Isaac Asimov

Elsõ és utolsó

Még középiskolás éveim elején tornatermünkben gyakran szórakoztam azzal, hogy körbe-körbefordultam a gyûrûn. (Akkoriban még karcsú és bohó voltam.) Egy alkalommal, mikor ráuntam a gyakorlatra, egy fordulat végén egyszerûen elengedtem a szert.

Pontosan emlékszem az esetre, akkor úgy képzeltem, folytatva eddigi mozgásomat egy körív mentén, addig emelkedem, míg a nehézségi erõ meg nem állít, majd pehelykönnyen, egy tökéletes *entrechat* végén lábujjhegyen érek földet.

Nem így történt. Attól a pillanattól kezdve, hogy a gyûrût elengedtem, érintõirányban repültem tovább, és közel egyenes pályát leírva, oldalammal érkeztem a földre.

Amikor kitisztult a fejem, felkeltem, és azóta mind a mai napig úgy emlékszem vissza a dologra, mint legcsúnyább esésemre.

Balesetembõl nem kevés intellektuális hasznot húzhattam volna. Eltûnõdhettem volna a testek tehetetlensége okozta jelenségeken; töprenghettem volna a vektorok összeadásának szabályain; esetleg következtethettem volna a differenciálszámítás alapösszefüggéseire.

De õszinte leszek: ami igazán hatást gyakorolt rám, az annak a felismerése volt, hogy a gravitáció hatalmas és veszélyes erõt képvisel, amely, ha nem ügyelünk rá, szétlapíthat bennünket.

Feltehetõen ezt már jóval korábban és kevésbé fájdalmasan megtanulhattam; és feltehetõleg minden emberfia, aki egyéves kora körül hátsó lábaira állt, majd minden átmenet nélkül ismét a földön találta magát, ezzel a ténnyel tisztába jött.

És valóban, valahol azt hallottam, a kisgyermekek ösztönösen félnek az eséstõl, és hogy ez még azokból a fán töltött aenokból maradt ránk, amikor az ilyen ösztönös félelmek a túlélést jelentették õseink számára.

Elmondhatjuk, hogy a gravitációs erõ az a természeti erõ, amellyel minden ember elsõnek találkozik. És ez az az erõ, amelyrõl nem lehet megfeledkezni, mert minden lépésnél, levegõvételnél és szívdobbanásnál meg kell vele küzdenünk, szüntelen, amíg csak élünk.

Ugyanakkor vigasztaló a tudat, hogy ez a hatalmas erõ egyben védelmez is bennünket. Itt tart bolygónk felszínén, nem engedi, hogy kirepüljünk a világûrbe. Itt tartja velünk a Földön a levegõt és a vizet, örökös használatra, és a Nap körüli pályán tartja a Földet, hogy mindig élvezhessük fényét és melegét.

Ez elõzõeket figyelembe véve, nem csoda, ha az emberek többsége meglepõdik, mikor megtudja, hogy a gravitáció *nem* a legerõsebb kölcsönhatás az univerzumban. Tegyük fel például, hogy össze akarjuk hasonlítani az elektromágneses kölcsönhatásból származó erõvel, amely mágnesrúd és vas vagy proton és elektron között egyaránt hat. (Az elektromágneses kölcsönhatás eredményeképpen, a gravitációs erõvel ellentétben, taszító erõk is felléphetnek, de egyelõre ezzel ne törõdjünk.)

Vajon hogyan hasonlíthatnánk össze az elektromágneses és a gravitációs kölcsönhatás viszonylagos erõsségét?

Vizsgáljunk meg e célból két testet, melyekrõl egy pillanatra feltételezzük, hogy az egyedüli objektumok a világegyetemben. Ekkor a köztük fellépõ gravitációs vonzóerõ nagysága Newton szerint a következõ egyenlettel fejezhetõ ki:

$$(1)\quad F_g = f \times \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

– ahol F_g a két test között fellépõ gravitációs erõ; m_1 az elsõ test, m_2 a második test tömege, r a köztük levõ távolság, és f az egyetemes gravitációs állandó.

Mértékegységeink megválasztásában gondosan kell eljárnunk. Ha a tömeget grammokban, a távolságot centiméterben és az f állandót valamivel bonyolultabb mértékegységben fejezzük ki, akkor a gravitációs erõt dinnek nevezett mértékegységben kapjuk. (Mielõtt ennek a fejezetnek a végére érnénk, ezek a dinek ki fognak esni, ezért céljainknak megfelel, ha a dint egyfajta egy szótagos zajnak tekintjük.)

Most lássunk munkához. Az f értéke (jelenlegi tudásunk szerint) a világegyetemben mindenütt ugyanakkora. Az általam használt mértékegységekben kifejezve nagysága $6{,}67 \times 10^{-8}$. Ha jobban szeretik a sok nullával kifejezett számokat, akkor $g =$ 0,000 000 066 7.

Következõ lépésként tegyük fel, hogy a vizsgált két test tömege megegyezik. Ez azt jelenti, hogy $m_1 = m_2 = m$, így $m_1 m_2 = mm = m_2$. Feltételezzük továbbá, hogy a két test egymástól mért távolsága, pontosabban középpontjaik távolsága éppen egy centiméter. Ebben az esetben $r = 1$, és így $r^2 – 1$. Ezek után az (1) egyenlet a következõ alakra egyszerûsödik:

$$(2)\quad F_g = 0{,}000\,000\,066\,7\ m^2.$$

Ezek után továbbléphetünk, és megvizsgáljuk az elektromágneses kölcsönhatásból származó erõt, amelyet az F_e szimbólummal jelölhetünk.

Pontosan száz évvel azután, hogy Newton felállította az egyetemes tömegvonzást leíró egyenletét, Coulomb (1736–1806) kimutatta, hogy két elektromosan töltött test között fellépõ elektromágneses erõt egy hasonló alakú egyenlettel lehet kifejezni.

Ezért most azt is feltételezzük, hogy a két test – amelyek között a fellépõ gravitációs erõt az elõbb már számoltuk – elektromos töltést is hordoz, és így köztük elektromágneses erõ is fellép. Annak érdekében, hogy ezt az elektromágneses erõt összehasonlíthassuk a gravitációs erõvel, biztosítanunk kell, hogy ez az erõ is vonzást eredményezzen, azaz legyen az egyik test pozitív, a másik negatív töltésû. (Természetesen késõbbi eredményeink igazak maradnának, ha elektromágneses vonzóerõk helyett elektromágneses taszítóerõket feltételeznénk, de minek bonyolítsuk feleslegesen munkánkat?)

Coulomb nyomán a két test között fellépõ elektromágneses erõ a következõ egyenlettel fejezhetõ ki:

$$(3)\quad F_e = \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

ahol q_1 az elsõ test, q_2 a második test töltése, és r a köztük levõ távolság.

Ha a távolságot centiméterekben és a töltést ún. „elektrosztatikus egységekben” mérjük, akkor most szükségtelen egy a gravitációs konstanssal analóg mennyiség közbeiktatása, feltéve, hogy a szóban forgó tárgyakat vákuum választja el egymástól. És mivel az elején azzal kezdtük, hogy ez a két test egyedül van a világegyetemben, ezért szükségszerû, hogy köztük vákuum legyen.

Ha a fenti mértékegységeket használjuk, az elektromágneses erõ értékét dinekben kifejezve kapjuk meg.

Egyszerûsítsük tovább a helyzetet, és feltételezzük, hogy a pozitív elektromos töltés nagysága megegyezik a negatívéval, úgyhogy $q_1 = q_2 = q$, ami azt jelenti, hogy $q_1 q_2 = qq = q_2$. Mivel a két testet éppen egy centiméter választja el egymástól, ezért $r^2 = 1$, és a (3) egyenlet a következõ alakra egyszerûsödik:

$$(4)\quad F_e = q^2$$

összegezzük most az eddigieket. Adva van két test, melyek középpontja egy centiméterre van egymástól, mindkettõnek azonos nagyságú (de különbözõ elõjelû) töltése van, és a tömegük is megegyezik. Köztük tehát gravitációs és elektromágneses vonzás egyaránt fellép.

Következõ feladatunk annak meghatározása, mennyivel erõsebb (vagy mennyivel gyengébb) az elektromágneses erõ a gravitációs erõnél. E célból a (4) egyenletet elosztjuk a (2) egyenlettel, és így megkapjuk az erõk arányát:

$$(5) \quad \frac{F_e}{F_g} = \frac{q^2}{0{,}000\,000\,066\,7\; m^2}$$

Az egyenlet jobb oldalát átalakítjuk úgy, hogy a tizedes tört eltûnjék a nevezõbõl. Ezt úgy tehetjük meg, hogy a nevezõ reciprok értékével szorozzuk a számlálót (azaz 1-et osztjuk a nevezõvel). Mivel $1/0{,}000\,000\,066\,7 = 1{,}5 \times 10^7$, vagy másképpen 15 000 000, az (5) egyenlettel a következõ alakba írhatjuk:

$$(6) \quad \frac{F_e}{F_g} = \frac{15\,000\,000\; q^2}{m^2}$$

vagy még egyszerûbben:

$$(7) \quad \frac{F_e}{F_g} = 15\,000\,000 \frac{(q)^2}{m}$$

Mivel F_e és F_g egyaránt dinekben kifejezett mennyiségek, ezért arányuk kiszámításakor dineket osztunk dinekkel, a mértékegységek tehát kiesnek, és amit kapunk, az egy mértékegység nélküli szám. Más szavakkal: azt fogjuk találni, hogy az egyik erõ valahányszorosa a másiknak, és ez a viszonyszám már független attól, milyen mértékegységeket használunk, illetve milyen mértékegységet használ a Fomalhaut csillag ötödik bolygóján valamely értelmes lény. Látjuk, amit kapunk, az egy univerzális állandó lesz.

A két erõ arányának meghatározásához a (7) egyenletbõl láthatóan elõször $\frac{q}{m}$ értékét kell meghatározni; vagyis egy test töltését osztanunk kell a tömegével. Vizsgáljuk meg elõször a töltést.

Minden test szubatomi részecskék változatos sokaságából épül fel. Ezeket a részecskéket töltésük alapján három osztályba sorolhatjuk. Az I. osztályba tartoznak azok a részecskék, amelyeknek egyáltalán nincs töltésük. Ilyen például a neutron és a neutrínó. A II. osztályba tartoznak azok a részecskék, amelyek töltése pozitív (például a proton és a pozitron). Azonban minden elemi részecske, melynek töltése pozitív, mai ismereteink szerint abban is hasonlít egymásra, hogy *egyforma* nagy pozitív töltése van. Ezért töltésüket + 1-nek vehetjük. A III. osztályba azok a részecskék tartoznak, melyek töltése negatív. Ilyen például az elektron és az antiproton. Ezen részecskék is hasonlítanak egymásra abban, hogy töltésük nagysága ugyanaz, –1-nek vehetõ. Látható, bármely test, bármekkora legyen is, lehet zérus töltésû, ha semleges, vagy egyenlõ számú pozitív és negatív részecskékbõl épül fel.

Egy ilyen testre $q = 0$, és így tömegétõl függetlenül a $\frac{q}{m}$ hányados is zérus. Ilyen testekre a (7) egyenlet szerint $\frac{F_e}{F_g} = 0$. A gravitációs erõ sohasem lehet zérus (legalábbis amíg a testeknek tömegük van), ami azt jelenti, hogy a fenti feltételek mellett végtelenszer erõsebb az elektromágneses erõnél, amelyet mellette számításon kívül hagyhatunk.

Pontosan ez a helyzet a valóságban. A Föld és a Nap eredõ töltése jó közelítéssel zérus, ezért a Föld pályájának kiszámításánál elegendõ a két test között fellépõ gravitációs vonzással számolni. Nyilvánvalóan az $F_e = 0$, és így az $\frac{F_e}{F_g} = 0$ eset is egészen extrém, és nem túlságosan érdekes. De vajon mi a helyzet a másik véglet esetén? Mi van, ha egy testnek nem nulla, hanem maximális az eredõ töltése?

Ha a töltést maximalizálni akarjuk, elõször is a semleges részecskéket kell eltávolítani, amelyek járulékot adnak az össztömeghez, anélkül hogy az össztöltést növelnék. Ezért feltételezzük most, hogy van egy olyan anyagdarabunk, amely kizárólag töltött részecskékbõl áll. Természetesen csak egyfajta töltött részecskékbõl, hiszen a töltések keveredése az össztöltés csökkenéséhez vezet.

Ezek szerint azt kívánjuk, hogy az egyik test kizárólag pozitív töltésû részecskékbõl, a másik kizárólag negatív töltésû részecskékbõl épüljön fel. Ennél jobbat nem tudunk kitalálni.

Valamit eddig azonban még nem vettünk számításba. Noha most már az összes részecske $+1$ vagy -1 töltésû, tömegük azonban még igen különbözõ. Ezért azt is megkívánjuk, hogy valamennyi töltött részecske a lehetõ legkisebb tömegû legyen. Ebben az esetben a legnagyobb lehetséges töltést a legkisebb lehetséges tömeg hordozza, és a $\frac{q}{m}$ hányados maximális lesz.

Történetesen a legkisebb tömegû negatív töltésû részecske az elektron, és a legkisebb tömegû pozitív töltésû részecske a pozitron. Ezen részecskékre nézve a $\frac{q}{m}$ hányados nagyobb, mint bármely más ismert testre (és eleddig nem vetõdött fel a gyanú, hogy létezhet olyan más objektum, amelyre nézve a $\frac{q}{m}$ hányados nagyobb lenne).

Térjünk vissza most kiindulásul szolgáló két testünkhöz, amelyek adott (és egymással megegyezõ) számú elektronból, illetve pozitronból épülnek fel. A két test között elektromágneses és gravitációs erõ egyaránt fellép.

Ha az elsõ és a második testben egyaránt megháromszorozzuk az elektronok, illetve pozitronok számát, akkor a testek össztöltése is megháromszorozódik, ami az elektromágneses erõ $3 \times 3 = 9$-szeresére való növekedését vonja maga után. Ugyanakkor a testek össztömege is megháromszorozódik, tehát a köztük fellépõ gravitációs erõ is kilencszer nagyobb lesz. Mindkét erõ egyenlõ mértékben megnövekedik, kettõjük aránya tehát nem változik.

Az erõk aránya akkor nem változik, ha az egyik test töltése vagy tömege különbözik a másik töltésétõl vagy tömegétõl; ugyanez a helyzet, ha az egyik test töltését vagy tömegét a másikétól különbözõ mértékben változtatjuk.

Mivel bennünket csak az elektromágneses és a gravitációs erõ aránya érdekel, és ez nem függ attól, hogyan változik az elektronok száma az egyik testben, illetve a pozitronok száma a másik testben, nyugodtan foglalkozhatunk a legegyszerûbb esettel.

Más szóval elegendõ egyetlen elektron és egyetlen pozitron vizsgálatára szorítkoznunk, melyek egymástól pontosan egy centiméter távolságban helyezkednek el. Ez a rendszer lehetõséget ad az elektromágneses és gravitációs erõ hányadosa maximális értékének kiszámítására.

Történetesen az elektron és a pozitron azonos tömegû. Ez a tömeg grammokban kifejezve $9{,}1 \times 10^{-28}$, vagy ha jobban tetszik: 0,000 000 000 000 000 000 000 000 000 91. Az elektron töltése a pozitronétól csak elõjelben különbözik. Nagysága elektrosztatikus egységben kifejezve $4{,}8 \times 10^{-10}$ vagy 0,000 000 000 48.

A $\frac{q}{m}$ hányados kiszámításához az elektron (vagy a pozitron) töltését el kell osztanunk a tömegével. Ha $4{,}8 \times 10^{-10}$-t elosztjuk $9{,}1 \times 10^{-28}$-nal, az eredmény $5{,}3 \times 10^{17}$ vagy 530 000 000 000 000 000 lesz.

De a (7) egyenlet szerint a $\frac{q}{m}$ hányadost még négyzetre is kell emelni. $5{,}3 \times 10^{17}$ önmagával szorozva $2{,}8 \times 10^{35}$-t ad, amit így is írhatunk: 280 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000.

Ha most jobban megnézzük a (7) egyenletet, látjuk, hogy az utóbbi számot még 15 000 000-val meg kell szoroznunk, hogy végre megkapjuk az általunk keresett hányadost. Ezt a szorzást is végrehajtva, az eredmény $4{,}2 \times 10^{42}$, másképpen 4 200 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 lesz.

Arra az eredményre jutottunk tehát, hogy az elektromágneses erõ a legkedvezõbb körülmények között több mint 4 millió-billió-billió-billiószor erõsebb a gravitációs erõnél.

Tény, hogy normál körülmények között elektron-pozitron rendszerek környezetünkben nem találhatóak, mivel a pozitronok gyakorlatilag alig fordulnak elõ. Ehelyett világegyetemünket (amennyire ezt ma meg tudjuk ítélni) elektron-proton típusú elektromágneses kölcsönhatások tartják össze. A proton tömege 1836-szor nagyobb az elektronénál, úgyhogy a gravitációs vonzás megnövekedik anélkül, hogy az elektromágneses vonzás az elõzõ esethez képest változna. Ily módon az $\frac{F_e}{F_g}$ hányados most csak $2{,}3 \times 10^{39}$.

Az elõbb tárgyaltakon kívül természetben még két fontos kölcsönhatást ismerünk. Az egyik az ún. erõs kölcsönhatás, amely több mint százszor olyan erõs, mint az elektromágneses, ide soroljuk a magerõket; a másik az ún. gyenge kölcsönhatás, amely sokkal gyengébb az elektromágnesesnél. Ezek azonban mind a gravitációsnál jóval erõsebb kölcsönhatások.

A valóságban a gravitációs erõ – noha ez az elsõ természeti erõ, amelyet megismertünk, és amely végigkísér egész életünkön, és amelynek erõsségét megtanultuk respektálni – *messze a leggyengébb ismert erõ a természetben*. Az elsõ és egyben az utolsó.

De vajon miért tûnik számunkra a gravitációs kölcsönhatás olyan erõsnek?

Elõször is mind a gyenge, mind az erõs kölcsönhatás igen rövid hatósugarú, úgyhogy csak mintegy az atommag átmérõjének megfelelõ távolságokon belül érezhetõ. Az elektromágneses és a gravitációs erõ az, amely hosszú távon hat. Gyenge izmainkkal képesek vagyunk arra, hogy egy 20 kilós súlyzót a Föld egész tömegének gravitációs vonzása ellenében felemeljünk. Egy játékmágnes a Föld egész gravitációs terének ellenében magához vonzza a közelében levõ varrótût.

Ebbõl már látszik, hogy a gravitáció valóban gyenge kölcsönhatás. De nézzük meg, találunk-e még szembetûnõbb példákat erre.

Tegyük fel, hogy a Föld teljes egészében pozitronokból, a Nap pedig pusztán elektronokból épül fel. A köztük fellépõ vonzás ekkor sokkal nagyobb lenne, mint az a gravitációs erõ, amely most összeköti õket. Hogy a fellépõ elektromágneses vonzóerõ nagyságát a gravitációs erõ jelenlegi szintjére csökkentsük, a Földet a Naptól mintegy 33 000 000 000 000 000 fényévre kellene eltávolítani, ami körülbelül 5 000 000-szorosa az általunk ismert világegyetem átmérõjének.

Vagy képzeljenek el a Nap helyén 1 000 000 tonna elektront (ez egy igen kis aszteroida tömegének felel meg,) és a Föld helyén 3,33 tonna pozitront. Az elektomágneses vonzás, amely ezen két jelentéktelen tömeg között fellép, megegyezne azzal a gravitációs vonzóerõvel, amely a Föld és a Nap irtóztatóan nagy tömegei között jelenleg fellép.

Valójában ha valaki 1 000 000 tonna elektront szórna a Napra, és 3,33 tonna pozitront a Földre, ez megkétszerezné a Nap vonzóerejét, és jelentékenyen megváltoztatná a Föld pályáját. És ha pozitronok helyett a Földre is elektronokat szórnánk, a fellépõ taszítóerõ akkora lenne, hogy a gravitációs vonzást legyõzve, a Földet kiröpítené a Naprendszerbõl.

Természetesen mindez csak játék a számokkal. De az a tény, hogy az elektromágneses erõk ilyen erõsek, azt jelenti, hogy képtelenség jelentõs számú azonos töltésû részecskét egy helyen összegyûjteni. Túlságosan erõsen taszítanák egymást. Ha feltételezzük, hogy a Napot játékgolyó nagyságú darabokra tudjuk szabdalni, és ezeket a golyókat egyenletesen szétszórnánk a Naprendszerben, vajon tudnánk-e olyan szerkezetet konstruálni, amely megakadályozná azt, hogy ezek az anyagdarabkák a gravitáció hatására egy csomóba gyûljenek? Nos, ez sem nagyobb feladat annál, mint ha 1 000 000 tonna elektront kellene egy labda térfogatában összepréselnünk.

Természetesen az elmondottak érvényesek arra az esetre is, amikor jelentékeny mennyiségû pozitív töltést akarunk hasonló mennyiségû negatív töltésbõl különválasztani.

Ha az univerzum elsõsorban elektronokból és pozitronokból állna, az elektromágneses erõk hatására szükségszerûen egy helyre zsúfolódnának. Mivel ezek egymásnak antirészecskéi, összeolvadnának, megsemmisítenék egymást, és az univerzumot gammasugárzással töltenék be.

Szerencsére világunkban a fõ töltéshordozók az elektronok és a protonok. Noha ezek töltése is éppen ellenkezõ (–1 az elõzõé, és +1 az utóbbié,) de más tulajdonságaikban nem egészítik ki egymást (gondoljunk például a tömegükre). Elektron és proton egymásnak nem antirészecskéje, más szóval nem semmisíthetik meg egymást.

Ellenkezõ töltésük miatt azonban erõs vonzás lép fel köztük, amellyel bizonyos határok között számolnunk kell. Egy elektron és egy proton erõsen megközelítheti egymást, és ekkor együtt egy hidrogénatomot alkothatnak.

Különálló protonok is összekapcsolódhatnak a köztük fellépõ elektromágneses taszítás ellenére, éppen az igen kis hatótávolságú erõs kölcsönhatás miatt, amely a szomszédos protonok között olyan vonzóerõt ébreszt, amely bõségesen ellensúlyozza az elektromágneses taszítást. Ez teszi lehetõvé, hogy a hidrogénen kívül más elemek is létrejöjjenek.

Röviden: az atommagon belül a magerõk dominálnak; magában az atomban az elektromágneses erõk szerepe döntõ; és végül a gravitációs kölcsönhatás az uralkodó a csillagászati méretû testek világában.

A gravitációs kölcsönhatás gyengesége a felelõs a fizikusok kudarcainak egy egész soráért.

A különbözõ erõk hatásukat általában elemi részecskék átvitele, mozgatása útján éreztetik. A magerõk jelenlétüket pionok (pi-mezonok) átvitelével árulják el, míg az elektromágneses kölcsönhatás (a második legerõsebb kölcsönhatás) felelõs a fotonok kisugárzásáért. A gyenge kölcsönhatások közvetítéséért is egy elemi részecske a felelõs.

Eddig rendben volnánk. Mivel a gravitáció is beletartozik a sorba, joggal várjuk, hogy ezt a kölcsönhatást is részecskék közvetítsék.

Ennek a részecskének a fizikusok a „graviton” nevet adták. Már a tulajdonságait is meghatározták, illetve azokat a tulajdonságokat, amelyekkel nem rendelkezik. Eszerint ez a részecske elektromosan semleges és tömeg nélküli lenne. (Mivel nincs nyugalmi tömege, azt várhatjuk, hogy a fény sebességével halad.) Ez a részecske is stabil; azaz magára hagyva nem bomlik fel, és nem alkot más részecskéket.

Eddigi ismereteink szerint leginkább a neutrínóra kell hasonlítania, amely szintén stabil, elektromosan semleges, és tömeg nélküli (ebbõl következik, hogy a fény sebességével haladó) részecske.

Mindazonáltal a graviton és a neutrínó bizonyos szempontból különbözik egymástól. A neutrínó két fajtája ismeretes, az elektron-neutrínó és a müon-neutrínó, mindegyik a maga antirészecskéjével – azaz összesen négy különbözõ fajta neutrínót ismerünk. A graviton viszont egyféle lehet, amelynek önmaga az antirészecskéje. Csak egyféle graviton létezhet.

További különbség, hogy a graviton spinje a 2-es számmal jellemezhetõ, míg a neutrínó spinje a többi szubatomi részecskéhez hasonlóan 1/2. Ismerünk néhány mezont, melyek spinje 0, a foton spinje pedig 1.)

A gravitont mind ez ideig nem sikerült detektálni. Áthatolóképessége még a neutrínóénál is nagyobb. Mindazonáltal a neutrínó, noha tömege és töltése nincs, mérhetõ nagyságú energiát szállít. Létezésére akkor kezdtek elõször gyanakodni, amikor elég energiát lopott el valahonnan ahhoz, hogy a könyvelésben észrevehetõ hiányt okozzon.

Na és a gravitonok?

Emlékezzenek vissza arra a bizonyos 10^{42}-es faktorra!

Egy graviton billiószor billiószor billiószor kevesebb energiát szállít, mint a neutrínó. Figyelembe véve, milyen nehézségeket okozott a neutrínó detektálása, a graviton észlelése olyan probléma, amely valóban próbára teszi a magfizikusokat.

Pápay Kálmán fordítása