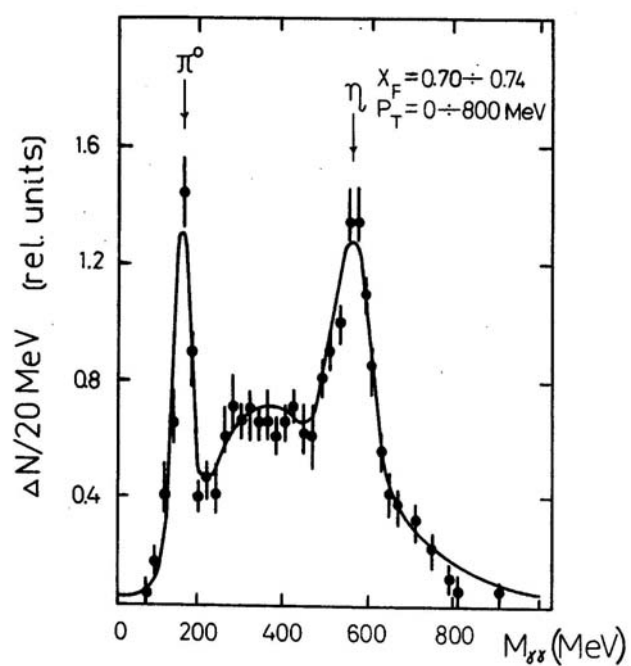
1. Pomáha nám dilatacia času: Skutočná doba života je $T = T_0 / \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$

Ak je rýchlosť častice v blízka rýchlosti svetla (c) potom častica žije podstatne dlhšie $T \gg T_0$ a môže byť zaregistrovaná.

2. Častice môžeme rekonštruovať pomocou ich rozpadných produktov, teda častíc na ktoré sa rozpadajú – využívame pritom tzv. invariantnú hmotnosť. Idea spočíva v nasledovnom: Ak sa častica hmotnosti m rozpadá na 2 častice (s energiami E_1 , E_2 a hybnosťami P_1 , P_2), ktoré dokážeme zaregistrovať, potom dokážeme rekonštruovať tzv. spektrum invariantných hmotností:

$$m^2 = \frac{(E_1 + E_2)^2}{c^4} - \frac{(\vec{P}_1 + \vec{P}_2)^2}{c^2}$$

Existencia častice o hmotnosti m sa prejaví ako pík v spektre invariantných hmotností (viď. Obr.5).



Obr. 5: Spektrum invariantných hmotností $\gamma\gamma$, prvý pík zodpovedá rozpadu $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ a druhý rozpadu $\eta \rightarrow \gamma\gamma$