

**AZ ENERGIAFOGALOM
ÉS TANÍTÁSÁNAK NÉHÁNY MÓDSZERTANI PROBLÉMÁJA**

Doktori disszertáció

Kövesdi Katalin

főiskolai tanársegéd

1982



TARTALOMJEGYZÉK

	Oldal
BEVEZETÉS	1
I. AZ ENERGIAFOGALOM KIALAKULÁSÁNAK RÖVID ÁTTEKINTÉSE	12
II. A FIZIKAI FOGALMAK DEFINÍCIÓJA	17
III. AZ ENERGIAFOGALOM A MAI FIZIKÁBAN	21
1. Extenzív és intenzív mennyiségek	21
2. Távolhatás, közelhatás	22
3. A fizikai mezőkről	24
4. A relativisztikus mechanika energia- fogalma	33
IV. A MUNKA ÉS AZ ENERGIA KAPCSOLATA	48
V. KÖLCÖNHATÁSI ENERGIA - POTENCIÁLIS ENERGIA	52
VI. A BELSŐ ENERGIA. A BELSŐ ENERGIA MEGVÁLTO- ZÁSA; A HŐMENNYISÉG	67
VII. A MECHANIKAI ENERGIA MEGMARADÁSÁNAK TÉTELE	74
VIII. AZ ENERGIA, ÉS AZ ENERGIAVÁLTOZÁS TANÍTÁ- SÁNAK NÉHÁNY MÓDSZERTANI PROBLÉMÁJA	77
IX. AZ ENERGIA TANÍTÁSA A MAI ÁLTALÁNOS ISKO- LÁKBAN	83
X. AZ ENERGIA KÖZÉPISKOLAI OKTATÁSÁRÓL	105
ÖSSZEFOGLALÁS	123
JELÖLÉSLISTA	125
IRODALOMJEGYZÉK	126



BEVEZETÉS

A fizikaoktatás tartalmi és módszertani kérdései a hatvanas években kerültek világszerte az érdeklődés középpontjába. Ez elsősorban a fizika XX. században bekövetkezett robbanásszerű fejlődésének, az alapvetően új ismeretek felfedezésének a következménye. A századforduló táján kialakult új kutatási területek /relativitáselmélet, kvantummechanika, atommag-fizika, szilárdtest-fizika, stb./ kutatási eredményei gyökereiben megváltoztatták természettudományos szemléletünket. Ugyanakkor az iskolai fizikaoktatás - jelentős tartalmi és módszertani változások ellenére is - elsősorban a XIX. században fontosnak tartott tényanyagot tartalmazta. A gyakorlatilag a XIX. századi fizika szemlélete alapján oktatott iskolai fizika és a XX. századi fizikatudomány között egyre nőtt a szakadék. Ez a szakadék e század derekára olyan mélylyé vált, hogy nem lehetett tovább halogatni a megoldás megkísérlését. Először az új részecseknek a régi anyagba való kapcsolásában vélték megtalálni a megoldást, ez azonban nem vezetett eredményre. Ennek okait a következőkben foglalhatjuk össze:

- a/ az új anyagok beépítése nem változtatott azon, hogy bizonyos részismeretek már túlhaladtak, gyakran tévesek voltak, s az új eredmények ismertetésekor sokszor a régi anyagban tanultaknak ellentmondó tények kerültek napvilágra,

b/ a régi anyag szemléletmódja, lényegmegítélése, szóhasználat nem volt összeegyeztethető az új ismeretekével,

c/ a rohamosan növekedő mennyiségű anyag a régi, szelektálás nélküli ismeretekkel együtt a tanulók túlterheléséhez vezetett.

Rá kellett jönni, hogy a megoldást új utakon kell keresni. Az iskolában oktatott fizikát nem mennyiségének növelésével kell megváltoztatni, hanem elsősorban szemléletmódját, és ennek megfelelően tartalmát és módszereit kell új alapokra helyezni. Ez a felismerés volt a 60-as években meginduló fizikaoktatás reformjának a kiindulópontja. Ezt segítette a modern technikai fejlődés is, mivel számos munkafolyamat megfelelő szintű végzéséhez több és alaposabb természettudományos alapot igénylő technikai ismeretre volt szükség. Ezek a jelenségek egyre sürgetőbbé tették a tananyag és az oktatási módszerek felülvizsgálatát. Ennek érdekében az Amerikai Egyesült Államokban 1956-ban létrehozták a Fizikai Tanulmányi Bizottságot, amelynek az volt a feladata, hogy kidolgozza a korszerű fizikaoktatás tervének és oktatásának programját. Ezután az UNESCO kezdeményezésére nemzetközi konferenciák sora követte egymást: 1958-ban az Egyesült Államokban, 1960-ban Párizsban, 1963-ban Rio de Janeiróban, 1965-ben Londonban, 1968-ban Várnában és Eindhovenben, 1970-ben Egerben. Ezek a konferenciák lehetőséget biztosítottak arra, hogy a természettudomány, ezen belül a

fizika korszerű oktatásának lehetséges tartalmi és módszertani kérdéseit megvitassák, ajánlásokat és javaslatokat tessenek.

Az elmúlt két évtized alatt igen sok országban, így hazánkban is megindult a korszerű fizikaoktatás tartalmi és módszertani kérdéseinek kutatása és ezek kísérleti megvalósítása. 1972-ben született meg az MSZMP Központi Bizottságának oktatáspolitikai határozata, amely - többek között - az oktatómunka javításával, tartalmi és módszertani korszerűsítésével, a tanulók túlterhelésével foglalkozik. Feladatként szabja meg, hogy a tananyagot a 70-es évek második felében a korszerűsítési kísérletek lezárásával módosítani kell, illetőleg újjal kell felváltani. Ezen feladat elvi irányítását és megoldását vállalta a Magyar Tudományos Akadémia. A konkrét munkák elvégzését egy elnökségi szintű bizottságra, az Elnökségi Közoktatási Bizottságra /EKB/ bízta. 1973-ban megalakult az EKB, és egyidejűleg létrehozta három albizottságát a matematika, a természettudományok, illetőleg a társadalomtudományok gondozására. Az albizottságok programjába nem besorolható területek problémáinak megoldására menetközben külön munkacsoportok létesültek. E szervek a beindított munka addig elért eredményeiről, továbbá a munka irányának ismertetése és megvitatása céljából több országos konferenciát tartottak hazánkban /1974, 1975 Nyíregyháza/. 1973. és 1976. közötti mun-

kájuk eredményét "A Magyar Tudományos Akadémia állásfoglalásai és ajánlásai a távlati műveltség tartalmára és az iskolai nevelőtevékenység fejlesztésére" [47] című dokumentumban tették közzé 1976. júniusában.

Az oktatás korszerűsítését, az ezzel kapcsolatos kísérleteket, valamint az egyes szaktárgyak egybehangolását általános iskolai és középiskolai akadémiai szakbizottságok irányították 1981. nyaráig. Az eddig végzett kutatás és kísérleti munka eredményeként 1978. szeptembere óta új, korszerű fizikaoktatás folyik a magyarországi általános iskolákban.

Az Oktatási Minisztérium 1978-ban kiadott általános iskolai fizika tantervében célként jelöli meg azt, hogy a fizika tanítása vezesse be a tanulókat a mozgó anyag általános sajátosságainak és törvényszerűségeinek megismerésébe; járuljon hozzá a tanuló korszerű, dialektikus materialista, természettudományos műveltségének megalapozásához; tegye képessé a tanulókat ismereteik gyakorlati alkalmazására. El kell sajátíttatni a tanulókkal azokat az alapvető mechanikai, hőtani, fénytani, elektromosságtani ismereteket, amelyek részét képezik a korszerű természettudományos alpműveltségnek, és megfelelnek a tanuló fejlettségi szintjének. A tananyag feldolgozásának középpontjába a kölcsönhatások, valamint az energia és az energiaátalakulások vizsgálatát kell állítani. Ahol csak lehetséges, tisztázni kell a megismert jelenségek anyagszerkezeti magyarázatát.

Az energia fogalmának, az energiamegmaradás törvényének központi szerepe az új általános iskolai fizikaoktatásban nem szorul külön magyarázatra, hiszen az energia mindennapi életünk egyik legáltalánosabb fogalma, az energia megmaradásának törvénye pedig a különböző tudományokat átható legalapvetőbb törvény.

A kölcsönhatás központi szerepét a következő tények indokolják:

- 1/ A valóságban végbemenő folyamatok, változások mindig anyagnak anyagra gyakorolt hatása közben jönnek létre. Ez a hatás mindig kölcsönhatás, amelynél a partnerek mindig közvetlenül érintkeznek, és mindegyik partner állapota megváltozik. A kölcsönhatásban lévő anyag állapotának megváltozását a partnereket jellemző állapotváltozók /sebesség, térfogat, hőmérséklet, impulzus, energia, stb./ változásai jelzik. Az extenzív mennyiségekre érvényes megmaradási tételek alapján az egyik partner állapotának változásából következtethetünk a többi partner együttes állapotváltozására. A természetben végbemenő változások kölcsönhatás alapján történő vizsgálata a legáltalánosabb vizsgálat.
- 2/ A kölcsönhatások vizsgálata szükségszerűen és éppen ezért erőltetés nélkül vezet el a mezők létezéséhez, az anyag azon formájának megismeréséhez, amely nélkül

a természetben végbemenő változások igen nagy részéről nem tudunk még megközelítő pontossággal sem beszélni. Viszont az anyag áthatolható formájának elemi ismeretével is számos jelenség - lényegét tekintve - pontosan és helyesen értelmezhető már az általános iskolában is.

- 3/ Mivel a kölcsönhatások vizsgálata elősegíti a lényeges összefüggések észrevételét, így már kezdeti fokon is olyan természettudományos /dialektikus/ szemléletmód megalapozását adja, amely szemléletmód nagyfokú segítséget jelent a tanulóknak nemcsak a szorosan vett természeti, hanem egyéb jelenségek megértésében, helyes elemzésében is. A későbbi tanulmányok során e dialektikus szemléletmód jól hasznosítható és mélyíthető.

Az 1978-as reform előtt tanított fizika és a többi természettudományos tantárgy tantervei nem használták ki eléggé a tantervi koncentráció lehetőségeit, holott a koncentráció régóta ismert és elvárt pedagógiai elv. Ennek oka többek között az volt, hogy az egyes természettudományos tárgyak elszigetelten, külön-külön kísérelték meg sajátos céljaik elérését, szem előtt tévesztve azt, hogy tulajdonképpen az egységes természetet kívánják megismertetni egy-egy sajátos oldalról történő megközelítéssel. A természettudományos tárgyak ezen szétagoltságát kívánta az MTA EKB megszüntetni azzal, hogy meghírdette ezen

tárgyak összehangolt oktatását. Az összehangolás mindenekelőtt a természettudományi tárgyak oktatásának egységes célkitűzését igényelte. Ezt az a dokumentum, amelyben az MTA EKB ajánlásait közzétette, a következőkben fogalmazta meg [47]:

" A TERMÉSZETTUDOMÁNYOS NEVELÉS CÉLJA

A természettudományos nevelésnek biztosítania kell a következő célok megvalósítását:

- Az egységes természet és az azt vizsgáló természettudományok iránti érdeklődés.
- A világ természettudományos megismerési módszerének elsajátítása.
- Az anyag mozgásában, változásában megnyilvánuló általános elvek ismerete.
- Tájékozódás a világban /a természeti és technikai környezetben/ a természettudományos megismerés módszerével az egyetemes elvek alapján.
- Áttekinthető természettudományos világnézet megalapozása; a természettudomány hozzájárulása a dialektikus materialista világnézet kialakításához. "

Az egybehangolás megköveteli, hogy a természettudományi tárgyak összetettségük foka szerinti sorrendben kövessék egymást az oktatás rendjében. Ennek megfelelően a "legegyszerűbb" természettudomány, a fizika nyissa meg a természettudományok ta-

nitásának a sorát. A fizikát a kémia, majd ezt a biológia kövesse. /A szigorú egymásutániség a gyakorlatban nem valósítható meg, csupán a tárgyaknak az oktatás rendjébe való ilyen bekapcsolódási sorrendje biztosítható./ Az egybehangolás egyik elve: a természettudományokban általánosan használt fogalmak abban a tárgyban kerüljenek bevezetésre, amely tárgynak szorosan vett anyagát képezik. Így például az energia, az elektromos töltés, a tömeg, stb. fogalma a fizikában vezetésre kerül, s a már - szakmailag helyesen kialakított - megismert fogalmakat használja, bővíti a többi természettudomány. Ez az elv - túl a természettudományi tárgyak bevezetési sorrendjén - esetenként azt is megköveteli, hogy az egyes tantárgyak saját, megszokott tananyagfelépítési sorrendjüktől is eltérjenek. Az egybehangolás megköveteli továbbá, hogy mindazokat a fogalmakat, amelyeket az egyik természettudomány bevezetett, a többi szakszerűen, a korszerű szemléletmódnak megfelelően használja és bővíti. Az egybehangolás módszertani szempontból is egységes követelményt állít a természettudományok elé, amennyiben egyértelműen, a tanulókat alkotóan foglalkoztató, úgynevezett munkáltató módszert jelöli meg általános módszerként.

Az egybehangolás elvét a természettudományos tárgyaknál az 1978. évi új fizikatanterv messzemenően érvényesítette. Azal, hogy a fizikaoktatás a 6. osztályban kezdődik, időben megelőzi mind a kémia, mind a biológia oktatását. A 6. osztályos

fizika anyagában bevezetésre kerülnek mindazok a fontos fogalmak, amelyekre a többi természettudománynak már a kezdetkezdetén szüksége van. Ezek: erő, tömeg, energia, munka, hő, korpuszkuláris anyagszerkezet, anyagmennyiség. Miután a kémia a 7. osztályban viszonylag korán igényli az elektromos töltés fogalmát, ezért - a szokásos anyagfelépítéstől eltérve - az elektromos töltés és elektromos áram ismertetésével kezdődik a 7. osztályos tananyag. A tanterv nagymértékben ügyelt arra, hogy felesleges átfedések ne legyenek a kémiával. Így például a fizika lényegében csupán a daltoni atomfogalommal, vagyis a belső struktúra nélküli "golyómodellel" ismerteti meg a tanulókat. Az atomszerkezet megismertetése a kémia feladata. A fizika tananyag összeállításánál a tankönyvszerzők messzemenően figyelembe vették a tanulók matematikai előismereteit. Sajnálatos, hogy a Technika tárgy anyaga a fizikatanterv kialakítása idején még nem volt ismert, így ezzel az összehangolás nem történhetett meg. Ez a munka a közeljövő egyik feladata lesz.

Ami az egybehangolás szempontjából az energiát illeti: az új fizikatantervben az energia központi fogalom. Ez azt jelenti, hogy mindhárom osztályban az energiafogalomra mint vezérfonalra épül a tananyag. E fogalom segítségével ismertetik meg a munkát, a hőt, a teljesítményt, a hatásfokot, az egyszerű gépeket, a halmazállapotváltozásokat és hőjelenségeket, az

elektromos mező munkáját, a transzformátort, az elektromos hullámokat, stb. Ez az energiacentrikus tárgyalásmód biztosítja ennek a fontos fogalomnak az állandó bővülését és mélyülését, továbbá ez teszi lehetővé a tanított fizikaanyag egységes szemléletmódját. S bár az energiafogalom - mint az említett példák is mutatják - átszövi és összefűzi az egész anyagot, alapvető bevezetése a 6. osztályban történik. Ennek oka azon túl, hogy a fizika anyagának kiépítésében mint vezérfonal jól használható, az is, hogy az energia fogalmát mind a kémia, mind pedig a biológia már az oktatásuk kezdetén kénytelen használni. Így a fizika ezen tárgyak igényeit is kielégíti, amikor e fogalom kialakítását döntő súllyal a 6. osztályba helyezi.

Az energiafogalom előre- és a fizikaanyag középpontjába helyezésén túl, koncepcionálisan új e fogalom tárgyalási módja is.

Az egybehangolás eredményeként a fizika tantárgy keretén belül az általános iskolák 6., 7. és 8. osztályában időrendben a következő témákat dolgozzák fel a tanulók:

6. osztály

- I. Kölcsönhatás, erő, mozgás.
- II. Az energia, a munka, a hő.
- III. Hőjelenségek.

7. osztály

- I. Az elektromos áram.
- II. Egyensúly a folyadékokban és a gázokban.
- III. Egyszerű gépek és hőerőgépek.

8. osztály

- I. Testek mozgása.
- II. Fényjelenségek.
- III. Az elektromos áram hatásai; az indukció.

Dolgozatomban szeretném ismertetni ezen új tárgyalási mód jellemző vonásait, és ezzel kapcsolatban rámutatni arra, hogy a fizika fejlődésének mely eredményei kényszerítették fizikaoktatásunkat arra, hogy a századforduló táján kialakult, és azóta szinte "dogmaként" tanított energiafogalmat egy új, a fizika mai szemléletmódjának jobban megfelelő energiafogalommal cserélje fel.

I. AZ ENERGIAFOGALOM KIALAKULÁSÁNAK RÖVID ÁTTEKINTÉSE

Alig van olyan fogalom, melyet a köznapi életben és a természettudományokban gyakrabban alkalmazunk, mint az energia. Ebből a tényből arra következtethetnénk, hogy az energia fogalma a fizikában már régen kialakult, és ezért került be széleskörűen a köztudatba. Ha azonban az energia fogalmának kialakulását és fejlődését nézzük, meg kell állapítanunk, hogy egészen a múlt század közepéig - bár már használták az energia kifejezést - a fogalom igazi lényegét nem ismerték.

Az energiafogalom csírájának megszületése a "mozgó anyag elpusztíthatatlanságának" felismerésével kapcsolatos. Ez az elv természetszerűen felvetette a mozgás mértékére jellemző mennyiség kérdését. GALILEI egy test mozgásának mértékéül az erő és az út szorzatát - az ún. momentumot - javasolta [1]. LEIBNIZ a mozgás jellemzésére bevezette az "eleven erő" fogalmát [2]. Ezt a fogalmat nem definiálja explicite, csupán azt mondja ki, hogy az "eleven erő" növekménye az erő és az út szorzatának felel meg. BERNOULLI leszögezi [2], hogy az "eleven erő" eltűnésekor a munkaképesség nemvész el, csak más alakba megy át. L. CARNOT összefüggést állapít meg az "eleven erő" és a mechanikai munka között, és a gépek munkájának mértékeként a felemelt teher és a magasság szorzatát, az ún. "ható momentumot" jelöli meg [1]. 1807-ben YOUNG az

"Előadások a természetfilozófiáról" c. könyvében ezt írta [1]:

"Csaknem valamennyi, a gyakorlati mechanikában előadódó esetben a mozgás létrehozásához szükséges munka nem a momentummal, hanem a mozgás által végzett munka energiájával arányos. ... Az energia szón a test tömegének vagy súlyának a sebesség négyzetével való szorzatát kell érteni."

1828-ban PONCELET [1] véglegesen meghatározza a munka fogalmát, és a mechanikai folyamatokra megállapítja az energia megmaradásának elvét: a végzett munka algebrai összegének kétszerese egyenlő az eleven erők összegével/ mv^2 /; munka vagy eleven erő nem keletkezhet semmiből és nem semmisülhet meg, csupán átalakul.

A gyakorlat emberei tehát már a XIX. század elején felismerték, hogy nem lehet örökmozgót, perpetuum mobile-t szerkeszteni, az elméleti mechanikában azonban még mindig a fogalmak reménytelen zűrzavara uralkodott. Az 1800-as évek elején használt "erő", "eleven erő", "mozgásmennyiség", "hatás" fogalmak mutatják a természettudósok azon sejtését, hogy van egy olyan "erő", amely a körülményektől függően a mozgás, vegyi affinitás, elektromosság, fény, hő vagy mágnesség képében jelentkezik úgy, hogy mindezek a jelenségfajták egymásba átalakulhatnak. Hátra van még, hogy ebből a sejtésből eljussanak a szóban forgó "erő"-nek a közös mértékéhez, és így fogalmilag érthetővé tegyék. Ebbe az irányba különböző kutatók tet-

tek lépéseket, mindegyik a maga útján. Robert MAYER a hő mechanikai egyenértékének a meghatározásával [2], JOULE a róla elnevezett Joule-féle hő nagyságának a meghatározásával [2], HELMHOLTZ a gravitációs, sztatikus elektromos és -mágneses erőterekre megalkotott energia-kifejezéseivel [2], valamint ezek kiszámítására adott összefüggésével tagadhatatlanul hozzásegített az energiának azon definíciójához, melyet 1853-ban THOMSON /a későbbi LORD KELVIN/ adott [2]:

"Egy bizonyos állapotban levő anyagi rendszer energiájának nevezzük mindezen hatások mechanikai egységeiben mért összegét, amelyek a rendszeren kívül lépnek fel, ha állapotából tetszőleges módon egy önkényesen kitűzött másik állapotba megy át."

Ez a megfogalmazás az energia definícióján túl a "tetszőleges módon" kifejezéssel utal az energiamegmaradás természet-törvény voltára. Az energia tana a megmaradási törvény elismertetésével nem zárult le, mindig új fejleményekkel szolgált, sőt szolgál ma is.

MAXWELL az elektrosztatikus és magnetosztatikus tér energiáját - a FARADAY-féle [2] közelhatás gondolatának keresztülvitele után - lokalizálta a térben, azaz minden térfogatelemhez hozzárendelte a maga energia-részét. Ezt a gondolatot fejlesztette tovább POYNTING [2], amikor változó terekre kialakította az energiaáramlás elméletét. Az elektro-



mágneses energia, amelyet az elektromágneses hullámok szállítanak, az éterben "áramlik". Ezt a gondolatot 1898-ban MIE a rugalmas energiákra is általánosította [2].

A századforduló táján kísérletek sorai mutattak rá, hogy az éter-hipotézis kísérletileg nem igazolható [22]. De ha éter nincs, azaz az elektromágneses hullámok nem az éter rezgései, "miből van" akkor a sugárzás? - Tiszta energiából - tartották néhányan mindaddig, míg LEBEGYEV-nek [2] sikerült megmérnie a fénynyomást. Ezzel bebizonyosodott, hogy a "tiszta energia" épp úgy impulzussal rendelkezik, mint például egy meglökött golyó. 1905-ben EINSTEIN [21] arra az általános következtetésre jutott, hogy az anyag két tulajdonságát, a tehetetlenséget és a változtató-képességet kifejező mennyiségek - a tömeg és az energia - között az $E = mc^2$ összefüggés áll fenn. Az 1916-ban kiadott művében - amely az általános relativitáselmélet első kifejtését tartalmazza - EINSTEIN így ír [3]:

"A speciális relativitáselmélet arra a következtetésre vezetett, hogy a tehetetlen tömeg semmi egyéb, mint energia, mely teljes kifejezését egy másodrendű szimmetrikus tenzorban találja meg."

HEISENBERG [3] a tömeg-energia ekvivalencia alapján az energiát a világ elsődleges szubsztanciájaként nevezi meg. TEILHARD [3] továbbmegy, szerinte az energia a világ egyetlen szubsztanciája: "...az Energia, e mindenütt jelenlevő entitás,

amelyből minden ered, és ahová, mint valami Óceánba, minden visszahull."

A XX. sz. első felében a tudományban - az energiafogalom terén - zűrzavar uralkodott. Kitűnő könyvekben és munkákban olvashatjuk a következő kifejezéseket [3]: "az energia egyik formája a tömeg". Tömegben "a nyugalomban lévő részecske energiája" értendő.

A fizika és a filozófia mai álláspontja szerint a tömeg és az energia az egyetlen valóság, az anyag különböző és elmentétes tulajdonságainak, a tehetetlenségének és a kölcsönható-képességének jellemzésére szolgáló mennyiségek. Matematikai leírásuk a négydimenziós tér-időben a relativisztikus szempontból invariáns energia-impulzus négyesvektorral történik.

A mai fizikaoktatásnak olyan energiadefiníciót kell kialakítania, amely - a tanulók életkori sajátosságainak megfelelően - tükrözi a tudomány e fogalommal kapcsolatos mai álláspontját.

Célszerű röviden összefoglalni azt is, hogy mit értünk a fizikában egy fogalom definiálásán. A fizikában a fogalmak definíciója ugyanis eltér a logikai fogalom-definíciótól.

II. A FIZIKAI FOGALMAK DEFINÍCIÓJA

A köznapi élet fogalmainak definiálásán a következőt értjük [4]: "...gondolkodási művelet, amely lehetővé teszi valamely fogalom tartalmának, lényeges ismertetőjegyeinek feltárását; valamint e művelet eredményeként feltárt tartalmi jegyek megfogalmazott alakja. Két alkotó eleme van: a meghatározandó és a meghatározó. Leggyakoribb fajtája a legközelebbi nem és a faji különbség révén történő meghatározás. Ebben az esetben a meghatározandó fogalmat egy nála közvetlenül szélesebb terjedelmű fogalom alá rendeljük, majd feltárjuk azokat az ismertetőjegyeket, amelyek a vizsgált fogalmat megkülönböztetik az e nem fogalma alá tartozó többi fogalomtól".

A szorosabb értelemben vett fizikai fogalmak a köznapi élet fogalmaitól eltérő sajátosságúak. A fizikai fogalmak mérhető mennyiségek, ezért ezek definíciója eltér a hétköznapi fogalmak logikai definíciójától. A fizikai fogalmak definíciója mindig egy - matematikai formában kifejezhető - mérési utasítás. Például: a sebesség az út és a megtételéhez szükséges idő hányadosával definiált fizikai mennyiség, azaz $v = s/t$. Ebből az is következik, hogy egyrészt a fizikai fogalmak definíciója nem adja meg a fogalmak filozófiai meghatározását, másrészt a fizika fogalmai rendkívül egzaktak.

Ez a körülmény egyfelől könnyíti, másfelől viszont nehezíti a fogalmak definiálását, tanítását és megtanulását. Könnyíti annyiban, hogy e pontos fogalmakkal biztonságosabban lehet operálni, s ha valaki jól ismeri e fogalmakat, akkor a félreérthetőség lehetősége minimális, viszont - főként az alapfokon tanulóknak - a fizika fogalmainak pontos definiálása komoly nehézséget okoz. A fizikaoktatás minden szintjén - de különösen az alsófokú fizikaoktatásban - a fogalmak kialakításánál tudnunk kell, hogy

- a/ a tanulók életkori sajátosságai és matematikai ismereteik miatt a fizika fogalmait nem a teljes mélységükben alakítjuk ki. Meg kell elégednünk a tudományosság olyan szintű megközelítésével, amelyet a fent említett korlátok megengednek;
- b/ a nehezebb fogalmakat nem egyszerre alakítjuk ki, hanem tudatos, fokozatos lépések során fejlesztjük fel a kívánt fokra. A fogalom tartalma ezen "érlelés" során fokozatosan bővül és egyidejűleg mélyül is. Ez az "érlelés" feltételezi, hogy a fogalom tartalmának - még a legkezdetlegesebb fokon is - tudományosan helyesnek kell lennie. Csupán ez a körülmény biztosítja ugyanis, hogy a fogalom minden törés nélkül legyen bővíthető, hogy ne kelljen a már korábban megtanultakat "újraértékelni", vagy "újratanulni".

Míg az a/ alattiakat az alap- és középfokú fizikaoktatás - már az életkori sajátosságok kényszerítő volta miatt is - szinte teljes egészében szem előtt tartja, és e szerint jár el, addig ez nem mondható el maradéktalanul a b/ alatt mondottakra. Nem arról van szó, hogy a megtanult fogalmak a tanítás során általában nem bővülnek, és nem mélyülnek, hanem arról, hogy a fogalom-értelelés folyamata nem tudatos, nem eléggé megtervezett, s így nem is éri el azt a szintet, amelyet tudatos, tervszerű munkával el lehetne érni.

Visszatérve a fizikai fogalmak definíciójára: a fizikában is felmerül annak szükségessége, hogy a legáltalánosabb körű fogalmakra - a szokásos mérési utasítás-definíción kívül - valamiféle logikai definíciót /a következőkben e logikai definíciót általános definíciónak fogjuk nevezni/ is adjunk. Erre annál is inkább szükség van, mivel a fizika legáltalánosabb fogalmai a köznapi életbe is átmentek, s itt nemigen lehet fizikai definíciójukkal operálni. Ilyen általános definíciók megadása - éppen mivel a definiálandó fogalom köre igen széles - nagyon nehéz. Az energia esetében - amely a fizika egyik legáltalánosabb fogalma - a nehézséget az is fokozza, hogy az energiának igen sokféle megjelenési formája van /mozgási energia, kölcsönhatási-, belső-, kémiai-, rugalmas energia, stb./, és ezeknek az energiafajtáknak mindegyikére a fizika más-más definíciót, vagyis más-más mérési

utasítássorozatot ad. Ezekből érthető, hogy az energia általános definiálása nem könnyű feladat.

Mit kívánunk az energia általános definíciójától? Azt, hogy

- tartalma tudományosan helyes legyen,
- ebből az általános definícióból egyszerűen, logikai törés nélkül levezethetők legyenek a különböző energiatípusok,
- ez az általános energiadefiníció használható legyen a többi tudomány számára is.

Abból a célból, hogy az energia tartalma tudományosan helyes legyen, meg kell először vizsgálnunk, hogy a mai fizika mit mond az energiáról, az energia és a munka, valamint a hő kapcsolatáról. Dolgozatom most következő részében ezt kívánom kifejtani.

III. AZ ENERGIAFOGALOM A MAI FIZIKÁBAN

1. Extenzív és intenzív mennyiségek

Azokat a fizikai mennyiségeket, amelyek két vagy több homogén rendszer egyesítésekor additive viselkednek, extenzív, vagy kvantitás mennyiségeknek nevezzük. Az extenzív mennyiségek azonos fajú, de különböző kiterjedésű rendszerekénél a térfogattal, a tömeggel, vagy a részecskeszámmal arányosak. Az extenzív mennyiségek tipikus példái: a térfogat, a tömeg, az energia, a lendület.

A fizikai mennyiségek egy másik csoportját az intenzív, vagy kvalitás mennyiségek alkotják. Intenzív, vagy kvalitás mennyiségek azok a mennyiségek, amelyek a rendszer kiterjedésétől függetlenek. Ezek a mennyiségek egy homogén, termikus egyensúlyban levő rendszer részekre osztásakor minden részrendszerben azonos értékűek. Tipikus példái az intenzív mennyiségeknek: a nyomás és a hőmérséklet.

Azok a mennyiségek, amelyekre megmaradási tételek érvényesek, mindig extenzív, azok pedig, amelyek egy zárt rendszerben "kiegyenlítődésre törekszenek", mindig intenzív jellegűek.

2. Távolhatás, közelhatás

Faraday és Maxwell munkásságáig a fizikusok azt képzeltek, hogy egy test egy vele nem érintkező, a tér egy másik helyén lévő másik testre úgy fejt ki erőhatást, hogy ez a hatás a két test közötti teret "érintetlenül" hagyja. Ebben az elképzelésben fontos elem, hogy a hatás tovaterjedéséhez nincsen időre szükség, vagyis a hatás - kissé pongyolán kifejezve magunkat - végtelen sebességgel terjed. Ezt az elképzelést "távolhatásnak" nevezik. A távolhatással kapcsolatban azonban a Faraday-Maxwell-féle térelmélet, amely a pontról-pontra történő hatás tovaterjedését posztulálta, már nehézségeket támasztott. Ezeket a nehézségeket mélyítették azok a kísérleti tapasztalatok, amelyek azt igazolták, hogy a hatások véges sebességgel terjednek. A távolhatás tarthatatlanságát az Einstein által 1905-ben kidolgozott, s azóta már számos kísérleti tapasztalattal egyértelműen igazolt speciális relativitáselmélet igazolta.

A speciális relativitáselmélet szerint távolhatás nem létezik, mivel bármilyen jel véges sebességgel, legfeljebb a fény vákuumbeli sebességével terjedhet. Egy test hatása tehát nem "ugrásszerűen", időbeli eltolódás nélkül jelentkezik a másik testen, hanem a test megjelenése után s/v idő elteltével. Itt s a két test távolsága, v a hatás tovaterjedési sebessége. Ily módon a távolhatás tartalmából az "ugrásszerűség"-nek ki kellett

esnie. Az a feltételezés sem lenne helytálló, hogy - bár a hatásnak a két test közötti átjutásához időre van szüksége - a hatás mégis "ugrik", vagyis a két test közötti teret nem futja át. Ennek a kissé erőltetett elképzelésnek viszont a megmaradási elvek mondanak ellent. Vegyük például azt az esetet, amikor az egyik test energiát "sugároz" át a másik testnek. Ez az energia az utóbbi testre egy bizonyos időkülönbséggel érkezik. Hol volt az energia akkor, amikor az első test már "kisugározta", de még nem érkezett meg a másodikra? Eltűnt? Az energiamegmaradás elvéből következően ez nyilván lehetetlen. Azt kell tehát mondanunk, hogy a két test közötti térben "haladt", vagyis a teret nem "átugrotta", hanem abban pontról-pontra továbbmozgott a másik testig. Ezt a felfogást erősíti még az a kísérleti tapasztalat is, amely szerint - ha a két test közötti teret kémiai anyag tölti ki, akkor - a hatást kifejtő testre az anyag részecskéi "visszahatnak", jelölül annak, hogy a hatás keresztülhaladt rajtuk. Azt a hatás-terjedési mechanizmust, amely a hatások véges terjedési sebessége mellett a pontról-pontra való, "ugrás" nélküli terjedést posztulálja, közelhatás-elméletnek nevezzük.

A közelhatás elméletét igazoló megcáfolhatatlan kísérleti érvek mellé még egy másik érvet is sorolhatunk, nevezetesen azt, hogy a fizika problémáinak elméleti megoldásait általában differenciálegyenletek szolgáltatják. Ezek pedig az "iránymező" révén a hatásokat pontról-pontra adják meg.

Összefoglalóan tehát megállapíthatjuk, hogy a XX. századi fizika a távolhatás elméletét elveti, és helyette a kísérletileg és elméletileg is bizonyítható közelhatás elméletét vallja.

3. A fizikai mezőkről

Ha elfogadjuk a közelhatás elméletét, akkor ebből azonnal következik, hogy két egymásra ható test körüli tér nem "passzív tartály" többé, hanem fizikai valóság, a fizikai törvényekben részt vevő kölcsönható partner. Ezt az el nem hanyagolható kölcsönható partnert fizikai mezőnek nevezzük.

A mai fizika a fizikai mezőket "tovább nem redukálható anyagformának" tekinti [17], és a következő fajtájukat különbözteti meg: az elektromágneses mező és ennek speciális alakjai, az elektromos és mágneses mező, a gravitációs mező, és az elemi részek különböző /még nem teljesen ismert/ anyagmezői.

Nézzük most röviden át, milyen jellemvonások alapján állíthatja a fizika a mezőkről, hogy ezek az anyag egy speciális megjelenési formái. Az áttekintést elektromágneses- és a gravitációs mezőre vonatkozólag végzem.

Az elektromágneses mező

a/ energiával rendelkezik. Energiasűrűsége:

$$u = \frac{1}{2} / \vec{E} \cdot \vec{D} + \vec{H} \cdot \vec{B} /,$$



ahol $\vec{E}$ az elektromos-, $\vec{H}$ a mágneses tér erőssége,
 $\vec{D}$ az elektromos-, $\vec{B}$ a mágneses tér indukcióvektora.
 Az elektromágneses tér u energiasűrűsége az

$$u_e = \frac{1}{2} \vec{E} \cdot \vec{D} = \frac{1}{2} \epsilon_0 \vec{E}^2 + \frac{1}{2} \vec{E} \cdot \vec{P}$$

elektromos energiasűrűségből, és az

$$u_m = \frac{1}{2} \vec{H} \cdot \vec{B} = \frac{1}{2} \mu_0 \vec{H}^2 + \frac{1}{2} \vec{H} \cdot \vec{J}$$

mágneses energiasűrűségből additíve tevődik össze.

Ezekben az energiasűrűség-kifejezésekben $\frac{1}{2} \epsilon_0 \vec{E}^2$
 ill. $\frac{1}{2} \mu_0 \vec{H}^2$ a vákuum elektromos, ill. mágneses
 energiasűrűsége, az $\frac{1}{2} \vec{E} \cdot \vec{P}$ ill. az $\frac{1}{2} \vec{H} \cdot \vec{J}$ a
 polarizált dielektrikum, ill. a mágnessé tett közeg
 energiasűrűsége. Ezekben a kifejezésekben ϵ_0 ill.
 μ_0 az influenciakonstans ill. a vákuum permeabilitása,
 $\vec{P}$ ill. $\vec{J}$ az elektromos, ill. a mágneses polarizáció
 vektora.

Egy véges V térrész elektromágneses energiája

$$E = \int_V u \, dV = \frac{1}{2} \int_V \vec{E} \cdot \vec{D} \, dV + \frac{1}{2} \int_V \vec{H} \cdot \vec{B} \, dV.$$

Az elektrosztatikus ill. magnetosztatikus mezőben a V
 térrész E_e elektromos ill. E_m mágneses energiája:

$$E_e = \frac{\epsilon_0}{2} \int_V \vec{E}^2 dV, \text{ ill. } E_m = \frac{\mu_0}{2} \int_V \vec{H}^2 dV.$$

b/ tömeggel rendelkezik. A speciális relativitáselmélet

alapján az E energiájú elektromágneses mező tömege

$$m = \frac{E}{c^2}.$$

c/ impulzussal rendelkezik. Az elektromágneses hullámok-

ban energia "áramlik". Az energia "áramlását" az energia-áramsűrűségi vektor, az ún. Poynting-vektor jellemzi: $\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$, $[S] = \frac{J}{m^2 s} = \frac{W}{m^2}$. Az S megadja az energiaáramlás irányára merőlegesen felvett egységnyi felületen az időegység alatt átáramlott energiát.

Ha $\vec{S}$ -t c^2 -tel, a fénysebesség négyzetével osztjuk, akkor a hányados az elektromágneses mező térfogategységének impulzusvektorát szolgáltatja: $\vec{G} = \frac{\vec{S}}{c^2}$.

$$[G] = \frac{kgms^{-1}}{m^3}.$$

d/ impulzusmomentummal rendelkezik az $\vec{M} = \vec{r} \times \vec{G}$ összefüggés alapján.

Az elektromágneses mező tehát olyan attributumokkal rendelkezik, amelyekkel bármely mechanikai rendszer is bír. Ez alapján jogos, hogy anyagnak tekintsük. Ezzel azonban korántsem azt mondtuk, hogy az elektromágneses mező teljesen azonos a "közönséges" anyaggal. Az elektromágneses mezőnek, mint anyagnak, a kémiai anyagtól eltérő, más sajátosságai is vannak. Az egyik ilyen

- szembeszököen - eltérő sajátsága az áthatolhatóság. Egy másik jellegzetes különbség: az elektromágneses jelenségek fizikája eleve relativisztikus, míg a kémiai anyag fizikája nem az. További különbség: a mezők szuperpozíciójakor egy ún. interferencia-tag is fellép, amely a kémiai anyag szuperpozíciójánál hiányzik. Ennek az interferencia-tagnak a fellépését - az egyszerűség céljából - két elektrosztatikus mező szuperpozíciójánál mutatjuk meg. Legyen adott egy $\vec{E}_1$ térerősséggel jellemzett, továbbá egy $\vec{E}_2$ térerősséggel jellemzett elektrosztatikus mező. Egyesítsük e két mezőt. A közös mező energiája egy V térfogatban:

$$E = \frac{\epsilon_0}{2} \int_V |\vec{E}_1 + \vec{E}_2|^2 dV = \frac{\epsilon_0}{2} \int_V \vec{E}_1^2 dV + \frac{\epsilon_0}{2} \int_V \vec{E}_2^2 dV + \epsilon_0 \int_V \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 dV.$$

Az eredményünk azt mutatja, hogy a két mező egyesítésekor a V térfogat energiáját nem a két mező V térfogatbeli energiájának az összege adja, hanem egy harmadik energiataggal, az ún. interferenciattaggal bővül. Ennek az interferencia-tagnak a jelentéséről a következőkben még szólni fogok. Itt azonban csak azt kívánom hangsúlyozni, hogy ez a tag anyagi kontínuumokkal ellentétben csak mezők szuperpozíciójánál lép fel.

A meglévő különbségek ellenére is az elektromágneses mező az anyag egy sajátos megjelenési formája. Ezt a végkövetkeztetésünket erősíti az a kísérleti tény is, hogy a kémiai "anyag és az elektromágneses mező között energia-, impulzus- és impulzus-

momentum-csere lehetséges. A kölcsönhatásokat szigorúan érvényes mérlegegyenletek jellemzik: amennyit veszít a vizsgált extenzív mennyiségből az egyik megjelenési formában levő materiális test, annyi nyer a másik, és viszont. A megmaradási tételek szempontjából a köznapi értelemben vett anyag és a fizikai mező szükségszerűen egyenrangúan viselkedik; bármelyik partner szerepét figyelmen kívül hagyva már nem beszélhetünk megmaradásról" [20].

A kétféle anyagi forma kölcsönhatását szépen bizonyítja a P. Lebegyev által 1900-ban kísérletileg kimutatott fénynyomás [16], valamint az e század harmincas éveiben felfedezett szétsugárzás és a párkeltés jelensége [16]. A szétsugárzásban az elektron-pozitron pár nem "semmisül meg", hanem csak az anyag egyik megjelenési formájából a másikba /elektromágneses mezőbe/ megy át, miközben a tömeg, energia, impulzus, impulzusmomentum a folyamatban változatlan marad. Ugyanez érvényes a párkeltés jelenségére is.

Itt szólnék röviden a "mező" és a "tér" elnevezésről. A magyar szakirodalom még a közelmúltban is "elektromágneses térről", "gravitációs tér"-ről beszélt, nem pedig az "elektromágneses mező" és "gravitációs mező" elnevezést használja. A "mező" szó bevezetését az indokolja, hogy ezzel kívánjuk a fizikai valóságot, az anyag egy formáját megjelölni. A "tér" szót viszont akkor használjuk, ha pl. a mező, az objektíve létező valóság egy

tulajdonságát akarjuk algebrai vagy geometriai úton szemléltetni. Így ha az elektrosztatikus mezőt erőhatás szempontjából kívánjuk jellemezni, akkor ezt térerősség-tér, ha munka szempontjából akarjuk leírni, akkor ezt potenciál-tér megadásával tehetjük. A térerősség-tér, a potenciál-tér a mező egy-egy tulajdonságát szemlélteti és semmiképpen sem a mezőt, az anyag egy megjelenési formáját jelöli meg. A "tér" szó ebben az értelemben tehát mindig tudatunk egy algebrai vagy geometriai alkotását jelenti, ellentétben a "mező" szóval megjelölt objektív valóságtól.

A gravitációs mező

A gravitációs mező kérdése komplikáltabb, mint az elektromágneses mezőé. Addig, míg az elektromágneses mező végső soron erőtérrrel /ill. a belőle származtatható potenciáltérrel/ egyértelműen és egységesen jellemezhető, addig a gravitációs mezőkre két, egymástól lényegében eltérő leírásmód ismeretes. Az egyik a gravitációs erőtérrrel való leírás /a gravitáció newtoni elmélete/, a másik a görbült téridővel történő jellemzés. Az utóbbi leírást az Einstein által 1916-ban publikált általános relativitáselmélet szolgáltatja /a gravitáció einsteini elmélete/ [28]. Ez utóbbi elméletben az előbbi bennfoglaltatik; nevezetesen a newtoni gravitáció-elmélet az einsteininek gyenge gravitációs mezők és a fénysebességhez

képest kicsiny testsebességek esetére tekintett határesetre. A gravitációs mezőnek e kétféle interpretációját jól mutatja a következő példa: a gravitáció Newton-féle elméletében az a tény, hogy két test - amelyek között a gravitációs mező kölcsönhatást létesít - egymás közelében görbe vonalon mozog, a két test kölcsönhatásával, az egymásra kifejtett erőhatással magyarázható. A gravitáció einsteini elmélete ennek a görbevonalú mozgásnak egyedüli okát a téridőnek a gravitáló testek létrehozta görbült voltában látja, és azt mondja, hogy a test magára hagyott testként követi a téridő görbültségét. Mi okozza a téridő görbültségét? Erre vonatkozóan Landau a következőket mondja [42]: "Egy gravitációs erőter hatása abban áll, hogy megváltoztatja a téridő metrikáját... Ez a fontos körülmény azt jelenti, hogy a téridő geometriai tulajdonságait /metrikáját/ fizikai mennyiségek határozzák meg, tehát a tér és az idő geometriai tulajdonságai nem állandók." Ezzel kapcsolatosan Infeld a következőket mondja [24]: "Az általános relativitáselmélet ... megtámadja a gravitáció problémáját és a tömegvonzási mezőre új, szerkezeti törvényeket ír fel."

"A modern fizika és a dialektikus materializmus" c. könyv [3] szerint "...Az anyag határozza meg tehát az általános relativitás terének metrikus tenzorát, s ennél fogva a tér formáját...", vagy egy másik helyen még világosabban megfogalmazva: "A téridő geometriáját a gravitációs terek jelenléte határozza meg [3]."

/Az idézetekben szereplő gravitációs tér kifejezésen - mint ez a könyvek szövegének értelméből kiolvasható - a szerzők az általunk gravitációs mezőnek nevezett objektív valóságot értik./ A gravitációs mezőknek e kétféle interpretációja azért okoz zavart, mert a fizikusok egy része az általános relativitáselméletre hivatkozva tagadja a gravitációs mező létét. Ezen állítás azon a nyilvánvaló félreértésen alapul, mely szerint a gravitációs mezőt, a tudatunktól függetlenül létezőt, az anyag egy megnyilvánulási formáját azonosítják az erőhatás szempontjából jellemző gravitációs erőterrel. Erre a tévedésre mutatnak rá a fenti idézetek. E rövid bevezetés után lássuk röviden a gravitációs mező anyagi voltát /amit egyébként a fentiekben már feltételeztünk/ bizonyító tényeket.

A gravitációs mezőnek

a/ energiája van. A gravitáció newtoni elmélete alapján a gravitációs mező energiasűrűsége $u = -\frac{1}{8\pi f} \bar{g}^2$, ahol $f = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$ a gravitációs állandó, $\bar{g}$ pedig a gravitációs gyorsulásvektor. Az Einstein-féle gravitációelméletben a gravitációs mezőnek, mint egésznek van energiája. Az energia azonban - ezen elmélet alapján - nem lokalizálható. Érdekes ezzel kapcsolatban idézni Dirac-ot [43]: "Nem lehetséges a gravitációs mező energiájára olyan kifejezést találni, hogy a következő két feltétel egyidejűleg teljesüljön:

1. más fajta energiához hozzáadva, az energiamegmaradás elve érvényben maradjon a teljes energiára;
2. egy adott háromdimenziós térrészben az energia egy bizonyos időpillanatban független legyen a koordinátarendszer megválasztásától.

Ebből következően, általában a gravitációs energiát nem lehet lokalizálni. A legjobb amit tehetünk, hogy a pszeudotenzort használjuk, amely kielégíti az 1. feltételt, de nem elégíti ki a 2.-at. A pszeudotenzor közelítő információt ad a gravitációs energiáról, amely információ bizonyos speciális esetben pontos lehet."

/A pszeudotenzor - ellentétben a valódi tenzorral - nem invariáns a koordinátatranszformációkkal szemben./

b/ tömege van az $\frac{E}{c^2}$ összefüggés alapján,

c/ impulzusa és ebből következően impulzusmomentuma van.

"A gravitációs energia pszeudotenzora és a gravitációs mező nélküli energia-impulzus tenzor összegének integráljáról, ha az integrációs tartományt végtelenbe tartjuk, feltételezhetjük, hogy teljes energiát és impulzust ad, ha 1/ az integrál konvergál és 2/ a fluxus nagy térfogat felületén zérushoz tart. Ekkor definit kifejezést nyerünk a teljes energiára és impulzusra, amely megmarad" [43].

A gravitációs mező anyagi természetét igazolja továbbá, hogy kölcsönhatásba kerül testtel és e kölcsönhatás során maga is változik.

Ez utóbbi megállapításhoz kapcsolódva egész általánosan - vagyis minden mezőre érvényesen - kimondhatjuk, hogy a mező megváltoztatása mindig egy vele kölcsönhatásban levő testtel történik. A mezővel kölcsönhatásban álló testnek a mezőben való elmozdításával megváltoztatjuk a mező állapotát, az előbbi állapotához képest "torzítjuk" a mezőt. A mező "torzítása" a mező energiájának megváltozását eredményezi. Ezzel a "mezőtörzítéssel" kapcsolatos mezőenergia-változással a későbbiekben még foglalkozom.

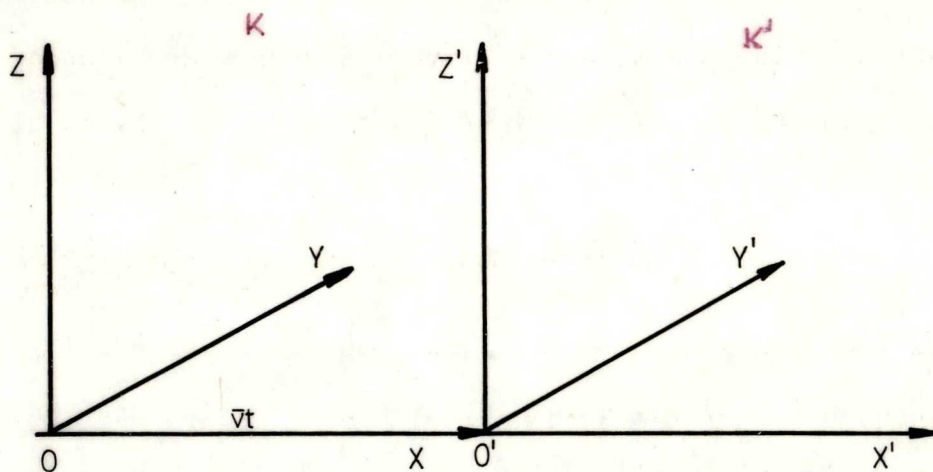
4. A relativisztikus mechanika energiafogalma

A fizika korszerű energiafogalmának a közelhatáson kívül a korábbi klasszikus mechanikát az ún. relativisztikus sebességekre $v \lesssim c$ is kiterjesztő relativisztikus mechanika eredményeit is figyelembe kell vennie. Vizsgáljuk meg ez utóbbi energiafogalmát, egyelőre a közelhatás figyelembe vétele nélkül.

A relativisztikus mechanikát matematikailag egységesen csak az euklidesi négydimenziós téridő-világban, az ún. Minkowski-világban lehet tárgyalni [22]. A Minkowski térben általában egy négy-tengelyes Descartes-féle koordinátarendszert

veszünk fel. A koordinátarendszer tengelyei: x, y, z, τ , ahol $\tau = ict$. Ebben a koordinátarendszerben egy pont egy eseményt jelöl, amelynek ilymódon adott a helye és ideje. Az események egymásutánja egy jelenséget szolgáltat, amelynek a Minkowski-világban, ill. a felvett koordinátarendszerben egy világvonal felel meg.

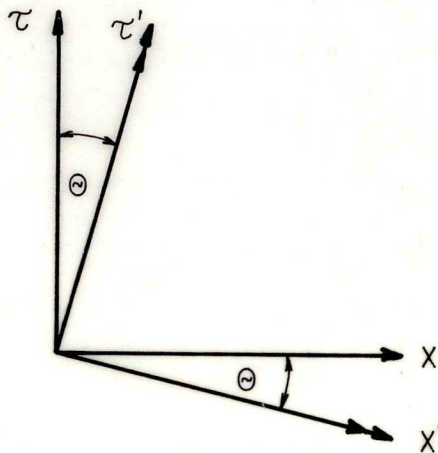
Mindenekelőtt vizsgáljuk meg, hogy a K ill. K' háromdimenziós,



1. ábra

egymáshoz képest az 1. ábrán látható módon v -állandó sebességgel mozgó inerciarendszerek között kapcsolatot létesítő Lorentz-féle transzformációs egyenletek a Minkowski-világban felvett koordinátarendszer milyen változását eredményezik. Kimutatható, hogy $K \rightarrow K'$ transzformáció a Minkowski-koordinátarendszer

τ tengelyének az $/x\tau/$ síkban az x tengely irányába történő Θ szögű elforgatásával ekvivalens /2. ábra/. Ennél az elforgatásnál - amelyre a következőkben egyszerűen csak a négydimenziós koordinátarendszer "elforgatása" szóval fogok hivatkozni - az $y = y'$ és $z = z'$.



2. ábra

Állításunk a következő módon látható be. Az analitikus geometriából ismertek a 2. ábrán látható elforgatás transzformációs egyenletei:

$$x' = x \cos \Theta - \tau \sin \Theta,$$

$$\tau' = x \sin \Theta + \tau \cos \Theta,$$

$$y' = y,$$

$$z' = z.$$

Ha ezeket az egyenleteket az

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} ; \quad t' = \frac{t - \frac{v}{c^2} x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} ; \quad y' = y ; \quad z' = z$$

Lorentz-féle transzformációs egyenletekkel összehasonlítjuk, akkor látható, hogy a Minkowski-világban történő koordináta-rendszer elforgatás-egyenletei a

$$\cos \Theta = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad \text{és} \quad \sin \Theta = \frac{-iv}{c \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

helyettesítéssel a Lorentz-féle transzformációs egyenletekbe mennek át, és viszont. Látható tehát, hogy a $K \rightarrow K'$ átmenet a Minkowski-világban felvett koordináta-rendszer elforgatását jelenti.

A következőkben ismerkedjünk meg a Minkowski-világ néhány fontos fogalmával:

a/ az eseményintervallum-vektor; a Minkowski vektorok /négyesvektorok/ definíciója:

Két esemény intervalluma /távolsága/ a Minkowski-világban

$$ds = \sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2 + d\tau^2} = \sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2 dt^2}.$$

Ez az eseményintervallum nyilván nem változik, ha a koordináta-rendszert elforgatjuk.

$$ds = \sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2 dt^2} = \sqrt{dx'^2 + dy'^2 + dz'^2 - c^2 dt'^2},$$

vagyis másképpen fogalmazva: a világvonal ívelemének nagysága invariáns a koordinátarendszer elforgatásával szemben.

A világvonal íveleme azonban a Minkowski-világ

$$d\bar{r} = \{dx; dy; dz; d\tau\} = \{dx; dy; dz; ict\} \quad (1)$$

elemi elmozdulásvektorának /eseményintervallum-vektor/ abszolút értéke:

$$|d\bar{r}| = ds.$$

Azt mondhatjuk tehát, hogy az eseményintervallum a Minkowski-világ $d\bar{r}$ elemi elmozdulásvektorának, az ún. elemi elmozdulás négyesvektorának abszolút értéke. Ez az abszolút érték invariáns, vagyis a koordinátarendszer elforgatásánál változatlan. A Minkowski-világ elemi elmozdulásvektorával kapcsolatos néhány olyan adat, amelyekre a későbbiekben szükség lesz:

$$\frac{ds}{dt} = \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2 - c^2} = \sqrt{v^2 - c^2} = i\sqrt{c^2 - v^2}, \quad (1a)$$

$$\frac{dt}{ds} = \frac{-i}{\sqrt{c^2 - v^2}}. \quad (1b)$$

A $d\bar{r}$ iránycosinusai:

$$a_1 = \frac{dx}{ds} = \frac{dx}{dt} \cdot \frac{dt}{ds} = - \frac{iv_x}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{-iv_x}{c\sqrt{1 - v^2/c^2}},$$

$$a_2 = \frac{-iv_y}{c\sqrt{1 - v^2/c^2}},$$

$$a_3 = \frac{-iv_z}{c\sqrt{1 - v^2/c^2}},$$

$$a_4 = \frac{d\tau}{ds} = \frac{icdt}{dt} \cdot \frac{dt}{ds} = ic \frac{-i}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{c}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Definíció: a Minkowski-világ minden olyan négykomponensű mennyisége, amelynek komponenseire koordinátatranszformációnál érvényes a

$$A^2 = A_x^2 + A_y^2 + A_z^2 + A_\tau^2 = A_x^2 + A_y^2 + A_z^2 + A_\tau^2,$$

összefüggés, Minkowski-vektor /négyesvektor/. Ebben $A_\tau = iA_t$. A_τ neve: imaginárius időkomponens, A_t -é valódi időkomponens. Vegyük észre, hogy a Minkowski-vektorokat az elemi elmozdulás-négyesvektor komponenseinek transzformálási szabálya alapján definiáljuk. Figyeljünk továbbá arra is, hogy a definíció általános olyan értelmében, hogy bármilyen koordinátatranszformációt megenged.

Ha a következőkben csak a forgatásra szorítkozunk, akkor a A_x, A_y, A_z, A_τ négy mennyiség akkor és csak akkor alkot

Minkowski vektort, ha a következő transzformációs szabályt kielégíti:

$$\begin{aligned}
 A_{x'} &= \frac{A_x - \frac{v}{c} A_t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, & \left[\begin{array}{l} \text{ez megfelel az } x' = \frac{x - \frac{v}{c}(ct)}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \\ \text{Lorentz-egyenletnek,} \end{array} \right] \\
 A_{y'} &= A_y, & \left[\begin{array}{l} \text{ez megfelel az } y' = y \\ \text{Lorentz-egyenletnek,} \end{array} \right] \\
 A_{z'} &= A_z, & \left[\begin{array}{l} \text{ez megfelel a } z' = z \\ \text{Lorentz-egyenletnek,} \end{array} \right] \\
 A_{t'} &= \frac{A_t - \frac{v}{c} A_x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, & \left[\begin{array}{l} \text{ez megfelel a } ct' = \frac{ct - \frac{v}{c} x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \\ \text{Lorentz-egyenletnek.} \end{array} \right]
 \end{aligned} \tag{3}$$

Állításunk könnyen igazolható, ha $A_{x'}$, $A_{y'}$, $A_{z'}$, $A_{t'}$ megadott értékeit az $A^2 = A_x^2 + A_y^2 + A_z^2 - A_t^2 =$
 $= A_{x'}^2 + A_{y'}^2 + A_{z'}^2 - A_{t'}^2$

transzformációs egyenletbe helyettesítjük.

Az a tény, hogy a négyesvektorok invariánsának a négydimenziós koordinátarendszer elforgatásával szemben, azt jelenti, hogy a négyesvektorral megadott fizikai mennyiség minden inerciarend-

szerben ugyanakkora nagyságú és irányú. Következésképpen a négyesvektorok között felírt egyenletek valamennyi inercia-rendszerben érvényesek. Ez az invariáns leírásmód felel meg a speciális relativitás elvének, amely szerint az inercia-rendszerek minden fizikai jelenség szempontjából egyenrangúak.

b/ Minkowski sebesség

Egy anyagi pont sebességének nagysága a Minkowski-világban $\frac{ds}{dt}$, ahol ds az anyagi pont világvonala-nak egy eleme. A sebesség négyesvektorának kiszámítása céljából határozzuk meg először e négyesvektor abszo-lut értékét. Vegyük fel koordinátarendszerünk $+ \tau$ ten-gelyét ds irányában úgy, hogy az az anyagi pont hala-dási irányába mutasson. Ekkor

$$ds = d\tau = icdt \longrightarrow \frac{ds}{dt} = ic.$$

Ez a Minkowski sebességvektor abszolút értéke a válasz-tott speciális rendszerben. Mivel a négyesvektorok ab-szolút értéke invariáns bármely koordinátatranszformá-cióval szemben, következik, hogy a Minkowski sebesség-vektor nagysága is ic bármely koordinátarendszerben. Ennek, és az elemi elmozdulás-négyesvektor iránycosi-nusainak segítségével

$$V_x = ica_1 = \frac{-iv_x}{c\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} ic = \frac{v_x}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}.$$

Hasonlóképpen számolva

$$V_y = \frac{v_y}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}; \quad V_z = \frac{v_z}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}; \quad V_\tau = \frac{ic}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

vagyis

$$\begin{aligned} \bar{V} &= \{V_x; V_y; V_z; V_\tau\} = \\ &= \left\{ \frac{v_x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}; \frac{v_y}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}; \frac{v_z}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}; \frac{ic}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right\}. \quad (4) \end{aligned}$$

$\bar{V}$ komponensei a háromdimenziós $K \rightarrow K'$ transzformációnál (3) alapján

$$\begin{aligned} \bar{V} &= \{V_x; V_y; V_z; V_t\} = \\ &= \left\{ \frac{V_x - \frac{v}{c} V_t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}; V_y; V_z; \frac{V_t - \frac{v}{c} V_x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right\} \quad (4a) \end{aligned}$$

(4)-ben és (4a)-ban $\bar{v}$ az O' sebessége az Ox tengely mentén /1. ábra/. Megjegyzem a (4)-ben az imaginárius, míg (4a)-ban az egyszerű időkomponenssel írtuk fel a Minkowski-vektort. Mindkét felírás jó, de ügyelnünk kell

arra, hogy amennyiben a (4a)-ból számítjuk ki a négyessebesség abszolút értékét, akkor a

$v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2 - v_t^2$, összefüggéssel kell számolnunk a $v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2 + v_t^2$, összefüggés helyett.

c/ Minkowski mozgásmennyiség

Legyen a K-ban egy tömegpont nyugalomban. A tömegpont tömege m_0 . Ennek a rendszernek megfelelő négydimenziós koordinátarendszerben a Minkowski mozgásmennyiség vektora

$$\bar{P}_0 = \{m_0 v_x; m_0 v_y; m_0 v_z; m_0 v_t\} = \{0; 0; 0; im_0 c\}.$$

Ebből $\bar{P}_0^2 = -m_0^2 c^2$. Ez invariáns mennyiség, vagyis minden más elforgatott rendszerben is $\bar{P}^2 = -m_0^2 c^2$, vagy $\bar{P} = im_0 \bar{c}$. Ez utóbbi kifejezésben $\bar{P}$ a $\bar{v}$ sebességgel mozgó anyagi pont Minkowski mozgásmennyisége és $i\bar{c}$ a részecske Minkowski-sebessége. Ez alapján

$$\begin{aligned} \bar{P} = m_0 \bar{V} &= \left\{ \frac{m_0 v_x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}; \frac{m_0 v_y}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}; \frac{m_0 v_z}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}; \frac{im_0 c}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right\} = \\ &= \{mv_x; mv_y; mv_z; imc\} = \{\bar{p}; imc\}, \end{aligned} \quad (5)$$

ahol $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$ a relativisztikus tömeg és $\bar{p} = m\bar{v}$,



a relativisztikusan általánosított 3 dimenziós impulzus.

d/ Minkowski erő

Ha $\bar{V} = \{V_x; V_y; V_z; iV_t\}$, akkor $d\bar{V} = \{dV_x; dV_y; dV_z; i dV_t\}$ is négyesvektor, vagyis invariáns. /Láttuk, hogy a vektor nagysága invariáns, iránya pedig a koordinátarendszer megválasztásától nyilván független. Ezért magát a $\frac{dV}{dt}$ vektort is invariánsnak nevezzük./ Viszont a $\frac{dV}{dt}$ hányados nem lehet invariáns, mert dt változik a koordinátatranszformációnál. Nézzük meg, hogy dt -t mivel kell szoroznunk, hogy invariáns mennyiséget kapjunk? Tudjuk, hogy $ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2 dt^2$, valamint $\left(\frac{ds}{dt}\right)^2 = v^2 - c^2$ invariánsok /ld. (1a)-t/. Ezekből következik, hogy $ds^2 = (c^2 - v^2) dt^2$, illetőleg $\left(\frac{ds}{c dt}\right)^2 = 1 - \frac{v^2}{c^2}$ invariáns. dt -t tehát $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ -tel kell szoroznunk, hogy invariáns mennyiséget kapjunk: $dT = dt \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$. dT -t sajátidőelemnek nevezzük. Ez az az időelem, amelyet a K' -beli, vagyis a K -hoz képest v sebességgel mozgó rendszerbeli megfigyelő mér.

Az elmondottak alapján a Minkowski erővektor /ld. (5)-öt/

$$\bar{F} = \frac{d\bar{P}}{dT} = \frac{d(m_0 \bar{V})}{dT} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \frac{d(m_0 \bar{V})}{dt}, \quad (6a)$$

vagyis komponensekkel

$$\begin{aligned}\bar{\mathbf{F}} &= \left\{ \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \frac{d(mv_x)}{dt} ; \frac{d(mv_y)}{dt} ; \frac{d(mv_z)}{dt} ; i \frac{d(mc)}{dt} \right\} = \\ &= \left\{ \frac{\bar{F}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} ; \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \frac{d}{dt} (imc) \right\} \quad (6b)\end{aligned}$$

ahol $\bar{F} = \frac{d(m\bar{v})}{dt}$ a relativisztikusan általánosított erővektor a 3-dimenziós térben.

e/ A munka és energia

Szorozzuk be a (6a) kifejezést skalárszorzással $\bar{\mathbf{V}}$ -ral:

$$\bar{\mathbf{F}} \cdot \bar{\mathbf{V}} = \frac{d}{dT} (m_0 \bar{\mathbf{V}}) \cdot \bar{\mathbf{V}} = \frac{1}{2} \frac{d}{dT} (m_0 \bar{\mathbf{V}}^2) = \frac{1}{2} \frac{d}{dT} (m_0 i^2 c^2) = 0.$$

Írjuk fel a baloldalt oly módon, hogy a tér- és időkomponenseket szétválasztjuk /az előbbieket r , az utóbbiakat l alsó indexszel jelölve/:

$$\begin{aligned}\bar{\mathbf{F}}_r \cdot \bar{\mathbf{V}}_r + F_l \cdot V_l &= \frac{\bar{F}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cdot \frac{\bar{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} + \\ &+ \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \frac{d}{dT} (imc) \cdot \frac{ic}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = 0.\end{aligned}$$

Ebből

$$\bar{\mathbf{F}} \cdot \bar{\mathbf{V}} = \frac{d(mc^2)}{dt} = \frac{dE}{dt}.$$

$\bar{\mathbf{F}} \cdot \bar{\mathbf{v}}$ az időegység alatt az $\bar{\mathbf{F}}$ erő által végzett munka, amely az időegység alatt bekövetkezett energiaváltozást méri. Az mc^2 mennyiség tehát az m tömegű test összenergiáját adja, vagyis

$$E = mc^2 = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} c^2. \quad (7)$$

Az $E = mc^2$ összefüggés figyelembevételével $\bar{\mathbf{P}}$ negyedik komponense $i \frac{E}{c}$ alakba írható. Ebből a felírásból látható, hogy a relativisztikus mechanikában az energia és impulzus szoros kapcsolatban van egymással.

f/ A relativisztikus mechanika energia kifejezésének vizsgálata.

Fejtsük E fenti kifejezését hatványsorba az

$$\frac{1}{\sqrt{1-x}} = 1 + \frac{1}{2}x + \frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4}x^2 + \frac{1 \cdot 3 \cdot 5}{2 \cdot 4 \cdot 6}x^3 + \dots \quad (|x| < 1)$$

alapján. Ekkor

$$E = m_0 c^2 + \frac{1}{2} m_0 v^2 + \frac{3}{8} m_0 v^2 \left(\frac{v^2}{c^2} \right) + \frac{15}{48} m_0 v^2 \left(\frac{v^2}{c^2} \right)^2 + \dots =$$

$$= E_0 + K$$

ahol $E_0 = m_0 c^2$ a test nyugalmi energiája, és

$$K = \frac{1}{2} m_0 v^2 + \frac{3}{8} m_0 v^2 \left(\frac{v^2}{c^2} \right) + \frac{15}{48} m_0 v^2 \left(\frac{v^2}{c^2} \right)^2 + \dots$$

a test relativisztikus kinetikai energiája.

Amennyiben $v \ll c$, akkor $K \approx \frac{1}{2} m_0 v^2$, vagyis a relativisztikus kinetikai energia formulája a jól ismert kinetikai energia formulájába megy át.

A közelhatástól eltekintve, a relativitáselmélet alapján azt állíthatjuk, hogy egy testnek csupán nyugalmi és mozgási energiája lehet.

Az energia általános definíciója

Ha a közelhatás elvét is figyelembe vesszük, vagyis tekintettel vagyunk arra, hogy egy test a vele nem érintkező másik testre csak valamilyen mező közvetítésével hathat, akkor fel kell tennünk, hogy minden testhez - mint egészhez - elválaszthatatlanul egy /esetleg több komponensből álló/ konzervatív mező is kapcsolódik. Ez esetben a test eddig megismert energiáihoz még ennek a mezőnek E_m energiája is hozzászámítódik, vagyis a mezőjével együtt tekintett test E összenergiája:

$$E = E_0 + K + E_m .$$

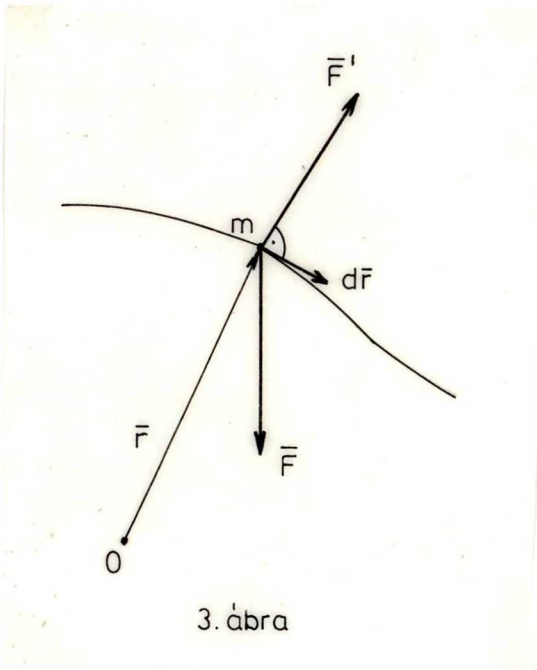
Az eddig látottak alapján tehát az energiát a következőképpen lehet definiálni:

egy rendszer bármely állapotához hozzárendelhető egy olyan extenzív skalárfüggvény, amely a rendszer spontán bekövetkező változásainál állandó marad. Ez a skalárfüggvény, mint látjuk, minden esetben három tagból, a három alapvető energiatípusból

additive tevődik össze. Ez a három alapvető energiatípus: a /nyugalmi/ tömegenergia, a kinetikai energia, és a mezőenergia. A nyugalmi tömegenergiát kivéve mindegyik alapvető energiatípus több energiafajtát tartalmazhat. Például a kinetikai energia tartalmazhatja a rendszer egészének haladó mozgásához, és a rendszer egészének forgó mozgásához tartozó kinetikai energiát. A mezőenergia fogalmába az összes lehetséges mezők energiája, valamint a bizonyos szempontból speciális mezőenergiák /kémiai-, magenergiák, van der Waals energiák, stb./ tartoznak. Fontos szerepet kap a fizikában a mindig mérhető mezőenergia-változás, amely - mint majd látni fogjuk - a "helyzeti energia-fogalom" elvileg tisztább megfelelője.

IV. A MUNKA ÉS AZ ENERGIA KAPCSOLATA

Legyen adott egy m tömegű tömegpont, amely súrlódás nélkül kényszerpályán halad $v \ll c$ sebességgel. Az m tömegpontra ható szabaderők eredője legyen $\vec{F}$, a kényszererők eredőjét pedig $\vec{F}'$ jelölje /3. ábra/. Egy adott időpillanatban az m tömeg-



pont tömegközéppontjának helyét az O ponthoz viszonyítva az $\vec{r}$ helyvektor mutatja, dt idő alatt a tömegközéppont $d\vec{r}$ elmozdulást végez. Az előzőek alapján az m tömegpontnak kinetikai, nyugalmi és mezőenergiája van. Legyen m mozgása olyan, hogy közben sem nyugalmi-, sem mezőenergiája ne változzék, azaz $E_0 + E_m =$

= konst. Számítsuk ki a test kinetikai energiájának dt idő alatti megváltozását. A dt időt válasszuk olyan kicsinek, hogy ezen dt idő alatt a test tömegközéppontjának mozgására jó közelítéssel a következők teljesüljenek: $ds \approx |d\vec{r}|$ és $ds \approx vdt$, illetve $d\vec{r} \approx vdt$.

A kinetikai energia megváltozása:

$$dK = d\left(\frac{1}{2} m_0 \bar{v}^2\right) = m_0 \bar{v} \cdot d\bar{v}.$$

Vegyük figyelembe, hogy a tömegpont impulzusának /lendületének/ megváltozása $d\bar{p} = m_0 d\bar{v}$, és írjuk ezt be a fenti egyenletbe:

$$dK = m_0 \bar{v} \cdot d\bar{v} = d\bar{p} \cdot \bar{v} = \frac{d\bar{p}}{dt} \cdot \bar{v} dt = (\bar{F} + \bar{F}') \cdot d\bar{r} =$$

$$= \bar{F} \cdot d\bar{r} + \bar{F}' \cdot d\bar{r} = \bar{F} \cdot d\bar{r} = F \cdot ds \cdot \cos(\bar{F}, d\bar{r}) =$$

$$= F_s ds = dW.$$

Ebből a véges úton bekövetkező kinetikai energiaváltozás:

$$K_2 - K_1 = \int_1^2 \bar{F} \cdot d\bar{r} = \int_1^2 F_s ds = W_{2,1}. \quad (8)$$

Ebből az egyenletből a következőket olvashatjuk ki: a kinetikai energia változását általános esetben az erővektor vonalintegrálja, vagy speciális esetben az erő út irányába eső komponensének az úttal való szorzata adja. Ezt a mennyiséget, vagyis az erő útintegrálját, az erő munkájának nevezzük. A kinetikai energia megváltozását tehát a tömegpontra ható erők eredőjének munkája méri. Egész általánosan kimondhatjuk, hogy

a munka azt az energiaváltozást méri, amely energiaváltozás erőhatás és elmozdulás közben jön létre. Ebből a megfogalmazásból az is kiolvasható, hogy nem minden energiaváltozást lehet munkával mérni. Az energia tehát általánosabb fogalom, mint a munka. Ezért nem helyes, ha az energiát munkával, vagyis egy általánosabb fogalmat egy szűkebb körű fogalommal definiálunk.

Visszatérve a (8) egyenletre: ha $\int_1^2 \vec{F} \cdot d\vec{r} > 0$, vagyis ha az anyagi pontra ható erők /pozitív/ munkát végeznek az anyagi ponton, akkor az anyagi pont kinetikai energiája növekszik $/K_2 - K_1 > 0/$. Ha viszont a tömegpontra ható erők munkája negatív, /vagyis a kölcsönható partner végez pozitív munkát/, akkor a tömegpont energiája csökken $/K_2 - K_1 < 0/$.

Ebből a gondolatmenetből általánosítva azt mondhatjuk, hogy ha egy test vagy mező pozitív munkát végez, akkor a testnek vagy mezőnek az energiája csökken, ugyanakkor a partner energiája növekszik. A munkavégzés tehát egy folyamat, amelynek az az egyik legfontosabb jellemzője, hogy energiaváltozással jár.

A mező munkájával kapcsolatosan a következőket szükséges megjegyeznünk. Ha valamilyen mezőbe egy, a mezővel kölcsönhatásba lépő testet viszünk, e test a mezőt "torzítja". Ez a kifejezés azt jelenti, hogy a mezőre a test mezője szuperponálódik, és közös mező alakul ki, amely közös mező különbözik az

eredeti mezőtől. Ha a test a mező hatására elmozdul, akkor a közös mező végez munkát és a közös mező energiája csökken. A mondottak megvilágítására szolgáljon a következő gondolati példa: tekintsünk egy elegendően nagy felületű lapkondenzátort, amelynek pl. a negatív töltésű lapján egy - a lap felületéhez képest kicsiny - lyuk van. Ha a kondenzátort elektromosan feltöltjük, a lapok között homogén elektromos mező alakul ki. Hozzunk ebbe a mezőbe egy kisméretű, pozitív elektromos töltéssel bíró testet /próbatestet/. Ekkor a kondenzátorlapok között a kondenzátor és a töltött test közös mezője alakul ki, amely már nem lesz többé homogén. Tegyük fel, hogy a mező hatására a negatív töltésű kondenzátorlap felé elmozduló próbatest éppen a lyuk felé halad, és azon átlépve gyakorlatilag kikerül a mezőből. A kondenzátorlapok közötti mező ugyanolyan lett, mint amilyen a próbatest behozatala előtt volt. Ugyanakkor a próbatest kinetikus energiára tett szert. Ez a kinetikus energia a közös mező és a homogén mező energiakülönbségével egyenlő. A gyorsítási munkát a töltött testen minden esetben a közös mező végzi, bár kis elektromos töltéssel bíró testeknek relative erős mezőkben történő mozgását gyakran tárgyaljuk úgy, mintha e mozgást egymagában az erős mező hozta volna létre. Ez az egyszerűsítő kép különösen a matematikai számításoknál lényeges könnyítést jelent, és e miatt igen sokszor alkalmazást nyer.

V. KÖLCSÖNHATÁSI ENERGIA - POTENCIÁLIS ENERGIA

A III. fejezetben az elektromágneses mezők jellemzésénél már szó volt arról, hogy a mezők szuperpozíciójakor felépít egy ún. interferencia-tag is. Foglalkozzunk most ezen interferencia-tag jelentésével. Az egyszerűség céljából elektrosztatikus mezők szuperpozícióját vizsgáljuk.

Tekintsünk két kis méretű pozitív Q_1, Q_2 töltést, amelyek kezdetben végtelen távolságra vannak egymástól. A nagy távolság miatt egymásra kifejtett hatásuk gyakorlatilag zérus. Tegyük fel, hogy mindkét töltés nyugszik, azaz kinetikai energiájuk zérus. Legyen továbbá E_{o1} ill. E_{o2} a két töltés nyugalmi tömegenergiája. Ha $\vec{E}_1$ ill. $\vec{E}_2$ a Q_1 , ill. Q_2 által létrehozott elektrosztatikus mező térerőssége, akkor E_1 ill. E_2 -vel jelölve a két töltés összenergiáját, azok nagysága: $E_1 = E_{o1} + \int \frac{1}{2} k \vec{E}_1^2 dV$, illetve $E_2 = E_{o2} + \int \frac{1}{2} k \vec{E}_2^2 dV$, ahol az integrálás az egész térre értendő. A két test energiájának összege:

$$E = E_1 + E_2 = E_{o1} + E_{o2} + \int \frac{1}{2} k (\vec{E}_1^2 + \vec{E}_2^2) dV. \quad (9)$$

Csökkentsük a töltések közötti távolságot olyan lassan, hogy a töltések kinetikus energiája a közelítés közben is zérus maradjon /kvázisztatikus állapotváltozás/. Ekkor a két töltés egymással kölcsönhatásba kerül, mezőik közös mezővé egyesülnek. Ez esetben a két test - továbbiakban rendszer - összenergiája:

$$\begin{aligned}
 E &= E_{01} + E_{02} + \int_{\infty} k/\bar{E}_1 + \bar{E}_2^2 dV = \\
 &= E_{01} + E_{02} + \int_{\infty} k/\bar{E}_1^2 + \bar{E}_2^2 + 2\bar{E}_1\bar{E}_2/dV. \quad (10)
 \end{aligned}$$

Ez utóbbi egyenletet összehasonlítva a (9)-cel látható, hogy a mezőenergia megváltozása a testek kölcsönhatásba lépésekor $\int_{\infty} 2k\bar{E}_1 \cdot \bar{E}_2 dV$ nagyságú. Mivel az energiaváltozás erőhatás és elmozdulás mellett következett be, az energiaváltozást a töltéseken támadó erők eredőjének a munkája méri. A töltések mozgása közben végzett munka attól függ, hogy milyen távolságra került egymástól a két töltés. Más és más helyre elmozdítva a töltés/eket, más és más lesz az $\int_{\infty} 2k\bar{E}_1 \cdot \bar{E}_2 dV$ érték. Általánosítva: a mezőenergia megváltozása, vagyis a $\int_{\infty} 2k\bar{E}_1 \cdot \bar{E}_2 dV$ érték, a két töltésből álló rendszer különböző konfigurációjában más és más. Ez a tény lehetőséget ad arra, hogy a rendszer bármely konfigurációjához definiáljunk egy energiát, a kölcsönhatási energiát. A kölcsönhatási energia az a mezőenergiaváltozás, amely a rendszer egy tetszős szerinti alapkonfigurációjából a kérdéses konfigurációba történő átmeneténél következik be. A kölcsönhatási energiának ez a definíciója feltételezi, hogy a kölcsönhatást létesítő mező konzervatív, azaz a konfigurációváltozás közben fellépő energiaváltozás független attól az úttól, amelyen a tömegpont a kiindulási konfigurációból a kérdéses konfigurációba jut. Ilymódon a nem konzervatív mezőkre kölcsönhatási energiát nem lehet definiálni.

A következőkben foglalkozunk egy kicsit részletesebben a kölcsönhatási energiával. Meggondolásainkat először ismét két tömegpontból álló rendszerre végezzük, amely rendszerbe a két tömegponton kívül a köztük kölcsönhatást létesítő konzervatív mezőt is beleszámítjuk. Ha kiindulási konfigurációnak ismét azt a /gondolati/ konfigurációt választjuk, amelyben a két tömegpont végtelen távol van egymástól és sebességük zérus $K_1 = K_2 = 0$, akkor a rendszer energiája - mint láttuk -

$$E = E_{o1} + E_{o2} + E_{m_1\infty} + E_{m_2\infty},$$

ahol E_{o1} ill. E_{o2} az első, ill. a második tömegpont nyugalmi tömegenergiája, $E_{m_1\infty}$, ill. $E_{m_2\infty}$ az első, ill. a második tömegpont által létesített mező energiája.

Menjen át a rendszer ebből a kiindulási konfigurációból kvázisztatikusan egy tetszés szerinti konfigurációba úgy, hogy közben ne változzék egyik tömegpontnak sem a nyugalmi energiája. Ebben a másik konfigurációban - jelöljük A-val - a rendszer összenergiája:

$$E_A = E_{o1} + E_{o2} + E_{mA} \neq E.$$

A konfiguráció megváltozása miatt bekövetkezett mezőenergia-változás:

$$E_{mA} - [E_{m_1\infty} + E_{m_2\infty}] = E_A - E = U_A \quad (11)$$

Ezt az energiaváltozást nevezzük - definíció szerint - a rendszer A-val jelzett konfigurációjához tartozó U_A kölcsönhatási energiájának. Egy konfiguráció kölcsönhatási energiája tehát az adott konfiguráció és a kiindulási /viszonyítási/ konfiguráció mezőenergiájának különbsége:

$$U_A = E_{mA} - [E_{m_1\infty} + E_{m_2\infty}] / . \quad (11a)$$

A kölcsönhatási energia ilyen módon történő megadásánál nem kell feltételeznünk a kvázisztatikus átmenetet, hiszen a mezőenergia értéke csupán a rendszer konfigurációjának a függvénye és független attól, hogyan kerül a rendszer ebbe a konfigurációba. Ugyanakkor viszont mindig fel kell tételeznünk, hogy a rendszert alkotó testek nyugalmi tömegenergiája változatlan, vagyis a konfigurációváltozás közben magreakciók nem játszódnak le. Ezt a feltételt, ha csak nem mondjuk az ellenkezőjét, mindig teljesültnek vesszük.

A kölcsönhatási energia (11) alapján azonban másképpen is megadható. Az A konfigurációhoz tartozó U_A kölcsönhatási energia egyenlő a rendszer azon energiaváltozásával, amely a kiindulási konfigurációból az A konfigurációba való átmenetnél lép fel, ha ez az átmenet a mezőenergia változásán kívül más energiaváltozással nem jár:

$$U_A = E_A - E .$$

A kölcsönhatási energia ezen definíciója felhívja a figyelmet arra, hogy a kölcsönhatási energia mindig rendszerhez kapcsolódó energia. Egyetlen anyagi pontnak - amely semmiféle más testtel nincs kölcsönhatásban - nincsen kölcsönhatási energiája.

A következőkben a kölcsönhatási energiát a mezőenergia különbségével fogjuk általában definiálni.

További megállapítások céljából a tekintett rendszer a kiindulási konfigurációból menjen át egy másik, A-tól különböző B-vel, ill. C-vel jelzett konfigurációba. A rendszernek a B, ill. C konfigurációjához tartozó kölcsönhatási energiája:

$$U_B = E_{mB} - /E_{m_1\infty} + E_{m_2\infty}/ ; \quad U_C = E_{mC} - /E_{m_1\infty} + E_{m_2\infty}/ \quad (12a-b)$$

Ha kivonjuk (12a)-ból a (11a)-t, ill. (12b)-ből (12a)-t kapjuk:

$$U_B - U_A = E_{mB} - E_{mA} , \text{ ill. } U_C - U_B = E_{mC} - E_{mB} , \quad (13a-b)$$

azaz a rendszer két tetszés szerinti konfigurációjához tartozó kölcsönhatási energiák különbsége egyenlő a két konfigurációhoz tartozó mezőenergia különbségével.

A fentiekből két fontos megállapítást tehetünk. Az egyik: a kiindulási /viszonyítási/ konfiguráció, melynek mezőenergiájához viszonyítjuk egy-egy adott konfiguráció mezőenergiáját,

tetszés szerinti lehet. Ha megváltoztatjuk a viszonyítási konfigurációt, más lesz ugyan az egyes konfigurációk kölcsönhatási energiája, de a kölcsönhatási energiák különbsége - a gyakorlatban mindig ezzel dolgozunk - független a viszonyítási konfiguráció választásától. Az elmondottakat a következő példával világítjuk meg: legyen a kiindulási konfiguráció az A-val jelzett. Ekkor (11a) alapján a B konfiguráció kölcsönhatási energiája

$$U_B^x = E_{mB} - E_{mA} .$$

U_B^x nyilván nem egyenlő a (12a) alatti U_B -vel, hiszen

$$E_{mA} \neq E_{m_1\infty} + E_{m_2\infty} .$$

$$U_C^x = E_{mC} - E_{mA} \neq U_C .$$

$$U_C^x - U_B^x = E_{mC} - E_{mB} = U_C - U_B .$$

Mivel a viszonyítási konfigurációt tetszés szerint választhatjuk, azért a kölcsönhatási energia csak egy additív állandó erejéig meghatározott.

A másik fontos megállapítás: a viszonyítási konfigurációnak önmagára vonatkoztatott kölcsönhatási energiája zérus:

$$U_A^x = E_{mA} - E_{mA} = 0 .$$

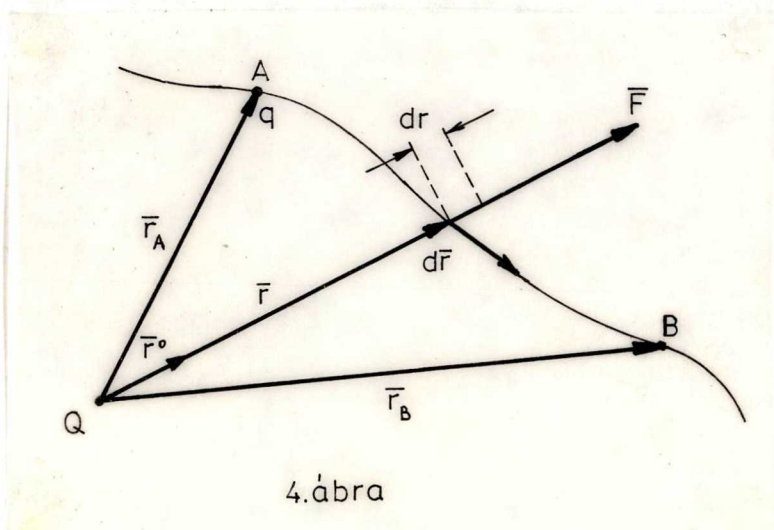


A mezőenergiát általában nem tudjuk meghatározni, de a (13a-b) egyenletek lehetőséget adnak arra, hogy a mezőenergia megváltozását a kiszámítható kölcsönhatási energia változásából határozzuk meg.

A két tömegpontra elmondottakat könnyen általánosíthatjuk tetszés szerinti számú tömegpontból álló rendszerre is, hiszen a kettőnél több tömegpontból álló rendszer bármely konfigurációját előállíthatjuk úgy, hogy a kiindulási konfigurációból először az első tömegpontot visszük az előállítani kívánt elrendeződésben meghatározott helyére, majd a második tömegpontot mozdítjuk el, és így tovább. Ezt folytatjuk mindaddig, míg a rendszert alkotó összes részecske el nem jut a kiindulási konfigurációban elfoglalt helyéről az előállítani kívánt konfigurációban meghatározott helyére. Minden részecske elmozdításakor megváltozik a mezőenergia, és ezen változások algebrai összege adja a rendszer kiindulási konfigurációjából a kérdéses konfigurációba történő átmenetnél fellépő mezőenergiaváltozást, azaz a rendszer utóbbi elrendeződését jellemző kölcsönhatási energiát.

Számítsuk ki egy pozitív Q töltésből és egy pozitív q próbatöltésből, valamint a közöttük lévő, kölcsönhatást létesítő elektrosztatikus mezőből álló rendszer kölcsönhatási energiáját. Válasszuk a Q töltést olyan nagynak, hogy a próbatöltés elektromos mezője, Q elektromos mezőjéhez képest, elhanyagolható

legyen, továbbá q mozgatasakor Q ne mozduljon el. A töltések között működő gravitációs erők legyenek elhanyagolhatóak az elektromos erőkhez képest. A rendszer A konfigurációjában legyen q r_A távolságban Q -tól, a B konfigurációban a két töltés



távolsága legyen r_B . A konfigurációváltozáshoz tartozó mező-energia-változás kiszámítása céljából mozgassa egy külső erőhatás kvázisztatikusan a q töltést A-ból B-be. A külső erő munkája a mező energiaváltozását adja. Ha ez a munka pozitív, akkor a folyamat közben a mező energiája növekszik, ha negatív, akkor a mező energiája csökken. Számítsuk ki a külső erő munkáját, míg q kvázisztatikusan A-ból B-be jut. A q töltésre a 4. ábrán látható út bármely pontjában $\vec{F} = -\vec{E}q = -k \frac{Qq}{r^2} \vec{r}^0$ külső erő hat, ahol $\vec{r}^0$ a kérdéses pontban a q -hoz húzott $\vec{r}$

helyzetvektor irányába mutató egységvektor. Az erő munkája $d\vec{r}$ elemi elmozdulás esetén:

$$\begin{aligned} dW = \vec{F} \cdot d\vec{r} &= -k \frac{qQ}{r^2} \vec{r}^0 \cdot d\vec{r} = -k \frac{qQ}{r^2} |\vec{r}^0| |d\vec{r}| \cos \angle \vec{r}^0, d\vec{r} / = \\ &= -k \frac{qQ}{r^2} dr . \end{aligned}$$

Miközben a q töltés az A pontból B-be jut, a külső erő munkája:

$$\begin{aligned} W_{B,A} &= - \int_{r_A}^{r_B} k \frac{Qq}{r^2} dr = kQq \left[\frac{1}{r_B} - \frac{1}{r_A} \right] = k \frac{Qq}{r_B} - k \frac{Qq}{r_A} = \\ &= U_B - U_A . \end{aligned}$$

A rendszer kölcsönhatási energiájának megváltozása, miközben a q töltést kvázisztatikusan az A pontból a B-be juttattuk:

$$U_B - U_A = kQq \left[\frac{1}{r_B} - \frac{1}{r_A} \right] . \quad (14)$$

Ebből általában mondhatjuk, hogy a Q töltés-elektromos mező- q próbatöltés rendszer kölcsönhatási energiája egy tetszős szerinti P pontban:

$$U_P = kQq \frac{1}{r_P} . \quad (15)$$

U_P kifejezéséből az is látható, hogy az $U_P = 0$ -val jellemezhető

kiindulási konfigurációban a q a rögzített Q töltéstől végtelen távol van. A (14) és (15) egyenleteket vizsgálva mondhatjuk, hogy a töltés-elektromos mező-próbatest rendszer kölcsönhatási energiája, illetve kölcsönhatási energiájának megváltozása egyenlő a " Q töltés terébe helyezett q töltés potenciális energiájával", illetve a " Q töltés terében A -tól B -ig elmozdított q próbatöltés potenciális energiájának megváltozásával". A megegyezés nem véletlen, mert ha a potenciális energiát helyesen értelmezzük, az a kölcsönhatási energia egy speciális eseteként fogható fel. A potenciális energia helyes értelmezése azt jelenti, hogy a potenciális energiát mindig egy rendszerhez, nem pedig a rendszer egyik test-tagjához kötjük. A potenciális energia próbatesthez kapcsolásának helytelensége nyilvánvalóvá válik, ha meggondoljuk a következőket. A q töltés mozduljon el Q mezőjének hatására kvázisztatikusan s úton. Ez a kvázisztatikus elmozdulás csak úgy lehetséges, hogy egy külső erő q pályájának minden pontján kiegyensúlyozza az elektromos mezőnek q -ra kifejtett erőhatását. Az s út befutása közben a mező a külső erő ellenében munkát végez, de úgy, hogy közben sem a Q , sem a q töltés energiája nem változik. /Egy testnek ugyanis csak nyugalmi tömegenergiája és kinetikus energiája van, és ezek egyike sem változott a folyamat közben. A közös mező a rendszer tagja, egyik testhez sem rendelhető. /Minek az energiája változott

akkor? E kérdésre vagy az a válasz, hogy a munkát végző mező energiája, vagy az, hogy a rendszer energiája változott. Ez utóbbi alapján esetünkben tehát azt mondhatjuk, hogy a potenciális energia az a rendszerenergia-változás, amely a q próbatöltés kvázisztatikus helyzetváltoztatása közben következik be. Ebből láthatóan a helyesen értelmezett potenciális energia megegyezik a kölcsönhatási energiával. Az általunk tárgyalt eset annyiban speciális, hogy a konfigurációváltozásnál csak q mozog.

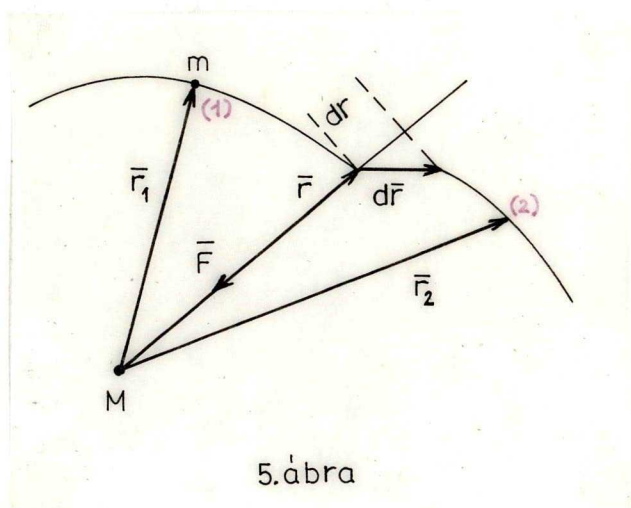
Második példaként számítsuk ki a Földből és egy m tömegű testből, valamint a közöttük kölcsönhatást létesítő gravitációs mezőből álló rendszer kölcsönhatási energiáját. Ha M a Föld, m a próbatest tömege, $M \gg m$ miatt feltehetjük, hogy m gravitációs mezője nem befolyásolja a Föld gravitációs mezőjét, valamint m mozgása során M nem változtatja meg a helyét. A nyugvónak tekintett Föld tömegközéppontja legyen a kiindulási konfigurációban az m tömegtől r_1 , a másik konfigurációban pedig r_2 távolságban /5. ábra/. Az (1) konfigurációból a (2)-be a rendszer kvázisztatikusan menjen át, ekkor a kölcsönhatási energiaváltozás a külső erő /a Föld gravitációs mezője által m -re kifejtett erő (-1) -szerese/ munkájával egyenlő. A külső erő munkája, míg a rendszer az (1) konfigurációból a (2)-be jut:

$$W_{21} = \int_{r_1}^{r_2} f \frac{Mm}{r^2} dr = -f \frac{Mm}{r_2} + f \frac{Mm}{r_1} = U_2 - U_1 .$$

A rendszer tetszés szerinti pontjában a kölcsönhatási energia:

$$U_p = - f \frac{Mm}{r_p} . \quad (16)$$

Az elektromos kölcsönhatási energia kifejezésével összehasonlítva ez utóbbi egyenletet, az a különbség tűnik szembe, hogy a Föld-gravitációs mező-próbatest rendszer kölcsönhatási energiája negatív értékeket felvéve növekszik akkor, ha a Föld tömegközéppontjának és a próbatestnek a távolsága nő. E kölcsön-



hatási energia maximális értéke zérus. Ezt akkor éri el a rendszer, ha a próbatest távolsága a Föld tömegközéppontjától végtelen nagy. A rendszernek ezen konfigurációját szokták "természetes" viszonyítási konfigurációnak nevezni.

Mivel a kölcsönhatási energia csak egy additív állandó erejéig meghatározott, a természetes viszonyítási konfigurációnak választhatjuk azt az elrendeződést, amikor az m tömeg a

Föld felszínén van, azaz M és m távolsága éppen földsugárnyi $/R/$. Ez a választás azért is célszerű, mert így elkerülhetjük a negatív energiaértékeket. Megegyezés szerint tehát:

$$U'/R/ = 0, \quad U'/r/ = -f \frac{Mm}{r} + f \frac{Mm}{R}.$$

Tekintsük továbbra is a Föld - gravitációs mező - m tömegű próbatest rendszert. Számítsuk ki a rendszer kölcsönhatási energiáját abban a konfigurációban, amelyben a m tömeg a Föld felszínétől számított h magasságra van, azaz számítsuk ki $U'/R + h/$ értéket:

$$\begin{aligned} U'/R + h/ &= -f \frac{Mm}{R + h} + f \frac{Mm}{R} = \\ &= \frac{fMmh}{R/R + h/} \end{aligned}$$

Tekintettel arra, hogy R a Föld sugara, és $R \gg h$, az $R/R + h/ \approx R^2$. Az $f \frac{M}{R^2}$ mennyiség helyébe a g nehézségi gyorsulást írva kapjuk:

$$U'/R + h/ = fm h \frac{M}{R^2} = mgh. \quad (17)$$

Ez az egyenlet azt mutatja, hogy a Föld - gravitációs mező -
- próbatest rendszer kölcsönhatási energiája egyenlő azzal a

mennyiséggel, amelyet a köznapi nyelv, és a könyvek legnagyobb része az m tömeg gravitációs helyzeti /potenciális/ energiájának nevez.

Ezzel kapcsolatosan itt is elmondhatjuk azt, amit az első példánk végén már elmondtunk: a helyesen értelmezett gravitációs helyzeti /potenciális/ energia a kölcsönhatási energia egy speciális eseteként tekinthető. A $m \ll M$ miatt ugyanis M és m konfigurációját meghatározó r változása csupán m helyének változásától függ. A kölcsönhatási energia tehát csak m -nek M -hez viszonyított helyzetétől függ. Ha tehát a " m helyzeti energiája" kifejezésen azt értjük, hogy ez a tekintett rendszernek a próbatest helyétől függő energiája, akkor e kifejezés ellen nem lehet semmi kifogás. Az így értelmezett helyzeti energia ugyanis a rendszer energiáját jelenti, és ez az értelmezés - mint látható - a két tömegpont és a /közös/ gravitációs mező kölcsönhatási energiáját jelenti $M \gg m$ speciális esetre. Ha viszont az " m helyzeti energiája" kifejezésen azt értjük, hogy az energia birtokosa az m tömegű test, akkor elvileg hibázunk. Ez a hibalehetőség - amennyiben "egy test helyzeti energiájá"-ról beszélünk - igen nagy, hiszen a kifejezés egyértelműen az m tömegű testet jelöli meg az energia birtokosaként. A félreértési lehetőséget csökkenti, ha a helyzeti /potenciális/ energia helyett a rendszerre - vagyis testek és mezők kölcsönható együttesére - utaló kölcsön-

hatási energia elnevezést vezetjük be. Ennek az elnevezésnek további előnye, hogy implicite utal a közelhatás elvére, hiszen kölcsönhatás csak egymással érintkező objektumok - amelyek vagy testek vagy mezők - között lehet. Annak megmutatása pedig, hogy a rendszer konfigurációjához kötött energiaváltozás éppen a mező energiaváltozása, a kérdéses fizikai jelenség mélyebb lényegébe enged szemléletes bepillantást. Ezen megfontolások alapján célszerűnek látszana, ha a fizika-könyvek a "potenciális energia", "helyzeti energia" kifejezést a "kölcsönhatási energia" kifejezéssel cserélnék fel.

VI. A BELSŐ ENERGIA. A BELSŐ ENERGIA MEGVÁLTOZÁSA.

A HŐMENNYISÉG

Szólnunk kell az energia egy másik fontos típusáról, a belső energiáról is. Egy makroszkópikus test belső energiáján a test azon energiáját értjük, amely kizárólag a test belső állapotától függ. Ezt az energiát úgy határozhatjuk meg, hogy a test összes energiájából $/E/$ levonjuk a testnek, mint egésznek a kinetikus energiáját $/K/$, valamint a test körüli mező energiáját $/E_m/$:

$$E - K - E_m = m_0 c^2 + K + E_m - K - E_m = m_0 c^2.$$

A test belső energiáját tehát a test nyugalmi tömegenergiája adja. A nyugalmi tömegenergia nyilván a testet alkotó részecskék nyugalmi energiáinak összegéből, a részecskék rendezetlen mozgásából /haladó, forgó-, és rezgőmozgásából/ adódó mozgási energiák összegéből, valamint a testet alkotó részecskék közötti kölcsönhatást létesítő mező/ k / energiájának /energiáinak/ összegéből tevődik össze. Ez alapján

$$E_0 = m_0 c^2 = \sum_{i=1}^N E_0^{(i)} + K_0 + E_{0m}, \quad (18)$$

ahol m_0 a test egészének azon inerciarendszerben mért tömege,

amelyben a test nyugszik /nyugalmi tömeg/, c a fény vákuumbeli terjedési sebessége, $E_o^{(i)}$ a testet alkotó i -dik részecske nyugalmi energiája $/E_o^{(i)} = m_o^{(i)} c^2/$, K_o a test részecskéinek rendezetlen mozgásából származó mozgási energiák összege, E_{om} a részecskék közötti kölcsönhatást létesítő mező/k/ energiája, N a testet alkotó részecskék száma.

Az egyenletből közvetlenül adódik a tömeg és az energia egyenértékűsége. Az $E_o = m_o c^2$ alapján mondhatjuk, hogy ha változik egy test nyugalmi tömege, akkor a belső energiája is szükségképpen változást szenved és fordítva, a belső energia megváltozása okvetlenül maga után vonja a nyugalmi tömeg értékének megváltozását. Elosztva a (18) egyenletet c^2 -tel, kapjuk

$$\frac{E_o}{c^2} = m_o = \sum_{i=1}^N \frac{E_o^{(i)}}{c^2} + \frac{1}{c^2} / K_o + E_{om} /.$$

Vegyük figyelembe, hogy $\frac{E_o^{(i)}}{c^2} = m_o^{(i)}$, ekkor

$$m_o = \sum_{i=1}^N m_o^{(i)} + \frac{1}{c^2} / K_o + E_{om} /.$$

Ez utóbbi egyenlet szerint egy test nyugalmi tömege az őt alkotó részecskék nyugalmi tömegénél több, mégpedig olyan nagyságú tömeggel, amekkora tömeget képvisel a testet alkotó részecskék



kinetikus energiájának összege és a részecskék kölcsönhatását létesítő mező energiája.

Vegyük sorra azokat a folyamatokat, amelyek során a test belső energiája megváltozhat:

a/ A nyugalomban lévő testen munkavégzés történik:

- Ha a munka ún. deformációs munka, akkor megváltozik a testet alkotó részecskék egymáshoz viszonyított helyzete. A konfiguráció megváltozása a részecskék közötti kölcsönhatást létesítő mező energiájának megváltozását jelenti. Deformáció esetén a test belső energiájának $/E_0/$ megváltozását túlnyomórészt a mezőenergia $/E_{om}/$ értékének megváltozása okozza.
- Ha a munka súrlódási munka - de a munkavégzés nem okoz halmazállapotváltozást -, akkor a munkavégzéssel együttjáró testhőmérséklet-emelkedés jelzi a testet alkotó részecskék átlagos kinetikai energiájának növekedését. A belső energia növekedését ez esetben K_0 növekedése okozza.
- Ha a súrlódási munka halmazállapotváltozással jár, a belső energia megváltozását ismét a mezőenergia megváltozása okozza. Halmazállapotváltozáskor ugyanis megváltozik a test részecske-szerkezete, ami a részecskék kölcsönhatását biztosító mező energiájának megváltozásával jár.

Mindhárom esetben a végzett munka egyenlő a belső energia növekedésével, vagyis ezt a munkát a belső energia megváltozása mértékeként tekinthetjük. E₀ ezen változásaihoz kapcsolódó tömegváltozás mérhetetlenül kicsi.

b/ A test termikus kölcsönhatásban vesz részt.

Termikus kölcsönhatás esetén megváltozhat a test hőmérséklete vagy a halmazállapota. Hőmérsékletváltozás esetén a belső energia megváltozását a test részecskéinek mozgásából adódó kinetikus energiák változása okozza. Halmazállapotváltozásnál a belső energia változása a mezőenergia változásának következménye - mint azt már az előző pontban láttuk. A termikus kölcsönhatásnál bekövetkező tömegváltozás is sokkal kisebb, mint amekkorát ki tudunk jelenlegi mérőeszközeinkkel mutatni.

c/ A testben kémiai reakciók játszódnak le.

A kémiai reakciókban a testet alkotó részecskék szétválása vagy összeépülése következik be. Mindkét esetben a belső energia megváltozását a mezőenergia változása okozza. A kémiai reakciókban a mezőenergia megváltozása mindig maga után vonja a testet alkotó részek kinetikus energiájának megváltozását, esetleg a részecskemozgás természetének a megváltozását is.

A kémiai reakciók tehát minden esetben hőmérséklet-változással, és gyakran halmazállapotváltozással járnak együtt. A mezőenergia megváltozásának nagyságára éppen a kémiai reakciókat kísérő hőmérséklet- ill. halmazállapotváltozásokból következtethetünk. A kémiában a kémiai reakciók során bekövetkező belső energiaváltozást sokszor önálló energiafajtnak tekintik és kémiai energiának nevezik. A kémiai energiával kapcsolatos tömegváltozás sem mutatható ki mai eszközeinkkel.

d/ A testben magreakciók játszódnak le.

Magreakciók esetén a test belső energiájának nagymértékű változását elsődlegesen a részecskék nyugalmi energiájának változása okozza. A nyugalmi energia megváltozását a test hőmérsékletének, halmazállapotának megváltozása, igen sokszor a testnek részecskékre való szétesése, a részecskék természetének megváltozása jelzi. Magreakciók lejátszódásánál a belső energia változásával kapcsolatos tömegváltozás már mérhető, és éppen a tömegváltozás megméréssel tudjuk a belső energia megváltozását meghatározni.

A d/ alatti esetet - melynél a legtöbbször a test szétesik, megszűnik létezni - kizárva, a test belső energiájának változásáról összefoglalóan a következőket mondhatjuk:

ha egy test belső energiájának növekedése munkavégzés folyamatában következett be /kizárva a test egészének kinetikus energia növekedésével járó gyorsítási munkavégzést/, a belső energia növekedésének mértéke a testen végzett munka /teljes összhangban a munka definíciójával/. Ez a munka lehet negatív is, ekkor a test végez munkát a környezetén, amely munka nagysága megadja a test belső energiájának csökkenését.

Ha a test belső energiájának változása termikus kölcsönhatás során jön létre /mozgásállapotváltozás nélkül bekövetkező kölcsönhatás/, akkor a belső energia-változás értékét hőmennyiségnek nevezzük. A hőmennyiség tehát a belső energia változását megadó fizikai mennyiség. Az ismert meghatározás, mely szerint a hő az energia egyik fajtája, a fizika mai álláspontja szerint helytelen, hiszen csupán egy speciális helyzetben a belső energia változásának értéke.

Ezek szerint a belső energia változásában a termikus kölcsönhatás és a munkavégzés /kizárva a testet, mint egészet, a gyorsító munkát/ két azonos "szintű" folyamat. Míg a termikus kölcsönhatásra a mikroszkópikus részecskék rendezetlen mozgása jellemző, addig a munkavégzést ezen részecskék egyirányú, rendezett mozgása jellemzi. A belső energiának a munkavégzésnél bekövetkező változását a munka,

a termikus kölcsönhatás közben bekövetkező változását pedig a hőmennyiség méri. A mondottakból következik, hogy a test belső energiájának megváltozását a munka és a hőmennyiség összege adja meg:

$$E_0 = W + Q ,$$

ami a termodinamika első főtétele.

VII. A MECHANIKAI ENERGIA MEGMARADÁSÁNAK TÉTELE

Makroszkópikus testek bármely rendszerének teljes energiája a rendszer egy adott konfigurációjában:

$$E = E_0 + K + E_m ,$$

ahol E_0 a rendszert alkotó testek belső energiáinak összege, K a rendszerhez tartozó testek kinetikus energiáinak összege, E_m pedig a rendszertagok közötti kölcsönhatást létesítő mezőnek az adott konfigurációra jellemző energiája. A rendszer tagjai és a környezete között többfajta kölcsönhatás léphet fel, amelynek következtében a rendszer összenergiája változhat. Ha az egyes kölcsönhatásokhoz tartozó elemi energiaváltozásokat $D_i E$ -vel jelöljük, akkor a rendszer teljes energiájának dE megváltozása:

$$dE = \sum_{i=1}^n D_i E$$

ahol n a rendszer és környezete közötti kölcsönhatások száma. Ha például a rendszer és környezete között csupán mechanikai és termikus kölcsönhatás van, akkor a rendszer teljes energiájának megváltozása a munkával és a hővel mért energiaváltozások összege:

$$dE = DW + DQ .$$

Ha a rendszer és környezete között semmiféle kölcsönhatás nincs, azaz a rendszer zárt, akkor

$$dE = 0 ,$$

vagyis zárt rendszer energiája állandó. Ez az energiamegmaradás törvénye. E törvény nem zárja ki a zárt rendszeren belüli energiaváltozásokat, csupán azt mondja, hogy a zárt rendszeren belül olyan energiaváltozások mehetnek végbe, amelyek algebrai összege nulla.

Ha egy zárt rendszerben csak olyan változások mennek végbe, amelyek során a rendszer konfigurációja és a rendszer kinetikai energiája változik meg, akkor az energiamegmaradás tétele:

$$dE = dK + dE_m = dK + dU = 0, \text{ ebből}$$

$$dK = - dU, \text{ vagy}$$

$$K_2 - K_1 = U_1 - U_2 .$$

Az egyenletet átrendezve kapjuk:

$$U_1 + K_1 = U_2 + K_2 .$$

Ez az egyenlet azt mondja ki, hogy ha a zárt konzervatív rendszerben olyan változások mennek végbe, amelyek a rendszer tagjainak konfigurációjában, valamint a kinetikai energiájuk össz-

szegében hoz létre változást, akkor az ilyen változásoknál a rendszer kinetikai és kölcsönhatási energiájának összege változatlan. A kinetikai és kölcsönhatási energia összegét a rendszer mechanikai energiájának nevezzük. A

$$dK = - dU, \text{ illetve } U_1 + K_1 = U_2 + K_2$$

egyenletek a mechanikai energia megmaradásának tételét fejezik ki.

A zárt konzervatív rendszerekre kimondott mechanikai energia megmaradásának tétele csak abban az ideális esetben igaz, amikor a rendszer tagjai súrlódás nélkül végzik mozgásukat. Mivel a valóságban ez nem így van, a valódi rendszerek nem konzervatívok, ezért az előbb felírt törvény csak némi módosítással érvényes rájuk. A valóságos rendszerekre a következő korrigált összefüggés írható fel:

$$K_1 + U_1 = K_2 + U_2 + W_s,$$

ahol W_s a súrlódási munkát jelenti.

VIII. AZ ENERGIA, ÉS AZ ENERGIAVÁLTOZÁS TANÍTÁSÁNAK NÉHÁNY MÓDSZERTANI PROBLÉMÁJA

Az előzőekben megmutattuk, hogy a mező és az energia szoros kapcsolatban állnak egymással, és hogy a mezőenergia fontos szerepet tölt be az energiamérlegek, a közelhatás-elképzelések és a mezők realitásának megértésében. Míg a mezőfogalom jelentőségét a fizika mélyebb megértése céljából senki sem vonja kétségbe, addig nincs egyetértés abban a kérdésben, hogy a mezőfogalom a 10-14 éves tanulók számára tanítható-e? Képesek-e ezek a tanulók a mezőt kölcsönhatásra képes, energiával bíró partnerként felfogni, azt fizikai problémák megoldásában alkalmazni? Az energia, a mező és a mezőenergia szoros egységéről, ezek iskolai oktathatóságáról - többek között - 1979. szeptemberében Koblenzben /NSzK/ konferenciát tartottak [45]. E konferencián részt vevők közül többen az energiafogalomnak, a mezőnek, a mezőenergiának és az energiamegmaradásnak korai bevezetését kívánták, mások viszont aggodalmukat fejezték ki a mezőfogalom elvont volta miatt. Jellemző, hogy ez a konferencia akkor ülésezett, mikor hazánkban már - a korábban lefolytatott kísérletek alapján - 1978. óta folyt az általános iskolák 6. osztályaiban a kölcsönhatás elvére épülő fizika oktatása, amelynek anyagában jelentős szerepet kapott a mezőfogalom és a mezőenergia. A kísérletek és az országos ta-

pasztalatok egyértelműen azt mutatták, hogy a mező és a mező-energia eredményesen oktatható a 11-12 éves tanulóknak [44]. Természetesen a mezőfogalom nem öncélúan került be a tananyagba. A kölcsönhatás elvére épült fizikaoktatásban a mezőt mintegy logikai szükségszerűségből kell bevezetnünk. Azok a tanulók ugyanis, akik abban "nőttek" fel, hogy a változás oka anyagnak anyagra gyakorolt hatása, amely mindig közvetlen érintkezés közben jön létre, minden változás esetén keresik a változást okozó kölcsönható partnert. A gyerekeknek mindennapi tapasztalata, hogy egy test mozgásba hozatalához a testet vagy közvetlenül meg kell lökni, vagy egy másik testtel, pl. kötéllel vagy rúddal kell rá hatni, vagyis "közelhatást" kell rá kifejteni. Ezek a gyerekek mágnesek egymásra hatásakor, vagy pl. egy feldobott labda mozgásakor automatikusan keresik a változást okozó partnert, amely közvetlenül érintkezik a mágnessel, ill. a feldobott testtel. Szükségszerűen, és így erőltetés nélkül vezethető be ekkor a mező fogalma, mint egy olyan kölcsönható partner, amelyet bár érzékszerveinkkel nem érzékelhetünk, de hatásai alapján következtethetünk léteire. Éppen az a körülmény, hogy a kölcsönhatás elve szinte kikövetkeztetni engedi a mező létét, biztosítja azt, hogy a mezőfogalom minden nehézség nélkül válik érthetővé a tanulók számára. Ez a tapasztalat bírta rá azon pedagógusokat, akik 1978-ban aggodalmaskodtak a mező tananyagba iktatása miatt, hogy nézetüket megváltoz-

tassák, és hogy kijelentsék, miszerint a mező tanítása a kölcsönhatásra épülő fizikaoktatásban nemcsak szükséges, hanem eredményesen is megoldható.

Az általános iskolai tananyagban három mezővel, sorrendben az elektromos, a mágneses és a gravitációs mezővel ismerkednek meg a tanulók. E mezőkről lényegében a következő két dolgot tanulják meg:

- a/ a mezők kölcsönhatásba kerülhetnek testekkel, miközben nemcsak a test, hanem a mezők állapota is változik;
- b/ a mezők energiával rendelkeznek, amely energia a kölcsönhatás során változik.

Felmerülhet az a kérdés, hogy szükséges-e a mezőknek energiát tulajdonítanunk? Nem lehetne-e azt elképzelni, hogy a mezőkről úgy beszéljünk, hogy az energiájukról ne szóljunk? Ez a felfogás azonban ugyancsak a kölcsönhatás elvéből következően nem tartható. Ennek belátása céljából gondoljunk arra, hogyan vezetjük be az általános iskolában az energia fogalmát. Kísérletek alapján felismertetjük a tanulókkal a testeknek azt a tulajdonságát, hogy kölcsönhatás közben megváltoztatják más testek állapotát. E tulajdonságot számszerűen az energiának nevezett mennyiséggel lehet megadni. Az energia tehát a testek állapotváltoztató képességének mértéke.

Ilyen előzmények után, ha egy mágnesrúd mezejébe helyezett vasgolyó, vagy a gravitációs mezővel kölcsönhatásba került test

mozgásállapota megváltozik, egyértelmű, hogy a változást az okozta, hogy a test a mezővel kölcsönhatásba került. A mező tehát a vele kölcsönhatásba kerülő test állapotában változást idéz elő, vagyis a mező is rendelkezik változtató képességgel. Ha viszont ezzel a képességgel rendelkezik, akkor a "közönséges" testekhez hasonlóan megadható az a mennyiség, amely számszerűen jellemzi a mező ezen tulajdonságát. Vagyis a mező is rendelkezik energiával.

A mező energiájának oktatására azért is szükség van, mert nélküle már az általános iskolában sem beszélhetünk az energiamegmaradásról. Gondoljuk meg ugyanis a következő két esetet. Egy mozgó golyó ütközzék egy állónak. Az ütközés után az első /mozgó/ golyó mozgása lelassul, a második /kezdetben álló/ golyó pedig mozgásba jön. A kölcsönhatás következtében tehát mindkét golyó /mozgás/ állapota, következésképpen energiája megváltozott. Az első golyó energiája a sebességének csökkenése miatt csökkent, a második golyó energiája nőtt. Általános iskolában - pontos mérésekre hivatkozva - közölni kell, hogy az egyik test energiacsökkenése ugyanakkora, mint a másik test energiájának növekedése. /Ennek beláttatása nyilván nem lehet az általános iskola feladata./ Ezzel két test kölcsönhatására kimondjuk az energiamegmaradás törvényét.

Ezek után tekintsük azt az esetet, amikor egy test a Föld gravitációs mezőjében szabadon esik. A test sebessége az esés során

növekszik, vagyis az energiája a mozgás során nő. Mi fedezi ezt az energianövekedést, ha a kölcsönható partner, a gravitációs mező, nem rendelkezik energiával? /Pontosabban, ha nem tanítjuk a mező energiáját./

Az elmondottakból, azt hiszem, világosan látszik, hogy annak a fizikaoktatásnak, amely a kölcsönhatásra, mint egy fontos alappillérre épül, tanítania kell az energián kívül a mező fogalmát és a mezőenergiát is. Bármelyik fogalom elhallgatása esetén ugyanis olyan logikai törés következik be, amely az anyag értelmes elsajátíthatóságát erősen veszélyezteti.

Röviden utalnék arra is - bár az elmondottakból ez eléggé világos -, hogy a fentiekben említett kölcsönhatási elv nem azonos azzal, amelyet az 1978. előtt oktatott fizikában kölcsönhatásnak neveztek. Ebben a tananyagban ugyanis a kölcsönhatást leredukálták az akció - reakció elvére, amely elvet a kimondása után - a pontmechanika egy-két esetét leszámítva - gyakorlatilag sehol sem használták ki. Az általam jelzett kölcsönhatási elven olyan általános, átfogó elvet értek, amely szerint minden, a természetben végbemenő változás oka a kölcsönhatás. Ez az elv minden természettudományban, és így a fizikában is - mint az élettelen természetben végbemenő változások, jelenségek vizsgálatával foglalkozó tudományban - alapvető szerepet tölt be.

A következő részben röviden ismertetném /helyenként kritikailag értékelve/, hogy az 1978-ban bevezetett általános iskolai tankönyv a kölcsönhatásra alapozottan milyen mélységben és hogyan tárgyalja az energia, a mező és az energiaváltozás problémakörét. Az ismertetést a jelenlegi 6. osztályos tankönyv átdolgozott anyagának alapján végzem [45]. Az átdolgozás elsősorban a tananyag rövidítését, itt-ott könnyítést, és főleg nyelvezetének egyszerűsítését célozza. Ez az átdolgozott tankönyv 1983. szeptemberében váltja fel a jelenlegi tankönyvet.

IX. AZ ENERGIA TANÍTÁSA A MAI ÁLTALÁNOS ISKOLÁKBAN

A 6. osztályban először a kölcsönhatás, erő, mozgás című témakörrel foglalkoznak a tanulók. E tananyagrészt mintegy előkészíti az energia fogalmának bevezetését. E témakör tárgyalására a tantervileg előírt 18-20 órának több mint 60 %-a a kölcsönhatás fogalmának kialakítására fordítódik. Kétpartneres kölcsönhatások sorát vizsgálva és elemezve, a tanulóknak tisztán kell látniuk:

- a változás mindig kölcsönhatás eredménye,
- a kölcsönhatás testnek testre gyakorolt, közvetlen érintkezéskor fellépő, kölcsönös hatása,
- a kölcsönhatás csak alkalmas körülmények között jöhet létre /sebességkülönbség, hőmérsékletkülönbség, stb./,
- két test kölcsönhatásakor mindkét test állapota megváltozik,
- egy test egyidőben több kölcsönhatásban is részt vehet, ekkor a test állapotának megváltozását a kölcsönhatások miatt a testet érő hatások együttese okozza,
- különböző hatások le is ronthatják egymást, és ilyenkor a test állapota változatlan.

/A témakör feldolgozásánál a sebességre és a hőmérsékletre mint prefizikális fogalmakra építenek./

A két test közötti kölcsönhatásokkal foglalkozó órák során ki-



alakul a tanulóknál az a szemlélet, hogy ha egy test állapotában változást észlelnek, akkor tudatosan keresik a testtel közvetlenül érintkező másik testet, és ezen a másik testen bekövetkező változást. Ilyen előkészítés után természetes, hogy a mágnesrúddal és a vasdarabbal végzett kísérletnél a tanulók szintén keresik az elmozduló vasdarabbal közvetlenül érintkező partnert. Így jutnak el a mágnesrúd sajátos környezetéhez, a mágneses mezőhöz. A mágneses mező - amelyet közvetlenül egyetlen érzékszervünkkel sem érzékelhetünk - bizonyos anyagokra /vas, acél, stb./ jól észrevehető hatást gyakorol, így létére csak hatásaiból következtethetünk. Ugyanakkor az is kimutatható, ha vasat viszünk mágneses mezőbe, a mágneses mező állapota is megváltozik. A hatás tehát kölcsönös. Ezek, a tanulók által elvégzett és elemzett kísérletek azt mutatják, hogy a vas és a mágneses mező között kölcsönhatás lép fel, és ez esetben a vas kölcsönható partnere a mágneses mező.

Az elektromos mezőnek sok-sok kísérleten keresztül történő vizsgálata tovább erősíti, hihetővé és természetessé teszi a mező létezését. /Az elektromos vonzást és taszítást - hasonlóan a mágneses vonzás és taszításhoz - mint test és mező kölcsönhatását vizsgálja a tankönyv. Mezőnek mezőre való hatása az általános iskolában nem szerepel./

A mágneses és elektromos kölcsönhatások vizsgálata után a szabadon eső test mozgásállapotának megváltozását elemezve jutnak

el a tanulók a harmadik mező, a gravitációs mező, létezésének belátásához. A szabadon eső, és felfele emelkedő test mozgásállapotváltozásából következtetnek a testtel kölcsönhatásban lévő másik partnerre, illetve annak változására. A tanórán tudatosítják a tanulóknak a gravitációs mező speciális jellegét, miszerint anyagtól függetlenül, minden testtel kölcsönhatásba kerül, továbbá, hogy a gravitációs kölcsönhatás mindig vonzásban nyilvánul meg.

A gravitációs kölcsönhatás megismertetése után a testek mozgásállapotváltozását okozó kölcsönhatással foglalkoznak részletesen a tanulók. Az ilyen kölcsönhatásban az egyik testet érő hatást erőhatásnak nevezzük. Kísérlet alapján megállapítják a tanulók, hogy nagyobb erőhatás ugyanazon a testen ugyanannyi idő alatt nagyobb sebességváltozást hoz létre. Szükség van tehát egy mennyiségre, amely az erőhatást jellemzi. Ezt a mennyiséget erőnek nevezzük. Az erő ilyen módon történő bevezetését szerencsésnek tartom, hiszen az említett fogalmak ismeretében csupán azt kell beláttatni a tanulókkal, hogy a mozgásállapotváltozást eredményező hatások különböző mértékűek lehetnek. Erre vonatkozólag viszont van a tanulóknak tapasztalata. A tankönyv, nagyon helyesen, különbséget tesz az erőhatás és az erőhatás mértéke, az erő között. Erőhatások azok a hatások, amelyek elsődlegesen mozgásállapotváltozást hoznak létre. Az erő pedig az erőhatások mennyiségi jellemzője. Egyébként az itt vá-

zolt módszert - nevezetesen azt, hogy először megismerik a tanulók a testeknek, mezőknek valamelyik sajátosságát, majd megállapítják, hogy ez a sajátosság mértékében különböző lehet, s így célszerű ezt mennyiségileg egy fizikai fogalommal jellemezni - minden új fogalom bevezetésénél következetesen használja a tankönyv. Ez a következetes eljárás mód megfogalmazás nélkül is tudatosítja a tanulóknál azt, hogy a fizikai fogalmak mindig valaminek a mennyiségi jellemzői.

Itt utalnék röviden arra, hogy a pedagógusoknak az új fogalmak bevezetésénél nagyon kell ügyelniük a helyes szóhasználatra. Ez sokszor - a magyar nyelv kevésbé árnyalt volta miatt - nehézkes és igen időigényes, de elengedhetetlen a helyes és pontos ismeretek megszerzéséhez. Csak miután a tanulók teljesen megértették, hogy nem a fizikai mennyiségek hozzák létre a változást a testeken, hanem a fizikai mennyiséggel jellemzett tulajdonság, akkor lehet rátérni a lényegesen egyszerűbb, de sokkal pontatlanabb hétköznapi szóhasználatra. Ekkor a helyes ismeretek birtokában minden tanuló tudja, hogy mit kell érteni pl. az "F erő hatására; az U feszültség hatására", stb. kifejezéseken, amely kifejezések használatát nem lehet elkerülni a rövid, lényegre utaló beszédben, de használatuk csak akkor nem okoz zavart, ha ismerjük e rövidítések helyes tartalmát.

Az erőnek, mint iránymennyiségnek, a különböző erőfajták-

nak a bevezetése után az erőmérés dinamikai módjával /csavarrugóval kilökött golyó segítségével/ ismerkednek meg a tanulók. Annak felismertetése után, hogy a jobban összenyomott csavarrugó nagyobb erőhatást fejt ki a testre, vezetjük rá a tanulókat, hogy a rugó által kifejtett erőhatás nagyságára a rugó alakváltozásából is lehet következtetni. Így jutnak el a rugós erőmérő fogalmához, majd definíciószerűen az erő egységéhez.

Az erő - ellenőrző kérdését a kölcsönhatásnál már megismert hatáskölcsönösség egy speciális eseteként tárgyalja a tankönyv.

A több erőhatás együttes eredménye c. egység lényeges pontjai: egy test mozgásállapotát a testet érő erőhatások együttesen szabják meg. Ha az erőhatások kiegyenlítik egymást, akkor a test mozgásállapota nem változik. Ha nem egyenlítik ki egymást, akkor a test változó sebességgel mozog. Ezeket az ismereteket a tanulók kristálytisztán kapják, minden nehézség nélkül megértik, amit az is jelez, hogy az olyan kérdéseket, mint a szánkó és a ló - amelyek egyenlő erővel húzzák egymást, és mégis megindul a szánkó -, játszva megoldják.

Az eddigi általános iskolai fizikaoktatásban mindig problémát jelentett a súly és a gravitációs erő összekeverése. A kölcsönhatás segítségével kialakított erőfogalom e problémát is megoldja: súly az az erő, amellyel a test felfüggesztésekor

vagy alátámasztásakor más testre hat, a gravitációs erő pedig a gravitációs mezőnek a kérdéses testre kifejtett hatása.

A testek tömegét mint a tehetetlenségük mértékét definiálja a tankönyv. Ez a definíció egyrészt jól illik az új szemléletű fizikaanyagba, hiszen élesen elkülöníti az anyagi valóságot /test/, annak egy tulajdonságát /tehetetlenség/ és az ezt számszerűen jellemző mennyiséget /tömeg/. Másrészt pedig a tömeg régi definíciója - miszerint a tömeg a testbe foglalt anyagmennyiség - hibásnak bizonyult, amennyiben a fizika újabban az anyagmennyiséget a kérdéses anyagban levő részecskék /elektronok, ionok, atomok, molekulák, stb./ számával definiálja. Ennek megfelelően az anyagmennyiség egysége a mol. Egy mol az anyag mennyisége, ha benne $6 \cdot 10^{23}$ számú részecske van. S bármennyire is furcsa a régi szemléletmódban nevelkedett embernek, hozzá kell szoknia, hogy ugyanolyan mennyiségű anyagnak az anyag minőségétől függően más és más a tömege. Ezt a felismerést a most felnövő ifjúság - többek között a fizikában - már így tanulja és természetesnek veszi.

Az első témakör tulajdonképpen azokkal az alapfogalmakkal, ill. jelenségekkel ismerteti meg a tanulókat, amelyek alkalmazása, illetőleg ismerete a további fejezetek feldolgozása szempontjából elengedhetetlen. Különösen a második témakör legfontosabb fogalmának, az energiának kialakításához adnak sokoldalú, közvetlen előkészítést és megalapozást.

Az energia, a munka és a hő címet viselő második tananyagegység feldolgozása 20 óra alatt történik. Érdemes megjegyezni, hogy e bonyolult fogalmak kialakítására szánt órák egyike sem zárul "merek" definícióval. Lépésről-lépésre gyűjtik össze e fogalmak lényeges tartalmi jegyeit, majd fokozatosan bővítik mindaddig, míg a kialakult összkép a megfelelő szintű általánosítást lehetővé teszi.

A testek közötti kölcsönhatások további vizsgálatával indul az energia fogalmának kialakítása. Egyszerűbb kísérleteket és a tanulók tapasztalatait felhasználva állapíttatja meg a tankönyv, hogy a testeknek van olyan képessége, hogy kölcsönhatás közben képesek más testek állapotát megváltoztatni. Ilyen változtató képességgel rendelkezik például az összenyomott /megfeszített/ csavarrugó, a mozgó test, a meleg víz, stb. Ez a változtató képesség különböző nagyságú lehet. A testek változtató képességét számszerűleg az energiával adhatjuk meg. Az általános iskolákban tehát az energiát a testek változtató képességének mértékeként "definiálják". A testek változtató képességének különböző oka van. Ennek megfelelően megkülönböztetnek rugalmas energiát, mozgási energiát és belső energiát. A tanulók tapasztalatait felhasználva mondják ki, hogy jobban megfeszített rugónak nagyobb a rugalmas energiája, nagyobb sebességű és tömegű testnek nagyobb a mozgási energiája, valamint a nagyobb tömegű és

magasabb hőmérsékletű testnek nagyobb a belső energiája. Itt vetetik észre a tanulókkal, hogy "minden test képes a nála hidegebb testeket felmelegíteni, ezért minden testnek van belső energiája" [46].

Ebben az egységben igen fontos annak a tudatosság szintjére való emelése, hogy amennyiben egy test állapota változik, akkor a test energiája is változik.

Ezután térnek rá az energiaváltozások vizsgálatára. Különböző kölcsönhatások /pl. különböző hőmérsékletű folyadékok összekeverése, nyugvó golyó mozgásba hozása egy mozgó golyó segítségével, egy mozgó test megtámasztott, laza rugónak ütközik, stb./ részletes elemzése után mondják ki, hogy kölcsönhatás közben mindkét test állapota és így energiája is megváltozik, mégpedig úgy, hogy az egyik test energiájának csökkenésével a másik test energiájának növekedése jár együtt. Itt mondják ki az energia megmaradásának törvényét is, természetesen a 11-12 éves tanulók értelmi szintjének megfelelően: két test kölcsönhatása közben az egyik test energiája ugyanannyival nő, mint amennyivel a másiké csökken. Azon, hogy az energiamegmaradás törvényét a tankönyv már itt mondja ki, vitatkozni lehetne. A továbbhaladáshoz elég lenne ugyanis az a tapasztalat, hogy a kölcsönhatás közben az egyik test energiája nő, míg a másiké csökken. Az energiamegmaradás törvényét pedig a kalorimetriás méréseknél - bizonyos értelemben tanulói ta-

pasztalatra alapozva - lehetne kimondani. Egyébként ezt az utat követte az eredeti tankönyv [25]. A tankönyvszerzők - mint ez a velük való beszélgetésből kiderült - a pedagógusok visszajelzései alapján azonban úgy vélték, hogy ebben az anyagrészen, melyben a tanulók közvetlenül tapasztalják az egyik test energianövekedését és a kölcsönható partner energiacsökkenését, a tanulók "mechanikai érzéke" szinte sugallja az energiaváltozások egyenlőségét, s így ennek kimondása egészen természetes, a tapasztalatokat szinte teljessé tevő. Ugyanakkor a kalorimetriás méréseknél - azok pontatlansága miatt - az energiamegmaradás kimondása erőltetett és kétséget hagyó.

Ezzel a kérdéskörrel kapcsolatban szeretném hangsúlyozni, hogy mennyire fontos szerepe van a testekkel végzendő tankönyvi tanulókísérletek elvégeztetésének és alapos, lelkiismeretes elemzésének. Az így szerzett közvetlen tapasztalatok adják meg majd a mező-test kölcsönhatásra térve azt a biztos alapot, amelyre építve a tanulók a mező nem érzékelhető állapot- és energiaváltozására következtetni tudnak. Ez a megjegyzés egyébként nemcsak itt, hanem a mezőfogalom kialakításánál, valamint az anyag korpuszkuláris természetének tanításánál is helyénvaló. Sokezer pedagógusnak a többéves tapasztalata alapján kimondható: ha a tankönyv tanulókísérleteit a tanár elvégezteti és helyesen, célratorősen értelmezi /ehhez komoly segítséget ad

a tankönyv/, akkor sem a mező, sem a mezőenergia, sem az anyag korpuszkuláris szerkezetének tanítása nem jelent problémát.

Az új általános iskolai fizika újat ad abban is, hogy az egyes témák tárgyalási sorrendje eltér a megszokottól. Eddig ebben a témakörben az általánosan elfogadott sorrend az volt, hogy először a munka fogalmát vezették be, és utána tárgyalták az energiát. Az új tankönyv szerzői szakítottak ezzel a hagyománnyal, és abból kiindulva, hogy az energia az általánosabb fogalom, az energiaváltozással definiálták a munkát.

A munka c. egységben a munkavégzéssel és a vele elválaszthatatlanul bekövetkező energiaváltozással ismerkednek meg először a tanulók. Ez pl. a fűrészelés után megfogott fűrészlap melegebb voltára való hivatkozással történik. A tanulók tudják, hogy a fűrészlap melegedése belső energiájának növekedését jelzi, tudják továbbá, hogy a fűrészelés közben a fűrészlap erőhatásra elmozdult. Így a tapasztalat megbeszélése során kialakul a munkavégzés fogalma: munkavégzésről akkor beszélünk, ha "erőhatás következtében egy test elmozdul". A példa alapján az is nehézség nélkül beláttatható, hogy "munkavégzés közben mindig energiaváltozás jön létre". Ez alapján definíciószerűen közli a tankönyv: "A munkavégzés közben bekövetkező energiaváltozást munkának nevezzük. Jele W " [46]. A munka nagyságának kiszámításához egy egyszerű tanári /demonstrációs/ kísérlet segítségével jutnak el a tanulók. Hőmérő folyadéktartályára

szorított parafadugót forgatnak körbe, és vizsgálják a végzett /súrlódási/ munka és a belső energia növekedése / pontosabban az energianövekedést jelző hőmérséklet emelkedése/ közti kapcsolatot. A kísérlet eredményét úgy összegzik, hogy a belső energia növekedése, s így a munka is, kétszer - háromszor nagyobb, ha ugyanaz az erő kétszer - háromszor akkora /az erő irányába eső/ úton hat, vagy ha kétszer - háromszor nagyobb erő hat valamekkora, de az erő irányába eső úton. Munkavégzés közben azonban nemcsak a test belső energiája változhat, hanem mozgási energiája, rugalmas energiája is. Ezek alapján mondják ki, hogy a "munka energiaváltozás, amelyet az erő és az erő irányába történő elmozdulás szorzataként számítunk ki: $E = W = Fs$ " [46].

Ezen összefüggés alapján vezetik be az energia és a munka egységét, a joule-t. A munkavégzésnek és a munkának ez a definíciója kissé eltér a megszokott munkadefiníciótól. Először azért, mert különbséget tesz a munkavégzés mint folyamat, és a folyamatot jellemző mennyiség, a munka között. Azért is szokatlan a definíció, mert nem az erő hatására jön létre az elmozdulás és a munkavégzés, hanem akkor történik munkavégzés, ha az energiaváltozás erőhatás és ezzel egyidőben elmozdulás közben jön létre. /Az erő, mint a mozgásállapotváltozást létrehozó hatás mértéke, nem okozhatja egy test elmozdulását./ Meg kell állapítanunk, hogy a fizika mai álláspontja szerint ez a munka helyes

definíciója, amelyből természetesen adódik az is, hogy két, látszólag különböző mennyiségnek, az energiának és a munkának miért van azonos mértékegysége.

A munka fogalmának példákon keresztül történő elmélyítése után kerül sor a mező energiájának tárgyalására. Egyszerű kísérletek tanúsága szerint /megdörzsölt rúd elektromos mezeje képes papírdarabkák mozgásállapotát megváltoztatni, vagy mágnesrúd mágneses mezeje a vele kölcsönhatásba kerülő test mozgásállapotváltozását okozza, stb./ mindenfajta mező rendelkezik változtató képességgel, vagyis energiával. Mivel a mezővel kölcsönhatásba kerülő test energiája megváltozik, az eddig tanultakból következik, hogy a mező energiájának is meg kell változnia, mégpedig úgy, hogy ha a test energiája a kölcsönhatás következtében nő, akkor ugyanannyival kell a mező energiájának csökkennie.

Ezzel a tananyaggal kapcsolatban kiváló alkalom nyílik arra, hogy beláttassuk a tanulókkal, hogy minden olyan test, amely egy mezővel kölcsönhatásban van, olyan "eszköz" a kezünkben, amelynek segítségével a kérdéses mező energiáját megváltoztathatjuk. Ehhez nem kell mást tennünk, mint a kérdéses testet a mezőben el kell mozgatnunk. A gravitációs mező energiáját akkor növelhetjük, ha benne egyenletes mozgással felemelünk egy testet. Ilyenkor az emelést végző energiájának csökkenése egyenlő a mező energianövekedésével. A folyamat során a felemelt test

energiája változatlan marad. A gravitációs mező energiája annnyival nő, mint amennyi az emeléskor az emelést végző által végzett munka. Egyenletes emelésnél a testet emelő erő egyenlő a test súlyával, ezért az emelési munkát a test súlyának és az emelés magasságának szorzataként számítjuk ki:

$$W_{em} = F_{súly} \cdot s = \Delta E_{grav}.$$

A tankönyv kitér arra is, hogy a mezők energiaváltozását többféleképpen nevezik: helyzeti energia, magassági energia, kölcsönhatási energia.

A helyzeti energia ezen tárgyalása is eltér a megszokottól, mert - mint e tárgyalásmódból egyértelműen következik - a kölcsönhatási energiát csak test és mező kölcsönhatása esetén lehet értelmezni. A kölcsönhatási energia megváltozásának a mezőhöz való kötése a kölcsönhatásra épülő fizikában kézenfekvő, és megfelel a tanulók értelmi fejlettségének.

A belső energia megismerése előtt a tanulók egy tanítási egység keretén belül foglalkoznak az anyag korpuszukuláris felépítettségével. Az energia fajtáinak megismerésekor találkoztak a belső energia elnevezéssel. Megtanulták, hogy a felmelegedő test energiája nő, a lehűlő csökken. Ez az energiaváltozás a test belsejében lejátszódó, közvetlenül nem látható változások eredménye. E változások megértéséhez szükséges annak ismerete, hogy az anyagok mindhárom halmazállapotban nagyon kicsi, állandó rendezetlen mozgást végző részecskékből állnak.

E részecskék között kis hatótávolságú vonzóerő van. Szilárd testek részecskéi a közöttük fellépő erőhatás miatt helyhez kötöttek, és csupán e hely körül végeznek rendezetlen rezgést. A folyadék részecskéi között már sokkal kisebb az erőhatás, ezért rendezetlen mozgásuk közben elgördülhetnek egymáson. A gáZRészecskék között gyakorlatilag nincs erőhatás. Ezt a tanítási egységet sok, egyszerű, de funkciójában igen fontos tanulói kísérleten keresztül kell megtanítani, azért, hogy a korpuszkuláris anyagfelépítés nagy absztrakciót követelő ismerete szilárd alapokon nyugodjék. Ezt a tanítási egységet - elsősorban a kémia igénye miatt - az anyagmennyiség, majd a sűrűség fogalmának kialakítása követi.

Ezek után térnek rá a belső energia és a belső energia megváltozásának részletesebb tárgyalására. Egyszerű kísérletek /cukor, ill. káliumpermanganát oldódása hideg ill. meleg vízben/ alapján vonják le azt a következtetést, hogy magasabb hőmérsékleten nagyobb a folyadékrészecskék rendezetlen mozgása. Előzetes tanulmányaikból már tudják, hogy egy test /folyadék/ belső energiája a hőmérséklettel együtt nő, így a következtetés, miszerint a test belső energiája a részecskék rendezetlen mozgásával kapcsolatos, minden tanuló számára egyszerű és természetes.

Az általános iskolában a tanulók - életkori sajátosságaik miatt - a belső energiának csupán egyik alkotórészeivel, a ren-

dezetlen /hő/ mozgás kinetikai energiájával, és ennek a hőmérséklettel való kapcsolatával ismerkednek meg részletesebben. Később, a halmazállapotváltozások értelmezése kapcsán - mikoris a belső energia hőmérsékletváltozás nélkül változik - említés történik arról, hogy ez esetben a belső energia változása a részecskék közötti kölcsönhatást közvetítő mező energiájának változása miatt következik be. Ilymódon azt mondhatjuk, hogy a belső energia mindkét alkotórészéről lehet képe az általános iskolát végzett tanulónak.

A következő tanítási egység a fajhő, amely tulajdonképpen a hőmennyiség fogalmának előkészítését szolgálja. Az óra már megismert fizikai tények ismételtesével kezdődik, nevezetesen utalnak arra, hogy "bármely testen végzett munka a test energiájának megváltozásával egyenlő. Tapasztaltuk, hogy ugyanannál a testnél a kétszer, háromszor nagyobb belső energiaváltozást kétszer, háromszor nagyobb hőmérsékletváltozás jelez" [46].

A fajhő bevezetése egy gondolati kísérleten keresztül történik. Egy fémedényt nyélre erősített fagyűrű fog szorosan körül. Megerik, mekkora súrlódási munka szükséges ahhoz, hogy az edénybe helyezett 1 kg tömegű víz belső energiájának megváltozását a hőmérséklet 1 °C-os emelkedése jelezze. Ez különféle anyagoknál különböző. Ennek eredményeként kimondják, hogy 1 kg tömegű anyagok belső energiájának megváltozása egységnyi hőmérséklet-

emelkedéskor az anyagtól függ. Az anyagot ebből a szempontból a fajhő jellemzi. A fajhő megmutatja, hogy 1 kg tömegű anyag belső energiája 1 °C hőmérsékletemelkedésnél mennyivel növekszik. "Ugyanazon anyagnál ahányszor nagyobb a test tömege, annyszor nagyobb súrlódási munkával lehet hőmérsékletét 1 °C-kal emelni. Ilyenkor a test belső energiájának növekedése is ugyanannyiszoros" [46]. A fajhő egységének bevezetése után különböző, következtetéssel megoldható feladatokon keresztül mélyítik el ezt a fogalmat, valamint a belőle leolvasható belső energiaváltozást.

Ezután - már a következő tanítási egység keretében - azt a problémát veti fel a tankönyv, hogy meg lehet-e határozni a belső energia megváltozását súrlódási munka nélkül. A fajhő bevezetésénél a tanulók már lényegében megtanulták a felvetett kérdésre a választ, nevezetesen azt, hogy egy test belső energiájának növekedése a hőmérsékletének növekedésével, a test fajhőjével és a test tömegével arányos. Ezen az órán csak a $E_p = cm \Delta T$ összefüggésre kell a tanulókat rávezetnünk. Ez következtetéssel megoldott feladatokon keresztül történik oly módon, hogy felhívjuk a tanulók figyelmét arra, milyen műveleteket végeztek a következtetéssel számítás közben. A termikus kölcsönhatás definiálása után /különböző hőmérsékletű testek érintkezése = termikus kölcsönhatás/ vezetik be a hőmennyiség fogalmát: a hőmennyiség a termikus kölcsönhatás közben bekövetkező belső energiaváltozás neve.

A hőmennyiséget tehát az új általános iskolai fizika - a tudomány mai álláspontjának megfelelően - termikus kölcsönhatás közben bekövetkező energiaváltozási folyamat mennyiségi jellemzőjeként adja meg. Míg a munka az erőhatás és elmozdulás közben bekövetkező energiaváltozást méri, addig a hőmennyiség a termikus kölcsönhatás közben bekövetkezett energiaváltozás mértéke. Ebből azonnal következik, hogy a hőmennyiség egysége is energiaegység, vagyis joule.

A hőmennyiséget ismertető órát fizika gyakorlati óra követi, amelyen kalorimetriás mérésekkel hőmennyiség-meghatározást végeznek a tanulók. E közben megmutatják, hogy termikus kölcsönhatásoknál is érvényes az energiamegmaradás törvénye, ha figyelembe veszik a mérési berendezések, valamint a környezet belső energiájának növekedését is. Ennek az órának a végén az égéshő fogalmát is megtanítják a tanulókkal: "Az égéshő megmutatja, hogy 1 kg tömegű anyag tökéletes elégésekor mennyivel növekszik a környezet belső energiája" [46].

Ezzel tulajdonképpen feladatomat, vagyis annak megmutatását, hogy hogyan történik az energia fogalmának bevezetése a 6. osztályos fizika tankönyvben, teljesítettem. Meg kell azonban jegyezni, hogy a 6. osztályban bevezetett energiafogalom a 7. és 8. osztályos fizikaanyagban állandó alkalmazás során egyre mélyül és egyre tartalmasabbá válik. Azt lehet mondani, hogy a kölcsönhatás, mező és energia azok a pillérek, amelyekre az

egész általános iskolai fizikaanyag felépül. Ezen állítás igazolására tekintsünk csupán egy példát, nevezetesen az elektromos feszültség fogalmának kialakítását a 7. osztályban.

A feszültség az általános iskolai fizikaanyag egyik legnehezebb fogalma. Az eddigi fizikakönyvek a feszültségről nagyon keveset szóltak. E fogalmat az áramforrás jellemzőjeként definiálták, a jelén és egységén kívül nem mondtak róla többet. E tény viszont elkerülhetetlenül a feszültség formális ismeretéhez vezetett, és sok jelenség értelmezését nem tette lehetővé. /Ilyen pl. miért mérünk az ellenállás két kivezető pontja között is feszültséget?/

A feszültségről a fent említetteknél többet mondani, az eddigi fogalomnál helyesebb fogalmat kialakítani nyilván nehézséget jelent. Ha viszont figyelembe vesszük, hogy a 6. osztályos fizikában a tanulók már megismerkedtek a kölcsönhatással, az elektromos mezővel mint kölcsönható partnerrel, tisztázták, hogy kölcsönhatásnál minden kölcsönható partner energiája megváltozik, akkor kiderül, hogy nem is jelent olyan nagy nehézséget a feszültség használhatóbb fogalmának a kialakítása.

A tankönyv céltudatosan építve az előbb elmondott fogalmakra, építi ki a feszültség fogalmát. E fogalom tanítása előtt a diákok már megtanulták az elektromos töltés fogalmát és egy-

ségét, az áramerősséget és egységét, tudják, hogy vannak áramforrások /tartós áram létrehozására alkalmas berendezések/, ismerik az áramkör fogalmát, és annak részeit /áramforrás, vezeték, fogyasztó, kapcsoló/, ismerik az áramerősségmérőt és tudnak vele mérni, ismerik a fogyasztók soros és párhuzamos kapcsolását. Ezek után kerül sor az elektromos mező munkájának vizsgálatára.

Az elektromos mező munkája c. tanítási egység az ún. "csillogós kísérlet"-re épül. A kísérlet lényege: két, egymástól kis távolságra levő fémlapok egyikét földeljük, a másiknak pozitív töltést adunk. A lapok közé függesztett fémgolyó ide-oda mozgása közben elszállítja a lapok töltését, ha nem gondoskodunk annak állandó pótlásáról. A kísérlet alapján a tanulók a következő megállapításokat teszik: a/ az elektromos mező, ha munkát végez /vagyis töltést mozgat/ egyre gyengül és végül megszűnik; b/ ahhoz, hogy a mező munkavégzés közben változatlan maradjon, pótolni kell az elszállított töltést. Ezután a felismerés után már érthető a következő általánosítás: "Zárt áramkörben is a vezetőben lévő mező mozgatja a szabad elektronokat, miközben munkát végez. A mező változatlan marad, mert az áramforrás folyamatosan pótolja a sarkairól eltávozó töltéseket" [26]. Ezután egy áramkörbe egymás után egy zseblámpa-izzót, ill. egy karácsonyfa-izzót kapcsolnak, és a lámpa izzásából következtetnek az elektromos mező munkájára.



Megállapítják, hogy ugyanaz az elektromos mező több töltés átszállításakor nagyobb munkát végez. Pontos mérésekre hivatkozva megfogalmazzák: "A végzett munka /tehát/ egyenesen arányos az átszállított töltésmennyiséggel" [26].

A feszültség c. egységben egy hálózatra kapcsolt izzólámpa fényét hasonlítják össze a tanulók egy zseblámpa-telepre kapcsolt zseblámpa-izzó fényével. Mindkét izzón ugyanakkora az áramerősség, vagyis az időegység alatt átáramlott elektromos töltés. "A töltés átáramoltatásakor végzett munka nemcsak a töltés nagyságától, hanem az áramforrásnak az áramkörben létrehozott mezőjétől is függ. Az áramforrások mezőjét annak a munkának a nagyságával jellemezzük, amelyet a mező 1 C töltés átáramoltatásakor végez. Azt a mennyiséget, amelyből erre a munkára következtetni lehet, feszültségnek nevezzük. Ez a feszültség jellemző a mezőt létrehozó áramforrásra is. Ezért szokás az áramforrás feszültségének mondani." Az áramforrás feszültségének megismertetése után a tanulók zseblámpa-telepre sorosan zseblámpa-izzót és karácsonyfa-izzót kapcsolnak, és megfigyelik azok fényét. Tapasztalataikból megállapítják, hogy "egy áramforrás mezője ugyanakkora töltés átszállításakor a sorba kapcsolt fogyasztókban általában különböző munkát végez. Ilyenkor a fogyasztók kivezetése közötti feszültség különböző. - Az áramkör két pontja közötti feszültségből annak a munkának a nagyságára következtethetünk, amelyet

a mező végez, mialatt 1 C töltést az áramkör egyik pontjából a másikig áramoltat" [26]. Amint ezek az idézetek mutatják, a tanulók nemcsak az áramforrás feszültségével, hanem az áramkör bármely két pontja közötti feszültség /feszültségesés/ fogalmával is megismerkednek. A feszültség mérése c. /következő/ tanítási egység a megismert feszültség-fogalom gyakorlását, mélyítését szolgálja.

A feszültség fogalmának ezen bevezetése tanítványaink előtt egyértelművé teszi, hogy:

- a feszültség fizikai mennyiség /tehát hibás a "feszültség hatására" kifejezés, hiszen a fizikai mennyiségek nem résztvevői, nem okozói a változásoknak/;
- a feszültség a mező két pontja közötti részének jellemzője, feszültség tehát mindig mezőbeli két pont között lehet.

Felmerülhet esetleg az a kérdés, hogy nem lehetne-e a feszültséget mint potenciálkülönbséget bevezetni. A tankönyvszerzőkkel együtt én is úgy vélem, hogy a végtelen távoli pont fogalma - mely a potenciál bevezetéséhez szükséges - olyan mértékű absztrakciót követel, amellyel általában nem rendelkeznek a 11-12 éves tanulók.

Amint az általános iskolai tananyag ezen vázlatos ismertetésének a dolgozat első részével - mely az energiafogalmat a tudomány szempontjából vizsgálta - való összevetése mutatja,

az új általános iskolai fizikaanyag az energia-kérdés problematikáját a tudomány szerint helyesen és pontosan tárgyalja. Ez azon túlmenően, hogy megfelel a tananyaggal szemben támasztott "tudományosság elvének", a tanulók gondolkodás-fejlesztésének, és helyes természetszemlélet kialakításának szilárd, logikai törés nélkül továbbfejleszthető alapot ad a középiskolai, és egy esetleges felsőfokú fizika-képzés energia- és mezőfogalom további fejlesztéséhez.

X. AZ ENERGIA KÖZÉPISKOLAI OKTATÁSÁRÓL

Az általános iskolában oktatott fizika - mint láttuk - az életkori sajátosságok figyelembevételével a fizikatudomány jelenlegi szemléletmódját tükröző energiafogalmat alakít ki. Kérdés: hogyan lehet a fenti alapokon ezt az energiafogalmat továbbfejleszteni a középiskolában?

A középiskolai fizikakönyvek még korántsem egységesek abban, hogy hogyan építsenek az általános iskolában tanultakra. Ennek kimunkálása a következő esztendő feladata. Egységes és kialakult eljárások hiányában megkísérlek egy olyan utat felvázolni az energiafogalom középiskolai továbbfejlesztésére, amely - véleményem szerint - jól épül az általános iskolában kialakított alapokra.

Miután láttuk, hogy az energia fogalma elválaszthatatlanul összekapcsolódik a kölcsönhatás elvével és a mezők fogalmával, ezért szükséges, hogy a középiskolában a fizika tanulmányokat az általános iskolai fizikaanyag lényegét tartalmazó olyan összefoglalással kezdjük, amelyben felelevenítjük e fogalmak lényeges jegyeit, és a fogalmak kapcsolatát. Ebben az összefoglalásban rá kell mutatnunk a következőkre:

- a/ minden változás oka a kölcsönhatás, amely anyagnak anyagra való kölcsönös hatása. Kölcsönhatás csak közvetlen érintkezés közben jöhet létre;

- b/ egy test kölcsönható partnere/ i / vagy vele érintkező test/ ek /, vagy mező/ k / lehet/ nek /;
- c/ ha test és mező a kölcsönhatás két résztvevője, akkor a test helyének a mezőben való megváltozása a mező megváltozását is maga után vonja /ez a megállapítás ugyan benne van az a/ alatt elmondottakban, de fontossága miatt nem árt külön is hangsúlyozni/;
- d/ testeknek és mezőknek azt a képességét, hogy kölcsönhatás közben a kölcsönható partner/ ek / állapotában változást képesek létrehozni, energiával jellemezzük;
- e/ a kölcsönhatás során bekövetkező változások a kölcsönhatás résztvevőinek állapotát, s így azok energiáját is változtatják. Az energiaváltozásra szigorú mérleg-elv érvényes: az energianövekedések összege egyenlő az energiacsökkenések összegével.

Ezt az általános iskolában megtanított, egyébként a fizika egészére érvényes, alapvető elvi megállapításokat tartalmazó bevezetést követhetné az anyagi pont mechanikájának oktatása. Ez a munka fogalmának bevezetéséig nagyjában-egészében a hagyományos módon folyhatnék. A munka fogalmát is a szokásos módon, vagyis a köznapi élet munkafogalmát alapul véve lehetne bevezetni, és eljutni kiszámítási módjához, valamint egységéhez. Ezt követően bevezethetjük a gyorsítási munka $W_{gy} = mas$ /, az emelési munka $W_e = mgh$ /, a súrlódási munka $W_s = \mu mgs$ /, s a

munka-grafikon alapján a rugalmas erő munkájának $W = 1/2 F_r x$ fogalmát. A munka fogalmának bevezetését követné az energiafogalom bevezetése a következő sorrendben: test energiája, fizikai rendszer és a kölcsönhatási energia, a mechanikai energiák és megmaradásuk. A belső energia fogalmának kifejtése a hőtanban, a gázok kinetikai elméletével kapcsolatosan történhet. Mielőtt az energiafogalom kiépítésének részletesebb vizsgálatába kezdenék, szükségesnek tartom a következő megjegyzést. Amint már láttuk, az energiafogalom általánosabb fogalom, mint a munka, amely egy speciális energiaváltozás mértéke. Ennek megfelelően szebb lenne, ha a munkát az energiából származtatnánk, mint azt a IV. fejezetben tettük. Ez az út azonban azt jelentené, hogy - megfelelő kísérletek hiányában - közölnünk kellene egy test kinetikai energiájának $K = \frac{1}{2} m v^2$ képletét. Mivel azonban az ilyen közlések módszertanilag kifogásolhatóak, ezért mégis a munka fogalmát vezetjük be előbb, de a munka és a mozgási energia kapcsolatát kifejező összefüggés értelmezését a két fogalom viszonyának megfelelően adjuk meg.

A test energiája című tanítási egységben - hivatkozva az általános iskolai tanulmányokra - rámutatunk arra, hogy minden nyugalomban levő testnek belső energiája van E_0 , továbbá minden test körül gravitációs mező alakul ki, amely szintén energiával rendelkezik E_m . A test - ha mozog - a fenti energiákon kívül

még K mozgási energiával is rendelkezik. Egy egyedül álló test energiája tehát

$$E = E_0 + E_m + K .$$

Fontos ebben a megfontolásban hangsúlyozni, hogy

- a/ E_m mezőenergia a test energiájának egy része,
- b/ egy test /anyagi pont/ gyakorlatilag előforduló mozgásainál $v_{\text{test}} \ll c$ az E_0 és E_m energiák változatlanok. Ezért egy testre vonatkozó mechanikai megfontolásoknál nem szoktuk ezeket számításba venni. Ezt annál is inkább megtehetjük, mivel általában a test energiaváltozásai érdekelnek bennünket, és ezekben az állandó energiatagok kiesnek. Ezt figyelembe véve azt mondhatjuk, hogy a tisztán mechanikai folyamatokban a testnek csak a mozgási energiája játszik szerepet.

Feladatunk annak megállapítása, hogy a mozgási energia a test milyen adataitól és hogyan függ. E célból egy nyugalomban lévő testet állandó F erővel gyorsítsunk fel v sebességre. A testen bekövetkező állapotváltozás a test mozgási energiájának változását eredményezi, és ezt az energiaváltozást a gyorsítási munka méri:

$$\Delta E = \Delta K = K - K_0 = W_{\text{gy}} .$$

$$\text{Mivel } W_{\text{gy}} = mas = m \frac{v}{t} \frac{a}{2} t^2 = \frac{1}{2} mv^2, \text{ és így}$$

$$K - K_0 = \frac{1}{2} mv^2 - 0.$$

Az eredményből látható, hogy

$$K = \frac{1}{2} mv^2,$$

vagyis egy test kinetikai /mozgási/ energiája arányos a test tömegével és sebességének négyzetével.

Meggondolásunk azt is mutatja, hogy egy külső erőhatásnak a testen végzett gyorsítási munkája $W_{\text{gy}} > 0$ a test kinetikai energiáját növeli. Ha viszont a kinetikai energiával rendelkező test végez mozgása közben munkát /pl. csavarrugónak ütökzik és azt összenyomja/, akkor a test által végzett munka a mozgási energiájának csökkenését adja. /Ez esetben $W_{\text{gy}} < 0$ /

A fizikai rendszer; kölcsönhatási energia. Ebben a tanítási egységben először a fizikai rendszer fogalmát tisztázzuk. Fizikai rendszeren bizonyos testek és a köztük kölcsönhatást létesítő mező/k/ együttesét értjük. A mező itt a rendszer egyik tagja, egyik testhez sem kapcsolható /közös mező/.

Tekintsünk először két testből és a közös mezőből álló rendszert. Egy pillanatban, az A-val jelölt elrendeződésben, a rendszer energiája



$$E_A = E_{o1} + E_{o2} + K_1 + K_2 + E_{mA} ,$$

ahol E_{o1} , ill. E_{o2} az első ill. a második test belső energiája, K_1 , ill. K_2 az első ill. a második test kinetikai energiája a kiszemelt időpillanatban, E_{mA} a közös mező energiája a rendszer A-val jelzett elrendeződésében.

Kerüljön a rendszer E_{o1} és E_{o2} ill. K_1 és K_2 megváltozása nélkül egy B-vel jelölt elrendeződésbe. Ebben az elrendeződésben a rendszer energiája

$$E_B = E_{o1} + E_{o2} + K_1 + K_2 + E_{mB} .$$

A rendszer energiájának megváltozása az említett átmenetnél

$$E_B - E_A = E_{mB} - E_{mA} ,$$

vagyis a mezőenergia megváltozásával egyenlő. Ezt a mezőenergiaváltozást a B elrendeződés A-ra vonatkoztatott kölcsönhatási energiájának nevezzük:

$$U_{BA} = E_{mB} - E_{mA} .$$

A kölcsönhatási energia kiszámítása úgy történik, hogy kiszámítjuk azt a munkát, amit a külső erőnek végeznie kell, míg a rendszert a vonatkoztatási konfigurációból /gyorsítás nélkül/ a kérdéses konfigurációba /elrendeződésbe/ viszi.

Fontos ebben a gondolatmenetben annak kihangsúlyozása, hogy a kölcsönhatási energia rendszerhez kapcsolódó energia, illetőleg a rendszeren belül a mező energiájának a megváltozása, továbbá annak tisztázása, hogy a kölcsönhatási energia a vonatkoztatási elrendeződés rögzítése esetén csupán az elrendeződés függvénye.

A Föld gravitációs mezőjében a kölcsönhatási energia kiszámítása. Legyen a test a Föld felszínén, és ezt tekintsük vonatkoztatási konfigurációnak. Mekkora lesz ehhez az elrendeződéshez viszonyítva annak az elrendeződésnek kölcsönhatási energiája, amelyben a test a Föld felszínétől számítva h magasságban van?

A kölcsönhatási energia értékét a W_e emelési munka méri:

$$E_k = W_e = m g h .$$

Ha ez a munka pozitív, vagyis a külső erő végez munkát a mezőn, akkor a Föld-mező-test rendszer energiája nő, ha negatív, vagyis a mező - a rendszer egyik tagja - végez munkát, a rendszer energiája csökken. Ez az utóbbi eset következik be, ha a testet visszatartva /gyorsulás nélkül, nagyon lassan/ a Föld felé hagyjuk mozogni.

Számítsuk ki a csavarrugót rögzítő test-rugó-rugót nyújtó testből álló rendszer kölcsönhatási energiáját a rugó megnyúlása nélküli konfigurációhoz viszonyítva. Ezt a rugalmas kölcsönhatási

energiát nyilván a rugalmas erő munkája méri:

$$E_k = \frac{\bar{F}_{\text{rug}} \cdot x}{2} = \frac{k \cdot x^2}{2},$$

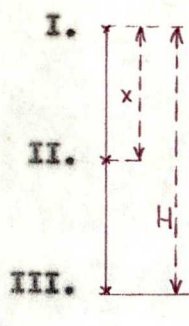
mivel $\bar{F}_{\text{rug}} = k\bar{x}$, ahol k a rugóállandó.

Mindkét kölcsönhatási energia matematikai alakjából látszik, hogy a kölcsönhatási energiák értéke a vonatkoztatási elrendezésben zérus. Ez a megállapítás egész általánosan is igaz.

Az energiamegmaradás törvénye. Tapasztalati tény, hogy egy rendszer energiája - amelyet a rendszert alkotó testek energiájának összege adja - a rendszerben önmagától lejátszódó folyamatok során nem változik. Ez azt jelenti, hogy amennyiben a folyamat során a rendszer egyes tagjainak energiája csökken, akkor más tagok energiája növekszik, mégpedig úgy, hogy az összecsökkenés egyenlő az össznövekedéssel. Ez a tétel, amelyet eddig semmiféle tapasztalat nem cáfolt, az energiamegmaradás törvénye. Ez a törvény tapasztalati törvény, levezetni más törvényből nem lehet.

A mechanikai energiák és megmaradásuk. A mozgási és kölcsönhatási energia a mechanika energiafajtái. Ezért e két energiát összefoglaló névvel, a mechanikai energiák névvel is szokták illetni. Az önmaguktól lejátszódó mechanikai folyamatokban a mechanikai energiák összege állandó. Ez a mechanikai energia

megmaradásának tétele. Ez a törvény, szemben a fentebb megfogalmazott általános energiamegmaradás-törvénnyel, matematikailag levezethető. Legyen a tekintetbe vett mechanikai folyamat egy, a Föld felszínétől H magasságban levő test elejtése. Állítjuk: e folyamat során a mechanikai energiák összege állandó. A bizonyítás a megszokott, csupán U_x a Föld-gravitációs mező-test rendszer kölcsönhatási energiája abban az elrendezésben, amikor a test x magasságban van a Föld felszínétől. Válasszuk kiindulási elrendeződésnek azt, amikor a test a Föld felszínét éppen elérte /III/. Tegyük fel, hogy a test belső energiája nem változik az esés során /eltekintünk a közegellenállástól/. Ezért a rendszer összenergiájának felírásakor ezektől a konstansoktól el is tekinthetünk.



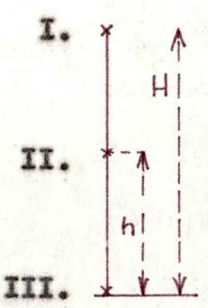
I. $U_H = 0 \quad K = 0 \quad E_I = 0,$

II. $U_x = -mgx; K = \frac{1}{2} mv_{II}^2 = mgx; E_{II} = -mgx + mgx = 0,$

III. $U_0 = -mgH; K = \frac{1}{2} mv_{III}^2 = mgH; E_{III} = -mgH + mgH = 0,$

ami az állításnak igazolását adja.

Érdekes és tanulságos, ha ugyanezt a számítást elvégezzük abban az esetben is, ha kiindulási elrendeződésnek azt a konfigurációt választjuk, amikor a test H magasságban van /I./.



I. $U_H = m g H$; $K = 0$; $E_I = m g H$,

II. $U_h = m g h$; $K = \frac{1}{2} m v_{II}^2 = m g (H-h)$; $E_{II} = m g h + m g (H-h) = m g H$,

III. $U_0 = 0$; $K = \frac{1}{2} m v_{III}^2 = m g H$; $E_{III} = m g H$.

A két számítás összehasonlítása mutatja, hogy míg az első esetben ahhoz, hogy a rendszer a kiindulási elrendeződésből a II. ill. az I. jelű elrendeződésbe kerüljön, a külső erőknek pozitív munkát kellett végeznie, addig a második esetben ahhoz, hogy a rendszer a II. ill. a III. helyzetbe kerüljön, a külső erő negatív munkát végzett. Ezért azt is mondhatjuk, hogy egy rendszer elrendeződéséhez tartozó kölcsönhatási energiát előjelesen megadja a külső erőknek az a munkája, amit ezeknek az erőknek végezniök kell ahhoz, hogy a rendszert a kiindulási elrendeződésből a kérdéses elrendeződésbe vigyék.

A mechanikai energiák középiskolai szinten történő bevezetésének vázolása után talán nem lesz érdektelen, ha a rendszerben értelmezett kölcsönhatási energia - mint új fogalom - segítségével írunk le példaként néhány olyan fizikai jelenséget, amelyeket korábban egy test energiájaként tekintett helyzeti energia segítségével magyaráztunk.

Izzószálból kilépő elektronokat az izzószálhoz képest pozitív feszültségű anóddal gyorsítunk. Az anód-katód feszültség V

volt. Feltételezve, hogy az elektronok a katódból $v \approx 0$ sebességgel lépnek ki, számítsuk ki sebességüket az anódba való becsapódás pillanatában.

A számítás az energiamegmaradás törvénye segítségével végezhető. Az izzószál, az anód, a köztük levő elektromos mező, a tekintetbe vett elektron, rendszert alkotnak. A rendszer alapkonfigurációja legyen az az elrendeződés, mikor az elektron éppen kilép az izzószálból. Ebben a konfigurációban az elektronnak nincs kinetikai energiája és a rendszer kölcsönhatási energiája /definíció szerint/ is zérus: $K = 0$, $U = 0$. A rendszer ezen konfigurációjában a mechanikai energiák összege zérus: $E_0 = K + U = 0$. Ebből a konfigurációból az elektron - a közte és az elektromos mező közti kölcsönhatás következtében - gyorsulva az anódhoz jut. Válasszuk ezt a helyzetet a második konfigurációnak. Ez esetben $K = \frac{1}{2} m_0 v^2$ és $U = -e_0 V$ / e a külső erő munkája, mialatt az elektron kvázisztatikusan a vizsgált konfigurációba kerül/, ahol m_0 az elektron nyugalmi tömege, v az elektron sebessége az anódba csapódás pillanatában, e_0 az elemi töltés. A mechanikai energiák összege ebben a konfigurációban: $E_1 = \frac{1}{2} m_0 v^2 - e_0 V$. De $E_0 = E_1 = 0$ miatt $e_0 V = \frac{1}{2} m_0 v^2$, illetőleg

$$v = \sqrt{\frac{2e_0}{m_0} V}.$$

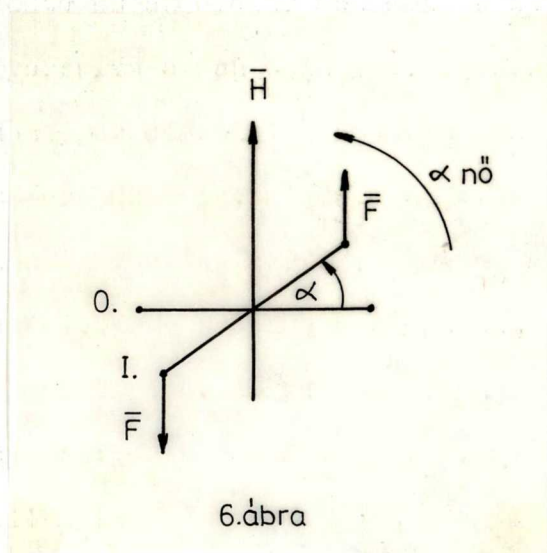
A számítást úgy is elvégezhetjük, hogy vonatkoztatási konfigurációnak azt az elrendeződést választjuk, amikor az elektron

éppen az anódba csapódik. Ebben a konfigurációban a mechanikai energiák összege: $E_0 = K + U = \frac{1}{2} m_0 v^2 + 0$. Az elektronki-lépés pillanatához tartozó konfigurációban a mechanikai ener-giák összege: $E_1 = K + U = 0 + e_0 V$. $E_0 = E_1$ miatt $\frac{1}{2} m_0 v^2 = e_0 V$, vagyis

$$v = \sqrt{\frac{2e_0}{m_0} V} \quad \text{meg egyezésben az előbbivel.}$$

Második példánkban a rendszert egy $\vec{H}$ térerősségű mágneses mező és a bele helyezett $\vec{m}$ mágneses momentumú dipólus alkotja.

A rendszer kiindulási konfigurációjában /0/ legyen az $\vec{m}$ merő-leges $\vec{H}$ -ra. Számítsuk ki ehhez a konfigurációhoz viszonyítva annak a konfigurációnak /I/ a kölcsönhatási energiáját, amely



6. ábra

konfigurációban a dipó-lus az eredeti helyze-téhez viszonyítva α szöggel elfordult. Az I konfigurációban a rend-szer kölcsönhatási ener-giájának értékét az a munka adja, amelyet egy külső erőnek végeznie kell, míg a dipólust kvá-

zisztatikusan a 0 konfigurációból az I konfigurációba viszi. Ha a dipólus a mező hatására $d\alpha > 0$ szöggel elfordul, a mező munkája

$dW_m = Md\alpha'$, a külső erő munkája pedig $dW = -Md\alpha'$, ahol $M = mH\cos\alpha'$, a mezőnek az $\sqrt{m, \hbar}/\hbar = \alpha'$ esetén a dipólusra kifejtett forgatónyomatéka. A külső erő keresett munkája, vagyis az I konfiguráció kölcsönhatási energiája:

$$W = U_I = - \int_0^{\alpha} mH\cos\alpha' d\alpha' = - mH\sin\alpha' \Big|_0^{\alpha} = - mH\sin\alpha.$$

Eredményünk azt mutatja, hogy az I konfigurációban a rendszer energiája kisebb, mint a kiindulási konfigurációban. Ez az energiacsökkenés a mezőenergia csökkenéséből /a mező munkavégzéséből/ adódott.

Harmadik példaként a Bohr-féle atomi rendszer kölcsönhatási energiáját adjuk meg az ionizált elrendeződéshez viszonyítva. A proton - elektromos mező - elektron rendszer kölcsönhatási energiája a viszonyítási konfigurációban zérus, és a rendszer mozgási energiáját is vegyük zérusnak. Abban a konfigurációban, amelyben az elektron a protontól r távolságban van, a kölcsönhatási energia nagysága:

$$U_r = - k_0 \frac{e_0^2}{r}.$$

Ebben a kifejezésben $k_0 = 9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$, $e_0 = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ az elemi töltés. A kölcsönhatási energia negatív, mert az elektronnak a proton felé kvázisztatikusan történő mozgása közben a

mező végez munkát és így energiája csökken. A H-atomban az elektron azonban $\frac{1}{2} m_0 v^2$ kinetikai energiával is bír. Kérdés, vajon az atom mechanikai energiája az ionizált állapothoz viszonyítva végül is nagyobb vagy kisebb-e? Más szóval

$$E = \frac{1}{2} m_0 v^2 - k_0 \frac{e_0^2}{r}$$

pozitív vagy negatív-e? /A viszonyítási konfigurációban u.i. $E = 0$./ A kérdésre megkapjuk a választ, ha meggondoljuk, hogy az r sugarú körpályán való mozgáshoz szükséges centripetális erőt a proton és elektron között működő Coulomb erő szolgáltatja, vagyis, hogy

$$\frac{m_0 v^2}{r} = k_0 \frac{e_0^2}{r^2} . \quad \text{/A mechanikai stabilitás feltétele./}$$

Ebből $m_0 v^2 = k_0 e_0^2 / r$. Ezt E fenti kifejezésébe helyettesítve nyerjük, hogy

$$E = \frac{1}{2} m_0 v^2 - m_0 v^2 = - \frac{1}{2} m_0 v^2 < 0,$$

vagyis az atomi rendszer energiája kisebb, mint az ionizált állapot energiája.

E két utóbbi példa nem kapcsolódik szorosan a középiskolai törzsanyaghoz, de szakkörökön vagy szakosított tantervű osztályokban feldolgozásukra sor kerülhet.

A kölcsönhatási energiával kapcsolatban ismételten megjegyzem, hogy a kölcsönhatási energia a vizsgált két konfiguráció /közös/ mezőenergiájának a különbsége. Ezt a különbséget a közös mező ellenében végzett kvázisztatikus munka adja. A közös mező kiszámítása azonban igen nehéz, sőt megoldhatatlan feladat, és ezért minden kölcsönhatási energia kiszámításánál hallgatólagosan feltesszük, hogy az a mező, amelyben a test elmozdul, igen erős az elmozduló test mezőjéhez képest, és ezért ez utóbbi gyakorlatilag nem befolyásolja az erős mezőt. Más szavakkal: a kölcsönhatási energia számításánál a mezőben mozgatott testtel mint mező nélküli objektummal számolunk. Ez nyilván hiba, és ez a hiba annál kisebb, minél gyengébb a mozgatott test mezője a többi test mezőjéhez képest.

Végezetül szólni kívánok még a belső energia bevezetéséről.

A tanulók már az általános iskolai anyagból tudják, hogy az anyag mindegyik halmazállapotban kis részecskék sokaságából áll, amely részecskék állandó rendezetlen mozgást végeznek. Megtanulták továbbá, hogy "a testek belső energiája részecskéinek rendezetlen mozgásával van kapcsolatban" [46]. Ezek az előismeretek szinte sugallják, hogy a belső energiát a középiskolában legcélszerűbb talán az ideális gázok kinetikai elméletével kapcsolatban bevezetni. Az ideális gáz molekuláiról a tanulók a kinetikai elméletben megtanulják, hogy azok csak haladó mozgást

végeznek, s így csak a haladó mozgáshoz tartozó $1/2 mv^2$ kinetikai energiával rendelkeznek. Az ideális gáz belső energiáját tehát a gázmolekulák kinetikai energiájának összege adja:

$$E_0 = N \frac{1}{2} mv^2,$$

ahol N a gáz molekuláinak számát, m egy molekula tömegét, v^2 a gázmolekulák sebességének négyzetét /pontosabban a sebesség-négyzet átlagát/ jelenti.

A következőkben megmutatjuk, hogy E_0 a T abszolút hőmérséklet függvénye. A kinetikai gázelmélet alapján egyszerűen belátható, hogy a V térfogatú ideális gáz p nyomása

$$p = \frac{Nmv^2}{3V}, \text{ ill. } pV = \frac{1}{3} Nmv^2.$$

Ha a gáz 1 molnyi, akkor

$$pV = \frac{1}{3} N_A^* mv^2,$$

ahol $N_A^* = 6 \cdot 10^{23}$ = az Avogadro-féle szám. Vessük össze ezt az összefüggést az 1 mol tömegű ideális gázra érvényes $pV = R^* T$ alakú állapotegyenlettel, ahol $R^* = 8,314 \frac{\text{J}}{\text{°K}}$.

Ekkor

$$\frac{1}{3} mv^2 = kT, \text{ ill. } E_{lk} = \frac{1}{2} mv^2 = \frac{3}{2} kT$$

összefüggésre jutunk, amelyben $k = R^*/N_A^* =$ Boltzmann-féle állandó. Ez az összefüggés azt mutatja, hogy egy molekula kinetikai energiája az abszolút hőmérséklettel arányos. Kapott eredményünket a belső energiára felírt előbbi összefüggésbe írva

$$E_0 = \frac{3}{2} NkT ,$$

vagyis ideális gáz belső energiája az abszolút hőmérséklettel arányos. Ez a megállapítás - amely ideális gázra levezethető volt - tapasztalatok alapján bármilyen halmazállapotú anyagra igaznak bizonyult. /A halmazállapotváltozás eseteit kizárva!/ Ilymódon igazoltuk azt az általános iskolában tanult megállapítást, hogy egy test belső energiájának változását /a halmazállapotváltozás eseteit kizárva/ a test hőmérsékletének változása jelzi.

Egy test belső energiájának változását legegyszerűbben termikus kölcsönhatás közben érhetjük el. Ekkor

$$\Delta E_0 = \text{konst} \cdot \Delta T.$$

A konstansról - az oktatásban már ismert módokon - kimutatható, hogy $c \cdot m$ -mel egyenlő, ahol c a vizsgált anyag fajhője, m pedig a kérdéses test tömege. A termikus kölcsönhatás során bekövetkező belső energia-változás a hőmennyiség, vagyis



$$/\Delta E_o/_{\text{term}} = Q .$$

A valódi gázok, valamint a szilárd és cseppfolyós halmazállapotú testek tárgyalásánál rá lehet és rá is kell mutatni, hogy azok belső energiájához a forgásból és rezgésből származó kinetikus energia, és a részecskék közötti kölcsönhatást biztosító mezők energiája is hozzászámít. A belső energia harmadik összetevőjéről, a részecskék nyugalmi tömegenergiájáról, a hőtanban nem lehet szólni, hiszen a relativitáselmélet ezen eredményéről csupán a középiskolai tanulmányok végén, az atomfizikában ejtenek szót. Legfeljebb ez után, a végső összefoglaláskor lehetne a testek belső energiájáról tanultakat ezzel az energiataggal kiegészíteni.

ÖSSZEFOGLALÁS

A dolgozat két nagyobb részre tagozódik. Az első rész a XX. századi fizika azon eredményeivel foglalkozik, amelyeket a korszerű fizikaoktatás nem hagyhat figyelmen kívül.

Ezek:

- nem létezik távolhatás, ezért a fizikaoktatásnak a közelhatás elvére kell épülnie;
- a fizikai mezők bizonyíthatóan anyagi sajátságokkal /tömeg, energia, impulzus, impulzusmomentum/ rendelkeznek; az energiamérlegek felírásakor a mezők energiáját is figyelembe kell vennünk;
- egy test - a relativitáselmélet és a közelhatás elve alapján - csak nyugalmi tömegenergiával E_0 , kinetikus energiával K , és a testhez elválaszthatatlanul tartozó külső mező energiájával E_m rendelkezhet:

$$E = E_0 + K + E_m ;$$

- kölcsönhatási energiával - régebbi szóhasználattal helyzeti energiával - csak rendszerek rendelkeznek, amely rendszerek egyik tagja - a rendszert alkotó testek mellett - a kölcsönhatást létesítő közös mező;

- egy test, ill. rendszer energiája vagy munkavégzés, vagy termikus kölcsönhatás közben változhat. A munkavégzés közben bekövetkező energiaváltozást munkának, a termikus kölcsönhatás bekövetkező energiaváltozást hőmennyiségnek nevezzük.

A dolgozat második része bemutatja, hogyan történik a fenti megállapítások figyelembevételével az energiafogalom tanítása az általános iskolák 6. osztályában. Majd egy lehetséges módot vázol arra vonatkozóan, hogy hogyan építhet az általános iskolában így megalapozott energiafogalomra a középiskolai fizikaoktatás.

JELÖLÉSLISTA

elektromos indukció	$\vec{D}$; $[\vec{D}] = C/m^2$
elektromos térerősség	$\vec{E}$; $[\vec{E}] = V/m = N/C$
elektromos polarizáció	$\vec{P}$; $[\vec{P}] = As/m^2$
energia	E ; $[E] = J = VA_s$
- belső, nyugalmi	E_0 ; $[E_0] = J$
- kinetikai	K ; $[K] = J$
- kölcsönhatási	U ; $[U] = J$
energiasűrűség	u ; $[u] = J/m^3$
forgatónyomaték	M ; $[M] = J$
gravitációs gyorsulás	$\vec{g}$; $[\vec{g}] = m/s^2$
hőmennyiség	Q ; $[Q] = J$
impulzussűrűség	$\vec{G}$; $[\vec{G}] = kg/sm^2$
mágneses indukció	$\vec{B}$; $[\vec{B}] = Wb/m^2 = T$
mágneses momentum	$\vec{m}$; $[\vec{m}] = Wbm$
mágneses polarizáció	$\vec{J}$; $[\vec{J}] = Wb/m^2$
mágneses térerősség	$\vec{H}$; $[\vec{H}] = A/m$
munka	W ; $[W] = J = Nm$

Felhasznált állandók

elemi töltés	$e_0 = 1,6 \cdot 10^{-19} C$
gravitációs állandó	$f = 6,67 \cdot 10^{-11} m^3/kg \cdot s^2$
influenziakonstans	$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} As/Vm$
indukciókonstans	$\mu_0 = 1,25 \cdot 10^{-6} Vs/Am$

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] P. Sz. Kudrjavcev: A fizika története. Akadémia Kiadó,
Budapest, 1951.
- [2] Max von Laue: A fizika története. Gondolat Kiadó,
Budapest, 1960.
- [3] Eftichios Bitsakis: A modern fizika és a dialektikus mate-
rializmus. Kossuth Könyvkiadó, 1976.
- [4] Új Magyar Lexikon. Akadémia Kiadó, 1972.
- [5] Fizika az általános iskolák 7. osztálya számára. Tankönyv-
kiadó, Budapest, 11. átdolgozott kia-
dás, 1975.
- [6] Fizika a gimnáziumok II. osztálya számára. Tankönyvkiadó,
Budapest, 8. kiadás, 1980.
- [7] Fizika a gimnáziumok szakosított tantervű II. osztálya
számára. Tankönyvkiadó, Budapest, 1967.
- [8] Dr. Paál Tamás: Fizika I./A,B és C variáns/. Szakközép-
iskolai tankönyv. Tankönyvkiadó,
Budapest, 1978.
- [9] Fizika a gimnáziumok I. osztálya számára. OPI, /kézirat/,
1980.

- [10] G. Gamow - J.M.Cleveland: Fizika. Gondolat Kiadó,
Budapest, 1973.
- [11] Természettudományi Kislexikon A-Z. Akadémia Kiadó,
Budapest, 1971.
- [12] Jay Orear: Modern fizika. 2. átdolgozott és bővített
kiadás, Műszaki Kiadó, Budapest, 1971.
- [13] Karácsonyi Rezső: Egy a valóság s ezer a ruhája I. Olva-
sókönyv az általános iskolai fiziká-
hoz. Tankönyvkiadó, Budapest, 1981.
- [14] Feynmann: Mai fizika I. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1969.
- [15] B.M. Javorszkij - A.A. Detlaf: Fizikai zsebkönyv. Műszaki
Könyvkiadó, Budapest, 1974.
- [16] Dr. Budó Ágoston: Kísérleti fizika I., II., III.
Tankönyvkiadó, Budapest.
- [17] Brockhaus ABC Physik. VEB F. A. Brockhaus Verlag,
Leipzig, 1973.
- [18] J.E. Williams-H.C. Metcalfe-F.E. Trinklein-R.W. Lefler:
Modern Physics. The Holt Physics
Program, 1968.
- [19] H.J. Gray-A. Isaacs: A New Dictionary of Physics.
Longman, 1978.
- [20] Modern fizikai kisenciklopédia. Gondolat Könyvkiadó, 1971.

- [21] Lánosz Kornél: Einstein évtizede /1905-1915/. Magvető
Kiadó, Budapest, 1978.
- [22] Albert Einstein: A speciális és általános relativitás
elmélete. 5. kiadás, Gondolat Kiadó,
Budapest, 1978.
- [23] Fényes Imre: Fizika és világnézet. Kossuth Kiadó,
Budapest, 1966.
- [24] A. Einstein-L. Infeld: Hogyan lett a fizika nagyhatalom.
Móra Könyvkiadó, Budapest, 1971.
- [25] Fizika 6. Munkatankönyv. Tankönyvkiadó, Budapest, 1981.
- [26] Fizika 7. Munkatankönyv. Tankönyvkiadó, Budapest, 1979.
- [27] Fizika 8. Munkatankönyv. Tankönyvkiadó, Budapest, 1981.
- [28] E.F. Taylor-J.A. Wheeler: Téridő fizika. Gondolat Kiadó,
Budapest, 1974.
- [29] Jánossy Lajos: Fejezetek a mechanikából. Minerva-MRT,
Budapest, 1975.
- [30] Az általános iskolai nevelés és oktatás terve. Tantervi
útmutató, fizika 6-8. osztály.
Tankönyvkiadó, 1977.
- [31] A fizika tartalmi megújítása az általános iskolákban.
OPI, 1977.

- [32] Bor P.-Halász T.-Bonifert D.-né-Molnár Gy.-né: Mit kell tudni a fizika tanításához a 6. osztályban? Tankönyvkiadó, Budapest, 1980.
- [33] Tanári kézikönyv a fizika 6. osztályos tanításához. OPI Pedagógus Továbbképzés Könyvtára, Budapest, 1978.
- [34] Fényes Imre: A fizika eredete. Kossuth Kiadó, Budapest, 1980.
- [35] W. Hache: Elektromagnetische Felder. Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1963.
- [36] J.D. Bernal: A fizika fejlődése Einsteinig. Gondolat Kiadó, Budapest, 1977.
- [37] A.J.Mee-P.Boyd-D.Ritchie: Science for the 70 s.Book one. Heinemann Educational Books, London, 1971.
- [38] B.M.Yavorsky-A.A.Pinsky: Fundamentals of Physics. MIR Publishers, Moscow, 1975.
- [39] Friedrich Hund: Grundbegriffe der Physik.B.I. Hochschultaschenbücher 449/449a, Mannheim, Zürich.
- [40] G.Gamow: A fizika története. Gondolat Kiadó, Budapest,
- [41] Bor P.-Halász T.-Kövesdi P.: Az energia és a munka fogalmának kialakítása a 6. osztályos új fizika tankönyvben. A Fizika Tanítása, 4., 1977.

- [42] L.D. Landau - E.M. Lifsic: Elméleti fizika II. Klasszikus erőterek. Tankönyvkiadó, Budapest, 1976.
- [43] P.A.M. Dirac: General Theory of Relativity. A Wiley-Interscience Publication.
- [44] Zátonyi S.: Eredményvizsgálat a 6. osztályban. A Fizika Tanítása, 1979/4.
- [45] Hilmar Ebinghaus: Feld und Energie im Unterricht. Naturwissenschaftliche Unterricht Physik und Chemie, 1980/6.
- [46] Fizika 6. Tankönyvpótló Jegyzet, Kézirat. 6. átdolgozott kiadás /Belső használatra/
- [47] A Magyar Tudományos Akadémia állásfoglalásai és ajánlásai a távlati műveltség tartalmára és az iskolai nevelőtevékenység fejlesztésére 1973-1976. Budapest, 1976.
- [48] J. Norwood: Századunk fizikája. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1981.



Köszönetet mondok Dr. Dombi József, valamint
Dr. Pintér Ferenc egyetemi docenseknek, akik ösztönzésükkel, továbbá értékes tanácsaikkal és észrevételeikkel nagy mértékben segítették dolgozatom elkészítését.