

ni lehessen. 1803-ban egy angol professzor, John Dalton felfedezte, hogy az elemek csak egyféle atomokból állnak. Ezeket hívjuk *kémiai elemeknek*. Ilyen az arany, a vas vagy az oxigén. A tiszta vas tehát csak vasatomokból áll, a tiszta arany csak aranyatomokból. A vasatom a lehető legkisebb részecskéje a vasnak. A vasatom szétbontható ugyan, de ekkor már nem nevezhetjük vasnak. Így van ez az arany és az összes többi kémiai elem esetében is. Sok kémiakönyvben ezért a következő meghatározást találjuk: „Atomnak nevezzük az anyag legkisebb, tovább nem osztható részét, amely még magán viseli az illető anyag összes kémiai tulajdonságát.”

Az atomoknak nagyon különböző lehet a tömegük. A legkönnyebb a hidrogén, a vas jóval nehezebb, és a számunkra fontos urán még a vasnál is sokkal nehezebb. Az atomok a mindennapi élet megszokott méreteihez képest nagyon kicsik. Ha minden egyes ember akkora volna, mint egy atom, akár 100 millióan is kényelmesen elférnének egy borsószem tetején. Ha pedig a Földön jelenleg élő ötmilliárd ember láncáa kapaszkodna össze, akkor ez a lánc ötven centiméter hosszú lenne.

A neves dán fizikus, Nils Bohr 1913-

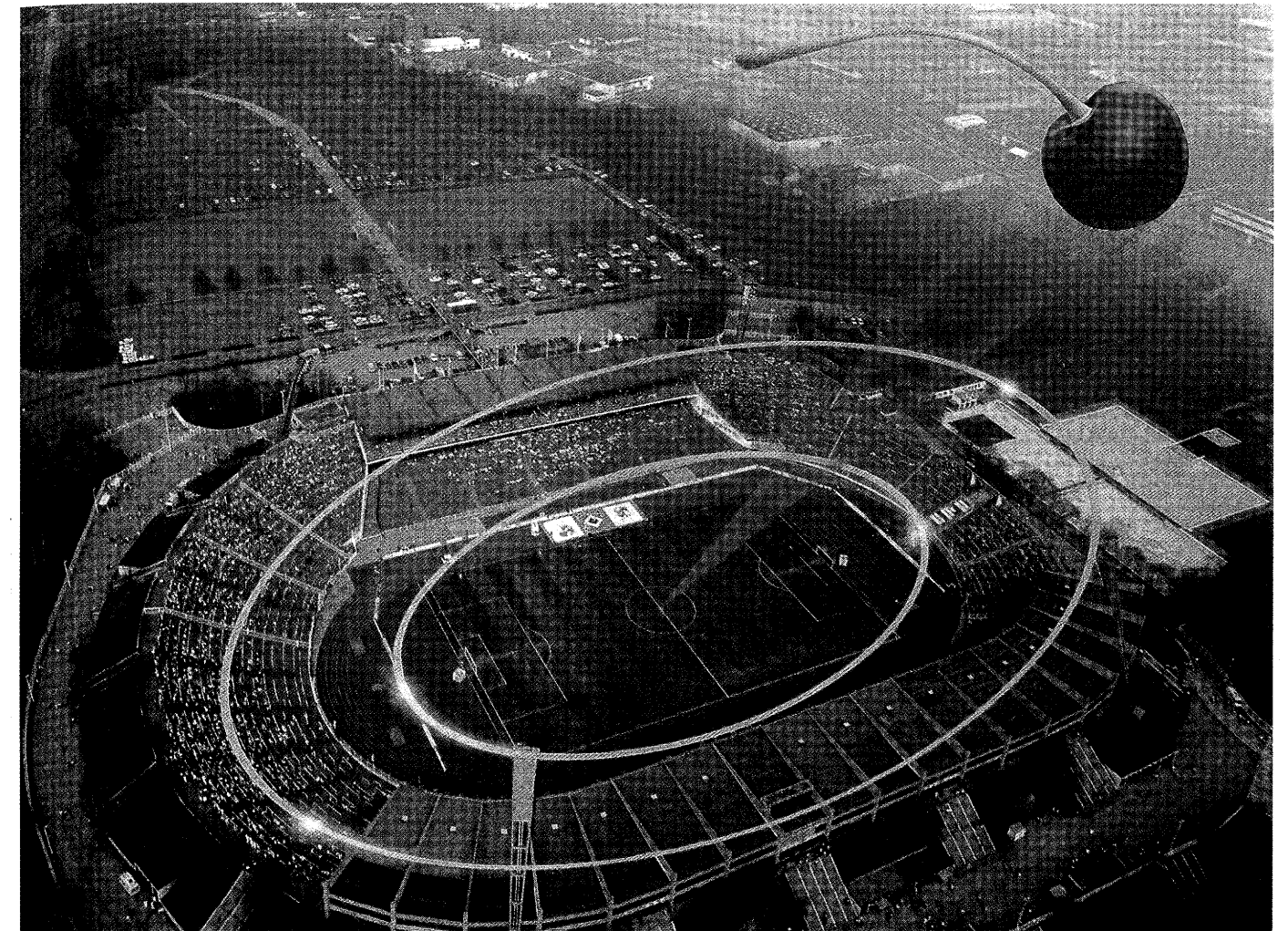
Milyen az atom felépítése?

ban állította fel híres atommodelljét, amely még mai tudásunk szerint is egész jól megközelíti a valóságot.

Eszerint az atom úgy épül fel, mint egy parányi naprendszer. A Naprendszerben a jelentős tömegű Nap körül nagy távolságra keringenek a bolygók, a Merkúr, a Vénusz, a Föld, a Mars, a Jupiter, a Szaturnusz, az Uránusz, a Neptunusz és a Plútó.

Az atom felépítése is hasonló. Középpontjában található a kicsi, de nagy tömegű *atommag*. Körülötte keringenek, tőle „óriási” távolságra a piciny, könnyű részecskék, az *elektronok*. Az atommag egységnyi pozitív töltéssel, az elektron pedig egységnyi negatív töltéssel rendelkezik. Az elektronokat az elektromos vonzóerő tartja az atommag körüli pályán. A Naprendszerben pedig a gravitációs vonzóerő köti a bolygókat a Naphoz.

Azt, hogy milyen kicsi is az atommag, gyorsan tisztázhatjuk: egy vízcsepp körülbelül $6 \cdot 10^{21}$ darab atomból áll. Ha kiírjuk a nullákat, akkor ez így fest: 6 000 000 000 000 000 000 000.



Képzeld el az atommagot egy cseresznyének! Ebben a léptékben az elektronpályák akkorák volnának, mint egy labdarúgóstadion.

Bármennyire kicsi is egy atom, az atommag még nála is sokkal kisebb. A mag az atom térfogatának csupán egybilliomod ($1/1\,000\,000\,000\,000$) részét teszi ki. Ha az atommag akkora volna, mint egy cseresznye, és egy futballpálya kellős közepére tennénk, akkor az elektronjait a lelátó legfelső széksorai helyén kellene keresnünk. Bár az atommag térfogata az atom térfogatának csak billiomod része, tömege majdnem egyenlő az egész atom tömegével. Az anyag az atommagban nagyon erősen tömörített.

Ha a valóságban szeretnénk egy cseresznye méretű atommagot készíteni, akkor az legalább 30 millió tonnát nyomna, és nem maradna nyugalomban a pálya közepén, hanem a Föld középpontja felé süllyedne.

Az atommag két különböző részecskéből

Miből áll az atommag?

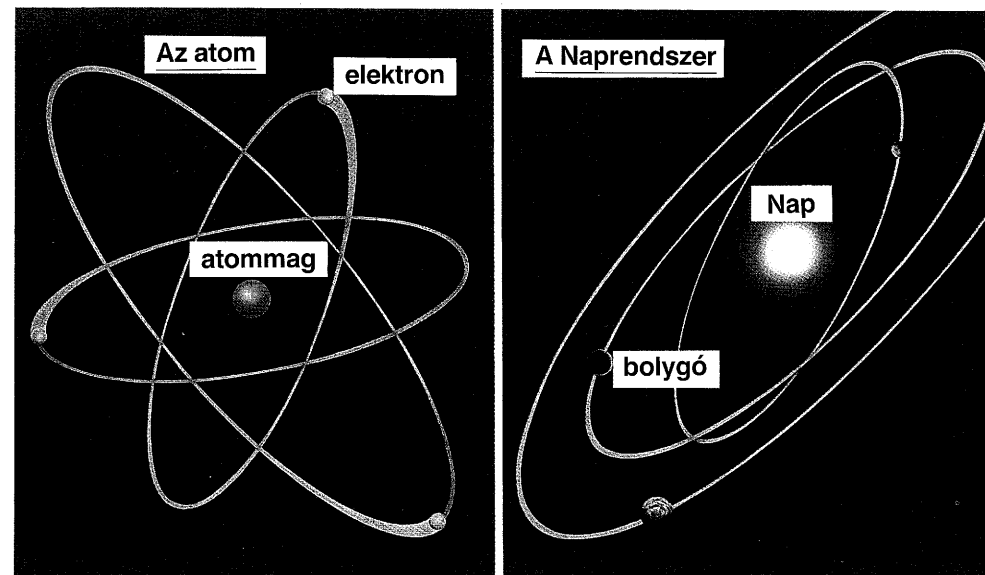
áll, *protonból* és *neutronból*. Tömegük körülbelül egyenlő. Mindkét részecske tömege körülbelül 2000-

szerese az elektron tömegének.

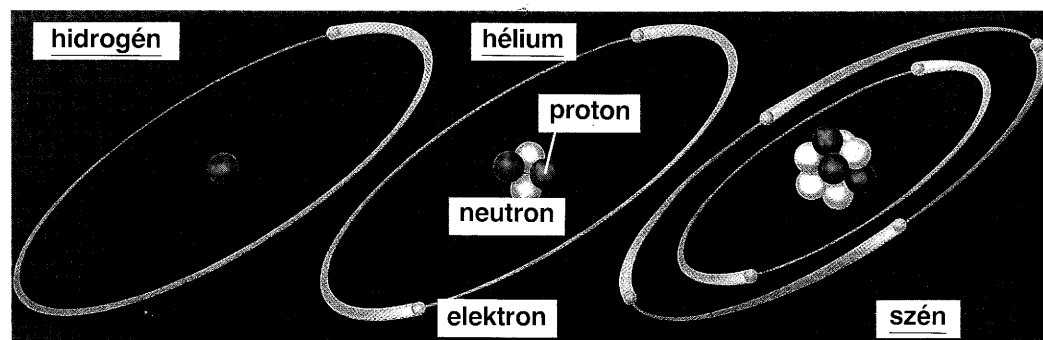
Míg a protonnak ugyanakkora nagyságú pozitív töltése van, mint a negatív töltésű elektronnak, addig a neutronnak nincsen töltése, semleges.

A protonok vagy az elektronok töltésének nagyságát elemi töltésnek nevezzük. A protonokat és neutronokat szoktuk együttes néven *nukleonoknak*, vagy magalkotórészeknek hívni.

A sokáig oszthatatlannak tartott részecskéknél, a protonoknak és a neutronoknak, szintén van belső szerkezetük: kvarkokból épülnek fel.



A Naprendszerben (jobbra) a bolygók a Nap körül keringenek. Az atomban (balra) az elektronok pedig az atommag körül. A pozitív elektromos töltéssel rendelkező mag vonzza a negatív töltésű elektronokat.



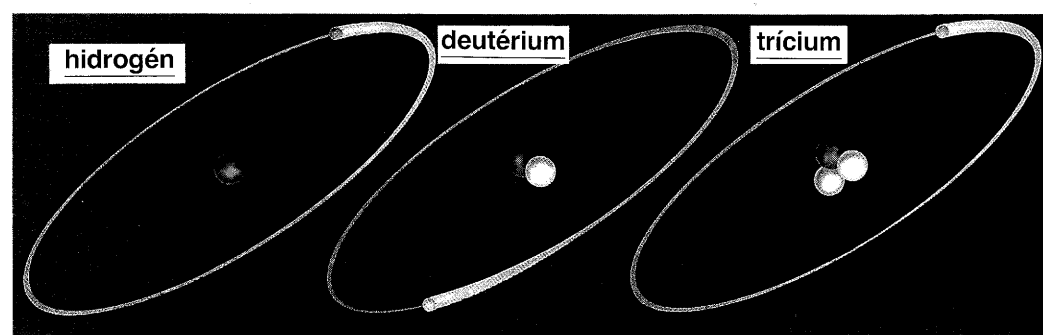
A hidrogénnek 1, a héliumnak 2, a szénnek pedig 6 protonja van a magjában. A protonokat pirossal, a neutronokat fehérrel jelöltük.

Az elemeket az különbözteti meg egymástól, hogy az illető atom magjában hány darab proton van. A hidrogénatom magjában például egy proton van, a héliumében kettő. A szénatom magja 6, az uránatom magja pedig 92 protont tartalmaz. Ha az atommagnak hat pozitív töltésű protonja van, akkor körülötte hat negatív töltésű elektron kering, tehát az atom kifelé semleges. Ha ez a bizonyos atom elveszítené egyik elektronját, akkor a hat protonjához csak öt elektron tartozna. Ez az atom többé már nem semleges, egységni pozitív töltése van. Az ilyen töltéssel rendelkező atomot nevezzük *ionnak*.

Hogyan különböztethetők meg az elemek?

Bár egy elem atomjainak ugyanannyi protonja és elektronja van, mégis lehet közöttük különbség, ha magjuk különböző számú neutronot tartalmaz. A legkönnyebb és egyben a legegyszerűbb elemnek, a hidrogénnek három különböző alakja is van. A hidrogénnek lehet nulla, egy vagy akár két neutronja is.

Mi az izotóp?



A hidrogén három izotópja: a hidrogénnek 1 protonja, a deutériumnak 1 protonja és 1 neutronja, a tríciumnak 1 protonja és 2 neutronja van.

A közönséges hidrogénnek egy protonja van, és nincsen egyetlen neutronja sem. A másik hidrogénfajtának, a *deutérium*-nak egy protonja és egy neutronja van. A *trícium* magja a hidrogénre jellemző egy proton mellett két neutronot is tartalmaz. Ezeket a különböző hidrogénfajtákat nevezzük együttesen *izotópoknak*. Fogalmazzuk meg általánosan is, hogy mit értünk izotópokon! Izotópoknak nevezzük egy bizonyos elemnek azonos számú protont, de különböző számú neutronot tartalmazó atomjait. A természetben több különböző uránizotóp is előfordul. Létezik olyan, melynek magjában 234 nukleon van, de ismerünk 235, sőt 238 nukleont tartalmazó uránmagot is. Mint korábban láttuk, az uránatomnak 92 protonja van, tehát a fent említett izotópok magjában 142 (234-92), 143 és 146 neutron található. Ezeket az izotópokat jelölhetjük egyszerűen úgy is, hogy U-234, U-235 vagy U-238. Egy atom vagy egy izotóp *tömegszámának* nevezzük a magjában található nukleonjainak számát, az atom *rendszáma* pedig a protonjainak száma. Az U-235 tömegszáma tehát 235, rendszáma 92. A deutérium tömegszáma 2, rendszáma 1.

Ismeretes, hogy két pozitív töltés taszítja egymást. A negatív töltésekkel is pontosan így áll a helyzet, viszont a pozitív és negatív töltések vonzzák egymást. Ezzel a vonzóerővel tartja a pozitív mag kötött állapotban a negatív elektront, és kényszeríti körpályára maga körül. Láttuk, hogy az atommag pozitív protonokból és semleges neutronokból áll. Ha ez így van, akkor az atommagnak egy szempillantás alatt szét kellene pukkannia, mert a pozitív protonok taszítják egymást. Hogyan lehetséges, hogy a szénatom hat protonja egy ilyen kis helyen mégis együtt tud maradni? Úgy, hogy a magban egy másik, sokkal nagyobb vonzóerő is hat a nukleonok között. Ezt az erőt *magerőnek* nevezzük. A magerő rövid hatótávolságú, csak a szomszédos nukleonok között hat.

Miért nem robban szét az atommag?

Nem minden atommag olyan stabil, mint a szén-12 (C-12) magja. Bizonyos atommagok egyszer csak „gondolnak egyet”, és nagy energiával kis részecskét lőnek ki magukból. Eközben természetesen átalakulnak egy másik elem magjává. Ezt a jelenséget hívjuk *radioaktivitásnak*. A jelenséget Henri Becquerel francia fizikus fedezte fel, a pontos megfigyeléseket pedig Marie Curie végezte el férjével, Pierre Curie-vel.

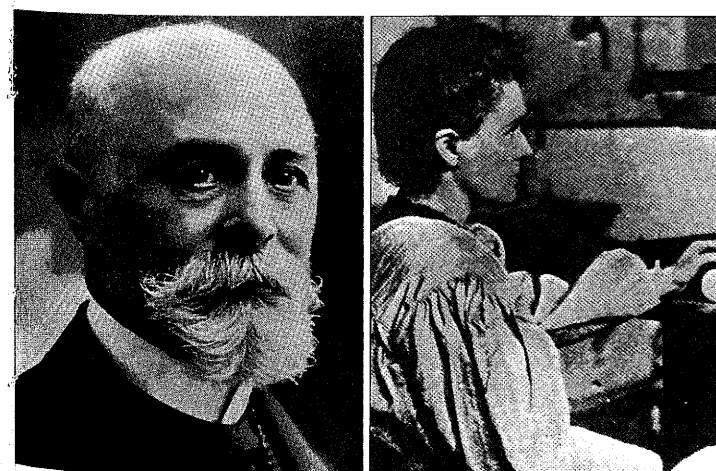
Mi a radioaktivitás?



Az alfasugárzás héliummagokból áll, a béta-sugárzásban elektronok repülnek, a gammasugárzás pedig elektromágneses sugárzás, mint a fény- vagy a röntgensugárzás.

Hosszú ideig senki sem tudta pontosan, hogy valójában mi is a radioaktivitás. Sok olyan elemet találtak, amelyek titokzatos sugárzást bocsátottak ki, s ez megfektette a fényképezőlemezt. Hosszú időnek kellett eltelnie ahhoz, hogy tudományosan is feltérképezzék ennek a sugárzásnak a természetét. Ma már tudjuk, hogy háromféle radioaktív sugárzás létezik: az alfasugárzás (így is írhatjuk: α -sugárzás), mely héliummagokból áll, a béta-sugárzás, (β -sugárzás), amelynek részecskéi elektronok, és a gammasugárzás (γ -sugárzás), amely elektromágneses sugárzás, akár a fény vagy a röntgensugárzás. A gammasugárzást a fénytől és a röntgensugárzástól az különbözteti meg, hogy részecskéinek — az úgynevezett gammakvantumoknak — sokkal nagyobb az energiája, mint a fény- vagy röntgenkvantumoknak.

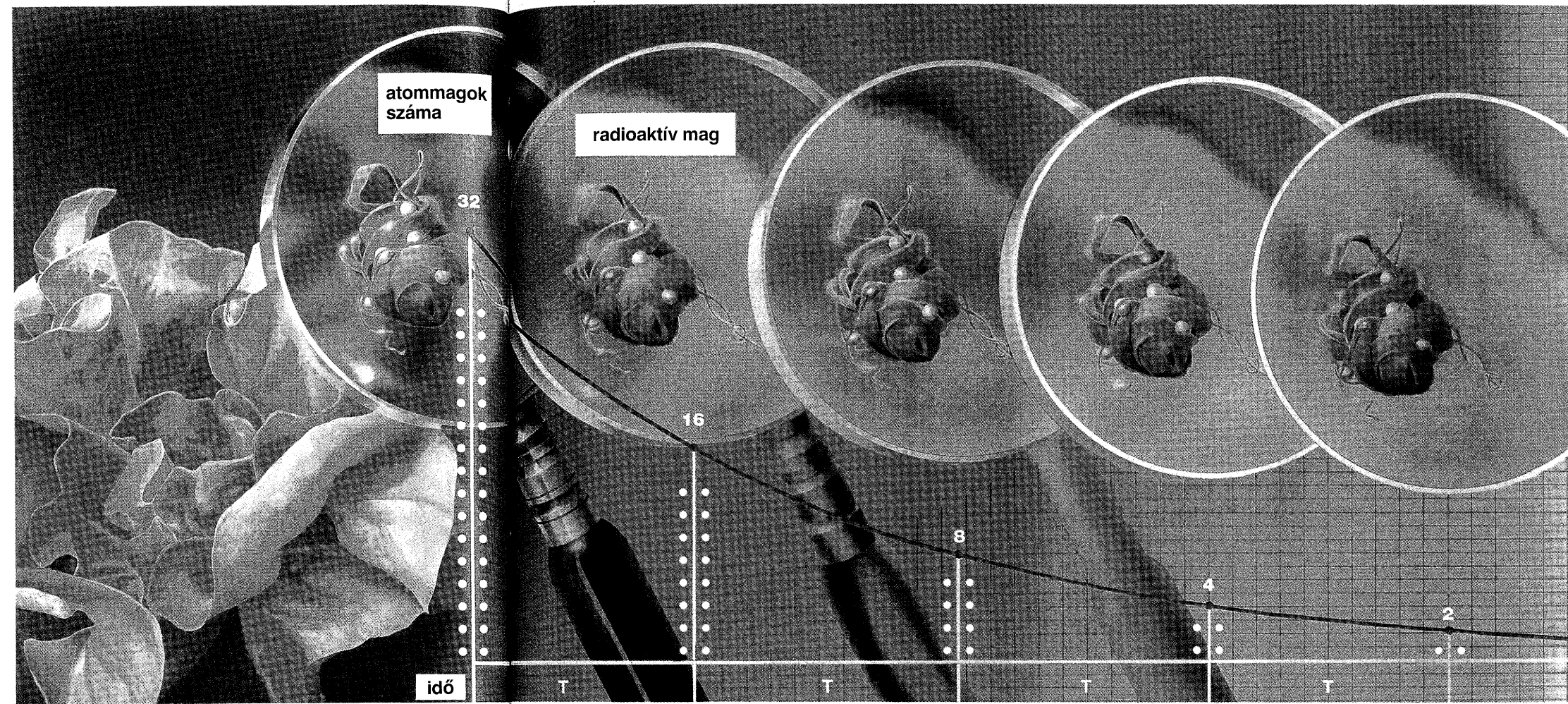
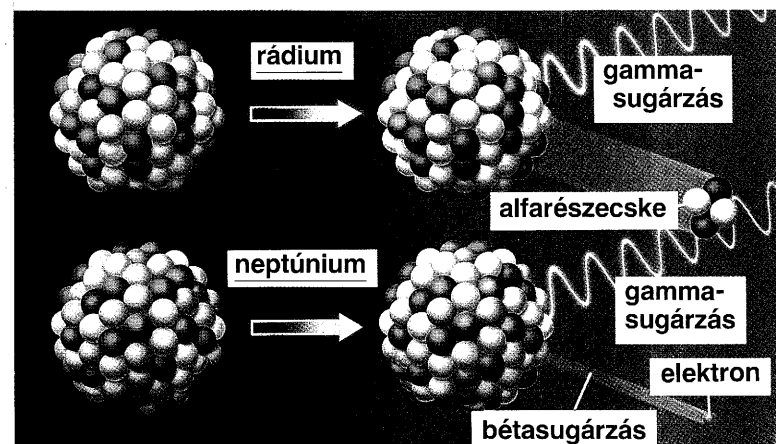
Antoine-Henri Becquerel és Marie Curie. Becquerel fedezte fel 1896-ban a radioaktivitást, a Curie házaspár pedig tovább folytatta a kutatásokat.



Hogyan bomlik az atommag?

Ahogy az előző részben láttuk, sok atommag, különösen a nehéz magok nem stabilak, elbomlanak. A radioaktív bomlás minden külső behatás nélkül, véletlenszerűen megy végbe. A rádiummag bomlása során kilök magából egy két protonból és két neutronból álló csomagocskát, az úgynevezett α -részecskét. A hátramaradó magnak kétfelével kevesebb protonja maradt, tehát többé már nem nevezhetjük rádiumnak, átalakult egy másik elemmé, radonná. Vannak olyan magok, melyek úgy bomlanak, hogy közben elektront, illetve bétarészecskét bocsátanak ki: a magban levő egyik neutron átalakul egy protonná és egy elektronná, a proton a magban marad, az elektron pedig kirepül. Mivel a mag protonszáma eggyel nőtt, magátalakulás történik. A radioaktív bomlás során gammasugárzás is keletkezik, amikor egy gerjesztett atommag egy gamma-kvantum kibocsátásával visszatér eredeti állapotába. A legnagyobb rendszámú elemek hasadásakor neutronsugárzás emittálódik. (Emisszió = kibocsátás.) Az esetek nagy részében a keletkező új mag sem stabil, ismét elbomlik, így egész bomlási sorok alakulhatnak ki. A bomlási sor végén stabil elem áll.

A rádium bomlásakor alfa- és gammasugárzást, a neptúnium pedig bétát és gammát bocsát ki. Bomláskor az atommagok más elemek magjává alakulnak át.



Senki emberfia nem tudja megjósolni, hogy

Mi a felezési idő?

mikor bomlik el egy atommag. A rádiummag elbomolhat 1 másodpercen belül, esetleg elbomolhat holnap reggel, vagy akár 10 ezer év múlva is. Egyet azonban biztosan meg lehet mondani: azt, hogy 100 ezer rádiummagból 1620 év múlva már csak 50 ezer marad, azaz a fele elbomlik. Egy U-238 darabka felének elbomlásához 4,5 milliárd év szükséges. Fogalmazzuk meg általánosan is! Egy izotóp *felezési idejének* nevezzük azt az időtartamot, ami alatt a magok száma a felére csökken. (A felezési idő elteltével az időegység alatt kibocsátott részecskék száma a felére csökken.) Jelöljük a felezési időt T-vel! Mint láttuk, az urán-238 felezési

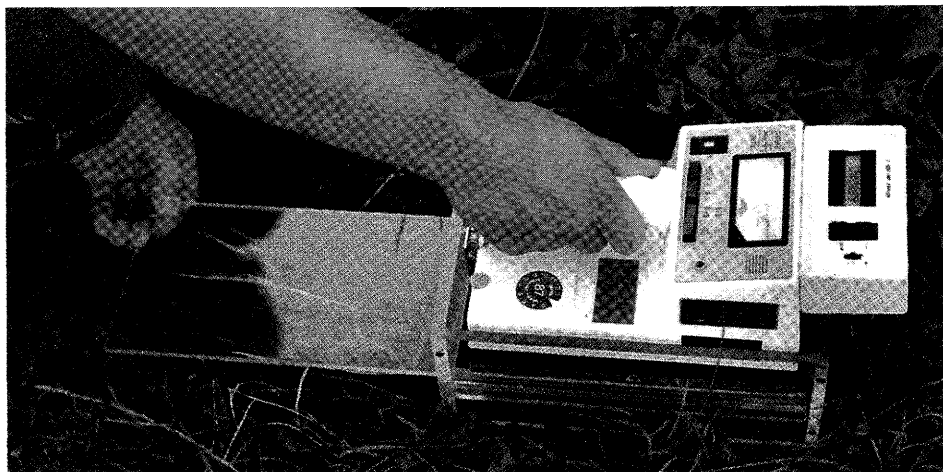
ideje 4,5 milliárd év. A polóniumé sokkal rövidebb, 138 nap, a franciumé pedig csak 21 perc. Két felezési idő letelte után még megvan a magok $\frac{1}{4}$ része ($\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} = \frac{1}{4}$), tíz felezési idő után az eredeti magok csupán $\frac{1}{1024}$ -ed része található a mintában ($\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} = \frac{1}{1024}$). Egy kilogramm rádiumból 10 · 1620 év múlva nem marad több, mint 0,98 gramm.

Egy radioaktív anyag *aktivitása* számértékben azt fejezi ki, hogy egy másodperc alatt hány atommag bomlik el. Az aktivitás mértékegysége a becquerel (Bq). (A mértékegységet a már említett tudósról nevezték el.) Ha például egy bizonyos anyagban egy másodperc

Mit nevezünk aktivitásnak és dózisnak?

A T felezési idő az az idő, ami alatt a meglevő magok száma a felére csökken. 32 millió bomlandó atommagból T idő eltelte után már csak 16 millió marad, 2T után 8 millió, 3T után pedig már csak 4 millió eredeti atommag lesz.

alatt 403 atommag bomlik el, akkor az illető anyag aktivitása 403 Bq. Régebben használták az aktivitás egy másik, ma már nem hivatalos egységét is, a curie-t (Ci). (1 Ci = $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq). A magátalakulások során az atommagból kilépő részecskéknak kisebb-nagyobb energiájuk van. Ezt az energiát, vagy ennek az energiának egy részét a besugárzott anyag elnyeli, abszorbeálja. A besugárzott anyag 1 kilogrammja által elnyelt energiát nevezzük *elnyelt dózisnak*. Az elnyelt dózis mértékegysége a gray (Gy). 1 Gy = 1 joule/kg = 1 J/kg. Régebben használatos volt a ma már szintén nem hivatalos egység, a rad (rd) is.



Aktivitás mérés
Geiger-Müller
számlálóval.

Ha az emberi test 0,01 Gy dózist kapna, hőmérséklete ennek hatására csak 0,0001 °C-ot emelkedne, ám ez a sugármenyiség az élőlényekben már jelentékeny károsodást okozhat azzal, hogy a létfontosságú molekulákat szétroncsolja. A sugárzás biológiai hatása azonban nemcsak a testsúly-kilogrammonként elnyelt energiától függ. 1 Gy alfasugárzás például hússzor veszélyesebb, mint 1 Gy béta-, vagy gammasugárzás. Ennek alapján be kellett vezetni egy új fizikai mennyiséget, a *dózisegyenértéket*, amely figyelembe veszi, hogy a különböző sugárfajták más-más hatást gyakorolnak az élő szervezetre. A dózisegyenérték mértékegysége a sievert (Sv). 1985-ig egy másik egység, a rem is érvényben volt. 1 rem = 10^{-2} Sv. Régebbi magfizika könyvekben ezzel az egységgel találkozhatunk. 20 Sv α -sugárzás megfelel 1 Gy α -sugárzásnak, viszont 20 Gy β -, vagy γ -sugárzással egyenértékű.

Aktivitás	=	$\frac{\text{bomlások száma}}{\text{idő}}$
egysége: 1 Bq	=	$\frac{1 \text{ bomlás}}{1 \text{ másodperc}}$
Elnyelt dózis	=	$\frac{\text{elnyelt energia}}{\text{tömeg}}$
egysége: 1 Gy	=	1 J/kg
Dózis egyenérték	=	biológiai hatást is figyelembe vevő elnyelt dózis
egysége: 1 Sv	=	1 J/kg

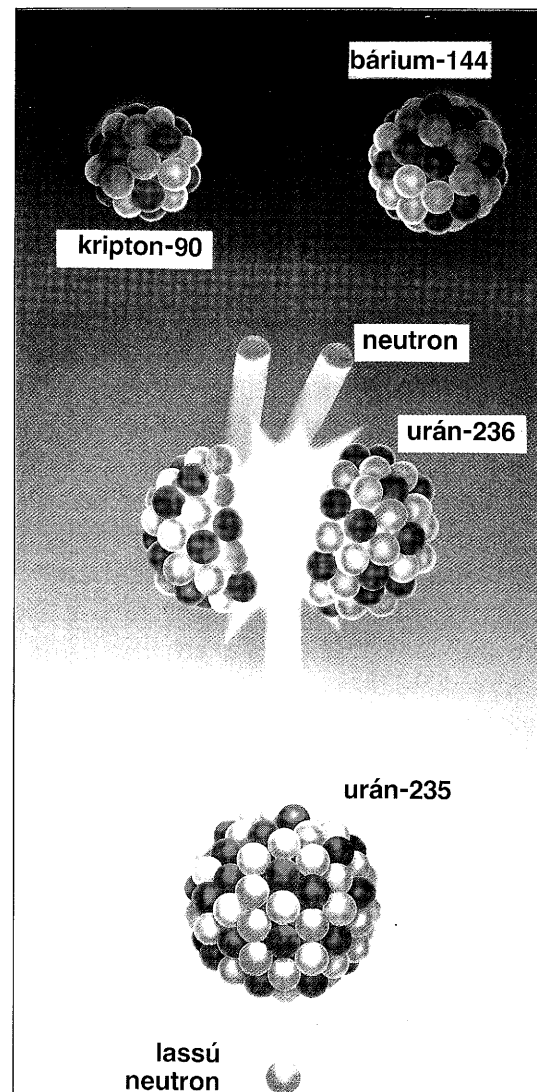
Eddig olyan atommagokkal ismerkedtünk meg, melyek maguktól estek szét, bomlottak el. 1938-ban Otto Hahn és Fritz Straßmann újabb izgalmas felfedezést tett. Urán atommagokat bombáztak neutronokkal, és megállapították, hogy néhány uránmag szétesett két, megközelítőleg egyenlő nagyságú darabra. A technikai részletekkel itt most nem tudunk foglalkozni, a lényeg az, hogy egyes, nem radioaktív magok, melyek maguktól képtelenek elbomlani, széthasadhatnak, ha neutronnal bombázzuk őket.

A neutronok elektromosan semleges részecskék, ezért használhatjuk jól mesterséges magátalakulások keltésére, és atommagok hasítására. A pozitív töltésű proton erre teljesen alkalmatlan, mert — lévén a bombázott célmag protonjai is pozitív töltésűek — a bombázó részecskéket taszítják, így a protonok viszszafordulnak, illetve eltérülnek, mielőtt a maghoz eléggé közel tudnának kerülni. Az elektronok túl könnyűek ahhoz, hogy a célmagban valami kárt tegyenek, nem is beszélve arról, hogy az atom elektronburka taszítja a negatív töltésű elektronokat. A semleges neutron azonban minden szempontból megfelel a maghasadáshoz.

Hogyan hasítható szét az atommag?

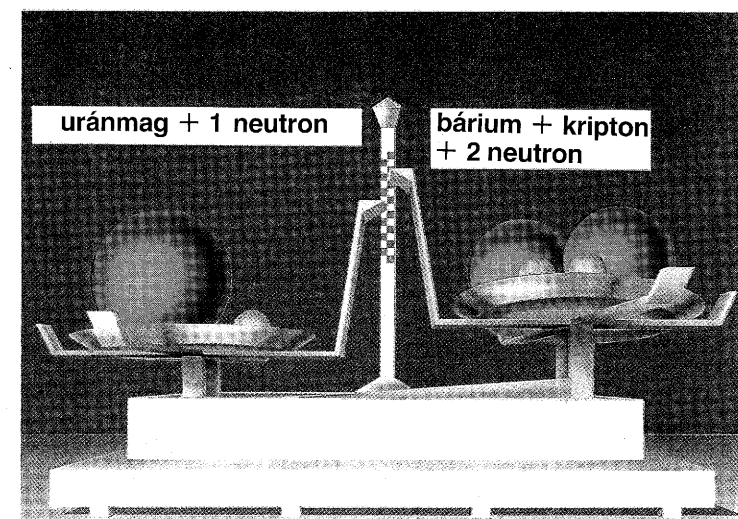
Miért hasad jól a mag, ha neutronnal bombázzuk?

Megfigyelték, hogy az atommag sokkal gyakrabban fogja be a lassú neutronokat, mint a gyorsakat. Egy fizikus egyszer humorosan megjegyezte, hogy a gyors neutron olyan nagy sebességgel rohan el a mag mellett, hogy „még csak meg sem tudja rendesen mustrálni”. A lassú neutron, vagy ahogy másképp is mondjuk: a termikus neutron hosszabb ideig tartózkodik az atommag közelében, így több ideje marad arra, hogy reakcióba lépjen vele. A lassú neutron a megszokott hétköznapi sebesség-fogalmunkhoz képest még mindig eléggé gyors, sebessége megközelítőleg 2,2 km/s (7920 km/óra). Neutronnal nemcsak maghasadást lehet előidézni, hanem a mag mesterséges átalakítását is, egy másik elem magjává, ha a bombázó neutron a magba befogódik, majd valamelyik bomlással átalakul.



A természetes urán háromféle izotópot tartalmaz, U-234-et, U-235-öt és U-238-at. Ezer uránmag közül 993 U-238-as mag, hét pedig U-235-ös.

Az U-234 olyan kis százalékban fordul elő, hogy nem érdemes vele foglalkoznunk. Lassú neutronok hatására csak az U-235-ös hasad. A neutron behatol a magba, létrejön egy úgynevezett köztes mag, az U-236-os. Ez a mag nem stabil, hanem például egy kripton-90-es maggá és egy bárium-144-gyé hasad ketté. A hasadáskor melléktermékként még két szabad neutron is keletkezik. És íme, elérkeztünk ahhoz a nagy felfedezéshez, ami az emberiségnek az atomenergiát, és sajnos az atombombát is adta: maghasadáskor a hasadási termékek együttes tömege kisebb, mint a célmag és a neutron tömegének összege.



A célmag és a bombázó neutron együttes tömege valamivel nagyobb, mint a hasadási termékek tömegének összege. A hiányzó tömeg alakul át energiává.

A lassú neutronok két könnyebb magra hasítják az U-235 magot, bárium-144-re és kripton-90-re. A folyamat során keletkezik még két szabad neutron. A törmelékek nagy energiával repülnek szét.

Úgy tűnik, mintha egy kevés tömeg elveszett volna. Ezt tömegdefektusnak, tömeghiánynak szokták nevezni. Azonban nem ez történt. A tömeg Einstein $E = mc^2$ formulájával kiszámítható energiává alakult át. A nagy magot összetartó kötési energia egy részével egyenértékű tömeg „veszett el”. (A kötési energia egy atom vagy atommag alkotórészeire bontásához szükséges energia. A tömeghiány pedig a kötési energia egyenértéke.)

Foglaljuk össze: maghasadáskor nagy energia szabadul fel. Egy gramm uránból 23 ezer kWh energiát lehet nyerni. Maghasadáskor az is előfordul, hogy három szabad neutron keletkezik. Az U-236-os köztes mag úgy is elhasadhat, hogy a bárium-144 és kripton-89 mellett három neutron keletkezik. A keletkező középnehéz magok rendszerint nem stabilak, hanem veszélyes radioaktív sugárzást bocsátanak ki. (Erre még a későbbiekben visszatérünk, amikor az erőművekről esik szó.)

Az U-238 hasításához nagyon gyors neutronokra van szükség. Bár a lassú neutronok ebbe a magba is behatolnak, de ott befogódnak, és U-239-es mag keletkezik. Ez a mag egy közbenső lépcsőfokon keresztül átalakul plutónium-239-cé, ami már lassú neutronokkal ismét jól hasítható.

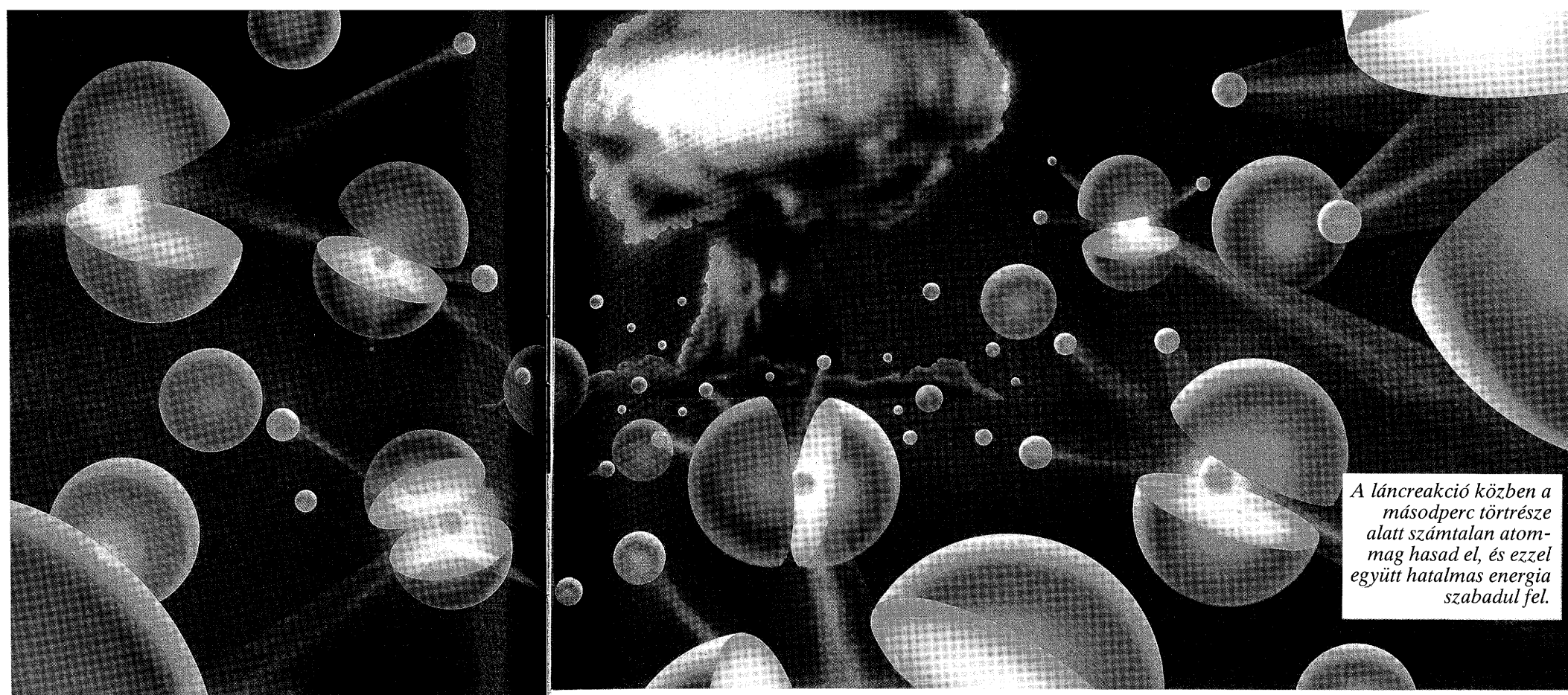
Egy nagy darab urán- vagy plutónium-tömbben a következő folyamat játszódik le, ha neutronnal bombázzuk: Egy lassú neutron hatására

Mit nevezünk láncreakciónak?

a tömbben valahol elhasad egy atommag. A hasadási termékek között két vagy három neutron is keletkezik. Ezek a neutronok — példánkban legyen most kettő — két újabb atommagot hasítanak el, ahol mondjuk ösz-

szesen öt neutron keletkezik. Ha ezekből négy ismét eltalálja a szomszédos atommagokat, és ezeket a magokat el is hasítják, akkor újabb 8–12 neutron keletkezik. Ezek, ha bizonyos veszteségektől eltekintünk, ismét hasítanak, melynek során hatalmas energia szabadul fel. Most már 20 neutron keletkezik, melyek ismét magokba ütköznek, és így tovább. A másodperc tötrésze alatt lavinaszerűen megnő az elhasított magok száma, és ezzel együtt lavinaszerűen nő meg a felszabaduló energia is. Ezt a folyamatot nevezzük *láncreakciónak*.

A láncreakció fent leírt formája jön létre az atombomba robbanásakor. Ahhoz, hogy a láncreakció végbemenjen, szükséges, hogy valamennyi hasadóanyag együtt legyen. A láncreakcióhoz szükséges minimális hasadóanyag-mennyiséget nevezzük *kritikus tömeg*-nek. Az urán-235-ös esetében a kritikus tömeg körülbelül 23 kg, ami egy 13 cm átmérőjű golyónak felel meg.



A láncreakció közben a másodperc tötrésze alatt számtalan atommag hasad el, és ezzel együtt hatalmas energia szabadul fel.

Ha a kritikus tömegnél kevesebb hasadóanyag van együtt, az uráncsomó felületén túl sok neutron szökik ki anélkül, hogy hasítana. Szerencsés esetben a láncreakció szabályozható, és pedig úgy, hogy másodpercenként csak meghatározott számú hasadást engedünk meg. Ilyesmi játszódik le az atomreaktorban is, amint azt egy későbbi fejezetben látni fogjuk.

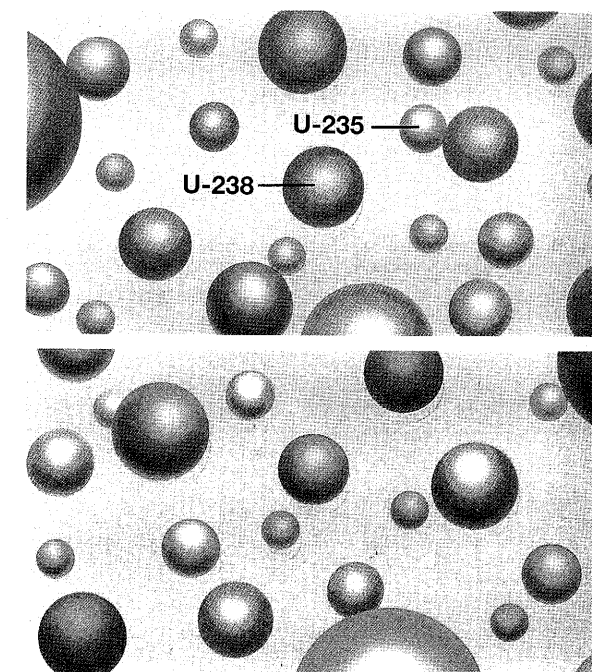
A természetes uránban normális esetben

Miért kell az uránt dúsítani?

nem indul be a láncreakció, mert az U-238 aránya nagyobb 99 százaléknál. Az a két vagy három neutron, ami a maghasadáskor keletkezik, rendszerint gyors ahhoz, hogy egy U-235 magot elhasítson, és lassú ahhoz, hogy az U-238-as magot szétroncsolja. Ezeket a neutronokat az esetek többségében az U-238-as magok befogják.

Egy egyszeri, véletlen maghasadás bizo-

A dúsított urán nagyobb arányban tartalmazza az U-235 izotópot. Az U-238 magot kék, az U-235-öt piros színnel jelöltük.



lassítani. A Paksi Atomerőműben használható nukleáris üzemanyagban az U-235 tartalmat 0,7 százalékról 3-4 százalékra kell növelni. Ezt a folyamatot nevezzük *dúsításnak*.

A 3-4 százalékra feldúsított nukleáris üzemanyag önmagában kevés a láncreakcióhoz, mert a hasadási folyamat során keletkező neutronok túl gyorsak.

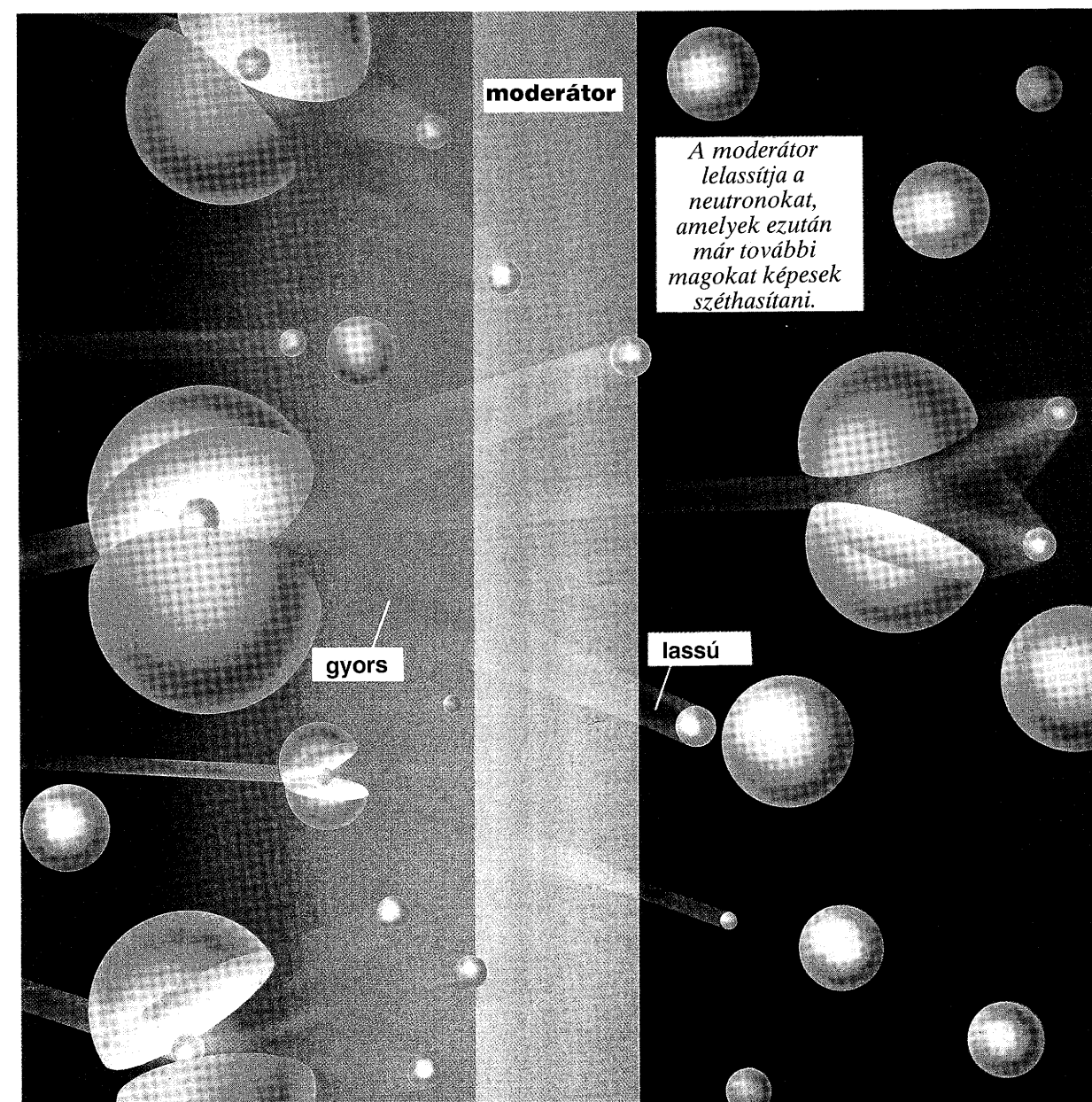
Mi a neutron-lassító, vagy más néven moderátor?

A gyors neutronokat a még mindig számbeli fölényben levő U-238 magok befogják, mert a legtöbb U-235 mag mellett elrepülnek anélkül, hogy azokban „bármilyen kárt tennének”. Az U-235 magok hasadásához lassú neutronokra van szükség. Sze-

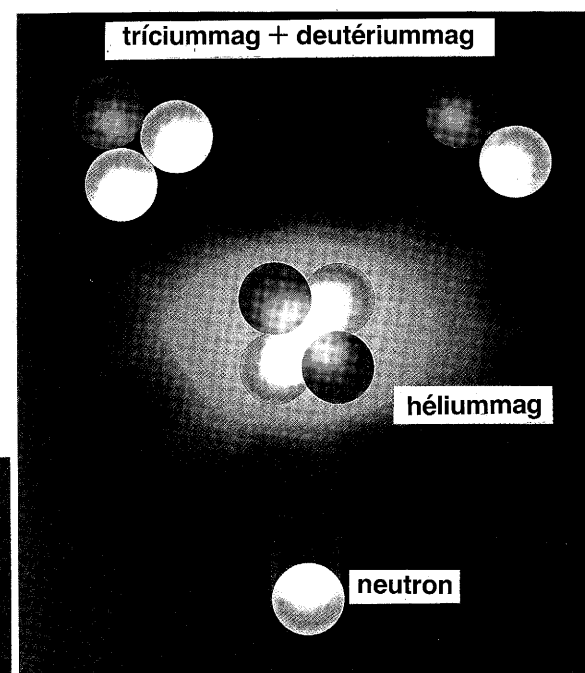
rencsére vannak olyan anyagok, melyekkel a neutronok lefékezhetők. Ezeket hívjuk *lassító anyagoknak*, vagy *moderátoroknak*. Ilyen például a grafit. Ha az uránt tartalmazó rudakat grafitral vesszük körbe, az uránrudakból kilépő, gyors neutronok áthaladva rajta lefékeződnek, s így most már elhasíthatják az U-235-ös magokat. A szénen kívül jó lassító anyag még a berillium, a víz és a nehézvíz (D_2O).

Az atommagban rejtőző energia előcsalogatására ismerünk egy másik módszert is. Ha a deutérium- és a tríciummagot nagyon magas nyomáson és hőmérsékleten összepréseljük, belőlük

Mi a magfúzió?



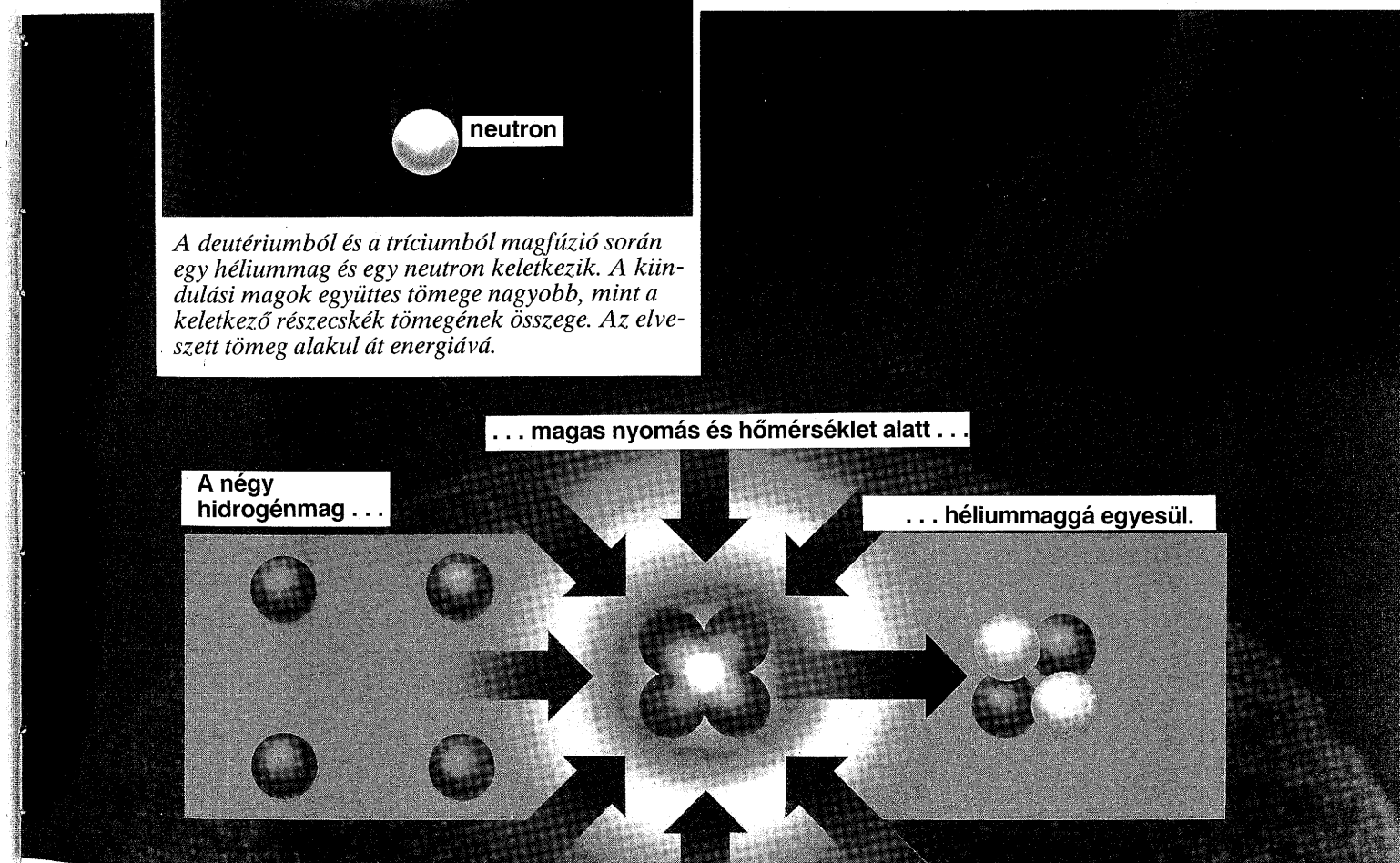
egy héliummag és egy neutron keletkezik. A két új részecske tömege együttesen valamivel kevesebb, mint a kiindulási magok tömegének összege. A hiányzó tömeg alakul át óriási energiává, éppen úgy, ahogyan azt már a maghasadás esetében is láttuk. Ezt a folyamatot nevezzük *magfúzió*-nak. Az atommagfúzió olyan atommagreakció, amelyben a könnyebb atommagok energiaszabadulás közepette nehezebb atommagokká egyesülnek. A hidrogénbomba, a csillagok egy része és a mi Napunk is ilyen módon termeli az energiát.



A deutériumból és a tríciumból magfúzió során egy héliummag és egy neutron keletkezik. A kiindulási magok együttes tömege nagyobb, mint a keletkező részecskék tömegének összege. Az elveszett tömeg alakul át energiává.

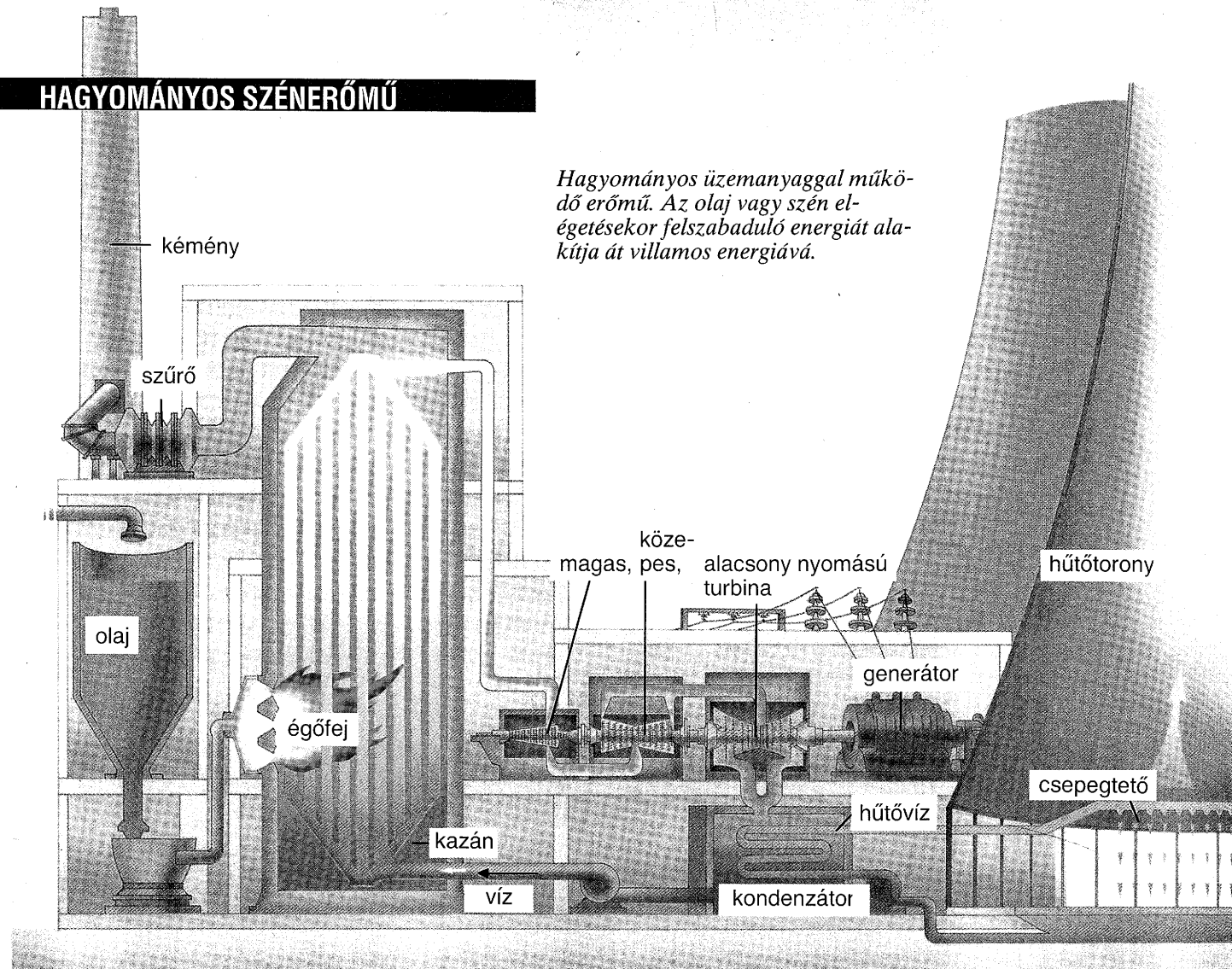
Nézzük meg kicsit leegyszerűsítve, hogy milyen folyamat megy végbe a Napban! A Nap belsejében uralkodó magas, 200 milliárd atmoszféra nyomáson és 15 millió fok hőmérsékleten négy hidrogén atommag egy héliummaggá egyesül. A héliummagnak valamivel kisebb a tömege, mint építőelemei együttes tömege. Az „elveszett” tömeg hatalmas energiává alakul át. Minden másodpercben a Nap 564 millió tonna hidrogént „éget” el, ebből 560 millió tonna hélium keletkezik. A hiányzó 4 millió tonna, az üzemanyag 0,7 százaléka, mind energiává alakul át. A Nap teljes sugárzási teljesítménye $3,85 \cdot 10^{23}$ kW, vagy másképp 385 000 000 000 000 000 000 kW. A felszínének egy négyzetmétere által kisugárzott teljesítménye 63 233 kW. Ez a leadott teljesítmény megfelel mintegy 63 000 villanykályha vagy nagyjából egymillió izzólámpa teljesítményének.

Honnan szerzi a Nap az energiáját?



HAGYOMÁNYOS SZÉNERŐMŰ

Hagyományos üzemanyaggal működő erőmű. Az olaj vagy szén elégetésekor felszabaduló energiát alakítja át villamos energiává.



A jelen és a jövő atomerőművei

Az erőművek feladata a villamos áram, a villamos energia előállítása. Az erőművek többsége úgy működik, hogy a fűtőanyag elégetésével hőt fejleszt, majd ezt alakítja elektromos energiává. A hagyományos tüzelőanyaggal működő erőműben az olajat, a szenet vagy a földgázt egy hatalmas, közelítőleg 100 m magas kazánban égetik el. Itt a hő hatására a víz felmelegszik, majd gőzzé alakul. A kilépő, $170 \cdot 10^5$ Pa nyomású, 530°C hő-

Mi az erőmű?

mérsékletű gőzt a *turbinákhoz* vezetik. A gőzturbina a gőzgépek családjába tartozik. A gép karvastagságú tengelyén lapátok vannak. Ha a lapátokra nagy nyomású gőzt vezetnek, a gőz lapátokra ható ereje forgásba hozza a tengelyt. A szerkezet nagyon hasonlít a szélmalom kerekéhez, amit a szél ereje forgat. Az áramot a turbinákkal közös tengelyen levő *generátor* termeli. A generátor a kerékpár dinamójához hasonlóan működik, de vele ellentétben váltóáramot állít elő. Az erőművi generátor teljesítménye akár 1000 MW is lehet, ami elég egy egész város áramellátásához.

A termelt elektromos áramot transzformátorokon és kapcsolókon keresztül vezetik a hálózatba.

Miután a gőz a turbináknak átadta az energiáját, lehűl és nyomása lecsökken. Ahhoz, hogy a fáradt gőzt újra hasznosítani lehessen, ismét vízzé kell alakítani. Ezt a feladatot látja el egy lecsapató berendezés, a *kondenzátor*. A fáradt gőzt vízzel hűtött csövek közé vezetik, ahol még tovább hűl, lecsapódik, és a végén víz lesz belőle. Az így kapott vizet azután visszapumpálják a kazánba. Természetesen eközben a hűtővíz felmelegszik 25°C -ról 35°C -ra. A felmelegedett hűtővizet a *hűtőtoronyokba* vezetik, ahol kis cseppek alakjában szétpermetezik. A cseppek a toronyban lefelé esve lehűlnék, s felmelegítik a torony belsejében a levegőt. A meleg levegő felszáll, a toronyban erős huzat keletkezik, akár csak egy hangulatos nappali szoba kandallójában. A lehűlt vízcseppek azután a torony aljában összegyűlnek, és így a vizet vízszaszivattyúzhatják a kondenzátorba.

A hűtőtoronyban a víz egy része elpárolog, a felfelé szálló légáramlat magával ragadja, és a torony felett kis felhő keletkezik. Egy 1300 MW-os erőműben másodpercenként egy köbméter víz párolog el, amit egy közeli folyóból pótolni lehet. Kedvező esetben nincs szükség hűtőtoronyra, a folyó vagy a tenger vizét közvetlenül lehet hűtésre használni.

Az atomerőműben a gőzt nem a hagyományos tüzelőanyagok elégetése révén állítják elő, hanem az atommag hasadásakor felszabaduló magenergia segítségével. A kazán helyébe egy *atomreaktor* kerül. Az atomreaktor olyan berendezés, melyben a láncreakció szabályozottan megy végbe, azaz csak annyi atommaghasadás történik benne, amennyi az áramtermeléshez szükséges.

Forralóvízes reaktorral fűtött erőmű. A gőzt nem a szén elégetésével, hanem magenergiával állítják elő.

