

# Országos Szilárd Leó Fizikaverseny

Döntő

Paks, 2001. április 27.

Számítógépes feladat

## Bevezetés

1931-ben Szilárd Leó szabadalmi kérelmet nyújtott be egy olyan részecskegyorsítóra vonatkozóan, amelyen a részecskék körpályán mozognak. A részecskéket homogén mágneses mező tartja a körpályán, s általában egyenletes körmozgást végeznek. Amikor azonban áthaladnak a "gyorsítórésen" – a kör egyik átmérőjén -, az állandó mágneses mezőn kívül még pályairányú elektromos mező is hat rájuk, amelynek hatására a sebességük abszolút értéke – s ezzel az energiájuk is – nő. Mivel a körpályán haladó részecskék időről időre ismételten áthaladnak a gyorsítórésen, ezért ugyanazzal a feszültséggel sokszor lehet őket gyorsítani, feltéve, hogy a gyorsítórésben a feszültség a körpályán való mozgásnak megfelelő ütemben váltakozik, s így "szinkronban" marad a keringő részecskékkel.

Ez annak a berendezésnek az alapelve, amit ma ciklotron néven ismerünk, s amelynek megalkotásáért E. Lawrence amerikai fizikus 1939-ben Nobel-díjat kapott.

A ciklotron beállításához szükséges összefüggések a *Függelékben* vannak. A Feladat pontos értelmezéséhez olvasd el a *Szimulációs program leírása* c. részt.

---

## Feladat

**Állíts elő kb. 20 MeV energiájú protonnyalábot a szimulációs programban szereplő, 200 cm sugarú ciklotronnal.**

Annál több pontot kapsz,

- ...minél pontosabban megközelíted a 20 MeV energiát a nyaláb energiájának átlagértékével;
- ...minél kisebb lesz a nyaláb energiájának a szórása;
- ...minél nagyobb hányadát tudod a kibocsátott részecskéknek a céltárgyra irányítani;
- ...minél több részecske érkezik a céltárgyra addig, amíg le nem jár a rendelkezésre álló idő;
- ...minél kisebb lesz a blende és a ciklotron-fal radioaktivitása (a céltárgyra beérkezett részecskék számára normálva).

## Függelék

Az alábbi összefüggések segítségedre lehetnek a ciklotron paramétereinek beállításánál. Valamennyi összefüggés az SI egységrendszerben használható.

1.  $\mathbf{B}$  indukciójú mágneses mezőben a  $\mathbf{B}$  vektorra merőleges  $v$  sebességgel mozgó,  $q$  töltésű részecskére erő hat, amelynek abszolút értéke:  $F = qvB$ . Az erő iránya merőleges mind a  $\mathbf{B}$  vektorra, mind pedig a  $v$  sebességvektorra. Ezt az erőt Lorentz-erőnek hívjuk, s ez szolgáltatja a körpályán való mozgáshoz a centripetális erőt, azaz

$$\frac{mv}{R} = qvB.$$

Itt  $m$  a részecske tömege,  $R$  pedig a körpálya sugara. Ennek alapján a mágneses mezőben mozgó töltött részecske körfrekvenciája könnyen meghatározható:

$$\omega = \frac{v}{R} = \frac{qB}{m}.$$

A fenti egyenletből az  $R$  sugarú pályán haladó részecske sebességének abszolút értéke:

$$v = \frac{qB}{m} R, \text{ s ezért mozgási energiája: } E = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} m \left( \frac{qB}{m} R \right)^2 = \frac{q^2 B^2}{2m} R^2.$$

2. Ha egy  $q$  töltésű részecske  $U$  potenciálkülönbségen halad át, energiája megváltozik. Az energiaváltozás nagysága:  $\Delta E = qU$ . Ennek alapján változik meg a ciklotron gyorsítórésén áthaladó részecskék energiája is. Természetesen itt  $U$  helyébe azt az  $U(t)$  pillanatnyi értéket kell írni, amekkora a feszültség volt abban a pillanatban, amikor a részecske odaért a réshez! (Itt azt feltételeztük, hogy a részecske pillanatszerűen halad át a gyorsítórésen, azaz az áthaladása közben a feszültség nem változik. Nagyon lassan "bolyongó" részecskék esetén ez a közelítés már nem érvényes, s ilyen részecskékénél a szimuláció sem ad a valóságnak megfelelő eredményt).
3. A szimulációban a gyorsító feszültség a következőképpen függ az időtől:

$$U = U_0 \cos(2\pi f t + \varphi)$$

Itt  $f$  a frekvencia,  $U_0$  az amplitúdó,  $\varphi$  pedig a kezdeti fázis. Látható, hogy  $\varphi = 0$  mellett a gyorsító feszültség a kezdeti időpontban éppen maximális.

## A szimulációs program leírása

A szimulációban szereplő ciklotron egy “képzelt” berendezés, nincs a valóságban ilyen paraméterekkel rendelkező gyorsító.

A bejelentkezés után a képernyő nagyobbik részén egy ciklotron rajza látható. A kicsinyítés mértéke akkor, hogy a “valóságban” a ciklotron sugara 200 cm.

A képernyő jobb oldalán látható beviteli mezőkkel az egyes üzemi paraméterek állíthatók be. Most ezeket vesszük sorra.

### Mágneses mező

A ciklotron rajzán fekete színű az a terület, ahol a képernyő síkjára merőleges állandó **mágneses mező** hat a részecskékre. A mágneses mező maximális értéke 0,5 T.

Az ábra felső részén lévő világoskék téglalap olyan tartomány, ami még a ciklotron vákuumkamrájához tartozik, de ahol a mágneses mező 0. Az ide bekerülő részecskék egyenes vonalban “balról jobbra” mozognak.

### Gyorsító feszültség

A függőleges fehér vonal jelöli ki a gyorsítórést. Itt a részecskékre gyorsító elektromos mező hat. A gyorsítórés két oldalán van a két félteke (ezeket a szakemberek “D”-nek hívják). A gyorsítómezőt a két féltekére adott periodikusan váltakozó feszültséggel állítják elő. A gyorsítómező a rajzon “vízszintes” irányú. A gyorsító feszültség **frekvenciáját, amplitúdóját** és a szimuláció kezdőpillanatában felvett **fázisát** a beviteli mezőkben lehet megadni. A váltakozó feszültség pillanatnyi értékét a beviteli mezők között található periodikusan jobbra-balra mozgó pont jelzi. Fontos tudni, hogy nem lehet akármekkora frekvenciát választani. Ennek egyrészt a ciklotron oszcillátora az oka, másrészt pedig az, hogy a ciklotron gyorsító elektródái “üregrezonátorként” is működnek. A megengedett frekvenciatartomány ebben a szimulációban: 3 MHz-től 10 MHz-ig. Hasonlóképpen, a váltakozó feszültséget előállító oszcillátor legfeljebb 1000 kV amplitúdójú feszültséget tud előállítani (ezek az értékek egy valóságos ciklotronnál mások).

### Részecskék

Ebben beviteli részben található a részecskékre vonatkozó információk. Az **összes** feliratú mező mutatja, hogy eddig összesen hány részecske hagyta el az ionforrást (ld. később). Az alatta levő két mező a ciklotronban kering legnagyobb energiájú részecske (ez általában sárga színű) pillanatnyi energiáját mutatja MeV-ben, ill. azt az energiát, amelyet akkor nyert ez a részecske, amikor legutóbb áthaladt a gyorsítórésen (a függőleges fehér vonalon). Ezek az

értékek információk, s nem változtathatók meg. A **Bővebb** feliratú gombbal új mezők válnak láthatóvá, s ott meg lehet adni a részecskék tömegét (atomi tömegegységben), a részecske töltését (elemi töltés egységekben), ill. azt, hogy a részecske rajzolja-e ki a pályáját a képernyőre. Sok részecske indítása esetén a pályarajzolást tanácsos kikapcsolni, különben a képernyő hamarosan megtelik a pályákkal...

### **Ionforrás, blende, ciklotronfal, radioaktivitás**

A gyorsítandó részecskék **ionforrásból** jönnek. Az ionforrás helyét egy kis fehér négyzet jelzi valahol a ciklotron közepe táján. A **blende** pedig tulajdonképpen egy fémlap, amely a ráeső részecskéket elnyeli, s ezzel megakadályozza őket a további mozgásukban. A blende helyét egy kék színű kis téglalap jelzi a rajzon. Az **Ionforrás és blende** gombra kattintva megadhatjuk az ionforrás X és Y koordinátáját. Az origó a ciklotron középpontjában van. Mechanikai okok miatt az ionforrás középpontja az origótól Y irányban csak a [ 0,-40 cm] intervallumban, X irányban pedig a [ -4 cm, +4 cm] intervallumban lehet. Megadhatjuk a blende középpontjának koordinátáit is, valamint a blende hosszúságát (Y-irányú kiterjedés) és szélességét (X-irányú kiterjedés). A blendét a ciklotron belsejében akárhol elhelyezhetjük. Az ionforrást és a blendét az egérrel is mozgathatjuk (fogd és vidd).

A **ciklotronfal** fémből készült (ugyancsak kék színnel jelzett), és abban hasonlít a blendéhez, hogy a ráeső részecskéket elnyeli. Fontos tudni, hogy minden 0,45 MeV-nél nagyobb energiájú részecske, amely a blendére vagy a falra esik, magreakciók révén **radioaktivitást** hoz létre. Mégpedig a létrehozott aktivitás a becsapódott részecske tömegegységre eső energiájának (energia/tömeg) monoton növekedő (de nem lineáris) függvénye. A **feladat értékelésekor az egyik szempont** az, hogy az előírt nyalábot a lehető legkisebb radioaktivitás létrehozásával kell megvalósítani.

### **Szimulációs beállítások**

Erre a gombra kattintva a megjelenő ablakban megadhatjuk, hogy milyen szimulációs módot kívánunk. Kérhetjük azt, hogy a program csak **egyetlen részecskét** indítson el (ezt az üzemmódot célszerű használni a "beállítások" ideje alatt), de kérhetjük azt is, hogy a program véletlenszerű időkből **folyamatosan** indítson újabb és újabb részecskéket (ezt az üzemmódot kell választani, amikor "nyalábot" kell előállítani).

Ugyanebben a beviteli ablakban adhatjuk meg azt az **időlépést** is (mikrosecundumokban,  $\mu$  s), amellyel a program számolja a részecskék mozgását. Túl nagy időlépést választva a szimuláció felgyorsulna ugyan, de a számolás pontatlan lennel. Emiatt, ha túl nagy időlépést adnánk meg, a program automatikusan korrigálja kisebbre. Túl kis időlépést választva a program futása lassul le nagyon. Az **Időzítő** nevű mező csak a megjelenítést befolyásolja, a számolást nem. Ha valamilyen oknál fogva – pl. beállításkor – le akarjuk lassítani a szimulációt, hogy jobban megfigyelhessük, hogy mi történik, adjunk meg ide nagyobb értéket. Egy bizonyos értéknél kisebbet megadva a program futása már nem gyorsul tovább, mert elértük a processzor sebességének a határát.

### **Értékelés**

Erre a menüpontra kattintva a szimuláció futása felfüggesztődik, s egy teljesen új ablak nyílik meg. Ennek azonban csak akkor van értelme, ha a szimulációt **folyamatos** üzemmódban futtattuk, s már érkeztek részecskék a céltárgyra. Az ablak jobb oldalán látjuk, hogy hány

részecskét nyelt el a *céltárgy*, a *blende* és a *ciklotronfal*, de itt látjuk azt is, hogy a blende s a ciklotronfal mennyire lett radioaktív az elnyelt részecskék következtében. (A radioaktivitást jellemző számok önkényes egységekben vannak.) Természetesen a számunkra hasznos részecskék a “céltárgy” oszlopban vannak.

Az ablak bal oldalán két grafikon van, mindkettő a céltárgyra megérkezett, “hasznos” részecskékre ad információt. A felső a részecskék energia (MeV) szerint, az alsó pedig az idő szerinti (másodperc) eloszlását mutatja.

A tengelyek szélső értékeit a program automatikusan meghatározza, de az ábrára kétszer kattintva mi is megadhatjuk. (A visszatéréshez és a változtatások érvénybe lépéséhez ismét kétszer kell kattintani.) Figyeljünk arra, hogy külön meg kell adni a nagyságrendet is!

Az értékelő rész további szolgáltatása, hogy meghatározza *az ábrán látható rész* középértékét és szórását. A felhasználók számára fontos, hogy a szolgáltatott nyalámban repülő részecskék energiája ne nagyon térjen el a megadott értéktől. Az lenne a legjobb, ha mindegyik részecskének pontosan ugyanakkora energiája lenne. Az ábrától olvasható le, hogy ezt mennyire sikerült megvalósítani.