

## Úloha II.S ... driftujeme

6 bodů; průměr 2,67; řešilo 12 studentů

- a) Které driftы budeme pozorovat v lineární pasti? Představte si, že je osa pasti vodorovná, bude v pohybu částic hrát významnou roli drift způsobený gravitační silou?
- b) Odvoďte vztah pro ztrátový kužel a nakreslete originální obrázek, který bude názorně ilustrovat chování částic v lineární pasti.
- c) Odvoďte vztah pro drift způsobený elektrickým polem, které je kolmé na magnetické pole a má konstantní gradient ve směru svého působení. Diskutujte různé typy pohybu částice v závislosti na velikosti gradientu.

- a) V lineární pasti, která byla znázorněna na obrázku doprovázejícím druhý díl seriálu, budeme pozorovat především driftы způsobené nehomogenním magnetickým polem. Gradient magnetického pole paralelní ke směru siločar bude odrážet částice s vhodným poměrem paralelní a kolmé rychlosti zpět do prostoru pasti. Vzhledem k tomu, že dle Maxwellových rovnic je celková divergence magnetického pole nulová, bude gradient ve směru pole vyvolávat i gradient ve směru kolmém na pole. Ten bude způsobovat precesní pohyb částic, které budou pomalu rotovat okolo osy pasti. Tím se budou částice promíchávat a bude se rušit vliv driftu způsobený gravitací, který by částice separoval ve směru kolmém na osu pasti a směr gravitační síly. Pokud bychom uvažovali přítomnost plazmatu s kolektivním chováním (a ne jen individuálních nabitých částic), zcela jistě by se objevil i  $E \times B$  drift – ionty a elektrony by z pasti unikaly různým tempem a tím by se narušovala kvazineutralita plazmatu v pasti, což by vedlo ke vzniku elektrických polí.
- b) Vyjdeme z předpokladu zachování magnetického momentu  $\mu$ , který bude stejný pro částici v místě s nejmenším magnetickým polem  $B_0$  (tj. uprostřed pasti) a s maximálním polem (na kraji)  $B_{\max}$  (v dalším textu bude rychlost v tomto místě označována jako  $v_1$ )

$$\mu = \frac{mv_{\perp 0}^2}{2B_0} = \frac{mv_{\perp 1}^2}{2B_{\max}}.$$

Uvažujme případ takové částice, která bude mít v místě maximálního magnetického pole přesně nulovou paralelní rychlost, tj. veškerá její kinetická energie se transformuje do kolmé složky

$$\frac{mv_{\perp 0}^2}{2B_0} = \frac{mv_0^2}{2B_{\max}}.$$

Z tohoto vztahu snadno odvodíme podmínku pro poměr celkové a kolmé rychlosti

$$\frac{v_{\perp 0}^2}{v_0^2} = \frac{B_0}{B_{\max}}.$$

Tomuto poměru odpovídá ve fázovém rychlostním prostoru ztrátový kužel s úhlem  $\alpha$

$$\sin^2 \alpha = \frac{B_0}{B_{\max}}.$$

Částice, které se nacházejí uvnitř ztrátového kužele, mají dostatečně velký poměr paralelní složky rychlosti ku celkové velikosti rychlosti na to, aby dokázaly z pasti uniknout.

$$v_{\parallel} > v \sqrt{\frac{B_0}{B_{\max}}}.$$

- c) Vyjdeme z rovnice ze seriálu, kde konstantní elektrické pole nahradíme výrazem

$$E = E_0 + ay,$$

kde  $a$  je gradient elektrického pole. Dále budeme postupovat podobně jako v seriálu s využitím vztahu

$$\frac{dE}{dt} = \frac{dE}{dy} \frac{dy}{dt} = av_y.$$

Takto budeme schopni separovat soustavu diferenciálních rovnic a dojít k rovnici pro  $v_y$

$$\frac{d^2 v_y}{dt^2} = -\frac{e}{m} av_y - \left( \frac{eB}{m} \right)^2 v_y = -\Omega_L \left( \frac{a}{B} + \Omega_L \right) v_y.$$

Částice se bude pohybovat s pozměněnou Larmorovskou frekvencí. Zajímavý je případ, kdy

$$-\frac{a}{B} > \Omega_L.$$

V tomto případě se změní znaménko koeficientu u  $v_y$ , tedy změní se charakter řešení diferenciální rovnice – z lineárního harmonického oscilátoru přejde na exponenciální řešení. Larmorovský pohyb bude tedy nahrazen pohybem ve směru elektrického pole.

**Michael Komm**  
robin@fykos.cz

---

Fyzikální korespondenční seminář je organizován studenty MFF UK. Je zastřešen Oddělením pro vnější vztahy a propagaci MFF UK a podporován Ústavem teoretické fyziky MFF UK, jeho zaměstnanci a Jednotou českých matematiků a fyziků.

Toto dílo je šířeno pod licencí Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported.  
Pro zobrazení kopie této licence, navštivte <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>.