

Részecskefizika szakkör kockákkal

BEVEZETŐ AZ ELEMİ RÉSZECSEKÉK ÉS A RÉSZECSEFIZIKA
VILÁGÁBA

DR. OLÁH ÉVA

Tartalomjegyzék

A szakköri füzet megírásának ötlete [15]	3
Bevezető - tévedések vígjátéka	3
A legnagyobb részecskegyorsító, a CERN.....	6
A CERN kutatóközpont gyorsítói	6
Detektorok	8
A részecskék világa.....	9
Részecskék és erők szemléltetése [15]	9
A Standard Modell	11
A részecskék csoportosítása.....	12
Fermionok	12
Kvarkok és gluonok	13
Leptonok	14
Neutrínók	14
Neutrínó oszcilláció.....	15
Bozonok.....	15
A Higgs-bozon.....	15
Hadronok, barionok, mezonok és már összetett részecskék.....	16
Antianyag részecskék	16
Kölcsönhatások	17
Pauli-elv	17
Kvantum Színdinamika (QCD) [15]	18
Hadronjáték [15]	18
Bomlások.....	19
Béta-bomlások [15].....	20
Hadronizáció[15].....	22
Leptonszám megmaradás [15].....	23
Képes ötletek a kvark-kockákkal való tanuláshoz, játékhöz	26
A készlet	26
Kvarkok ízei	26
Színek és antiszínek.....	27
Antikvarkok	28
Leptonok és antileptonok	28
Bozonok.....	29
Fermionok	29

Standard modell.....	30
Részecske családok	30
Hadronok.....	30
Barionok	31
Mezonok.....	31
Összetett részecskék alkotása.....	31
Proton.....	31
Neutron	32
Hidrogén.....	32
Deutérium	32
Antihidrogén	33
Átalakulások.....	33
“Hibás” részecskék	37
További ötletek, javaslatok	37
Sorrendek.....	37
Mellékletek:.....	38
Sablonok.....	38
Ellenőrző kérdések	0
Pedagógiai összefoglaló	1
Köszönetnyilvánítás.....	1
Felhasznált irodalom	1

Téma	Részecskefizika tanítása játékos és szemléletes formában
Tantárgy	Fizika
Javasolt évfolyam	Középiskola 9-12. évfolyam
A foglalkozás típusa	Szakkör, tehetséggondozás
Fejlesztendő kompetenciaterületek	Természettudományi, matematikai, önálló tanulás
Módszerek	Játékos foglalkozás, munkáltatás, kooperatív technikák, élmény pedagógiai módszerek
Tanulói munkaformák	Projektmunka, csoportmunka, egyéni munka
Időigény	45 perc, heti egy alkalom Modulonként 6-10 egymást követő óra; alkalmanként 45 perc
Eszközigény	Karton papír, ragasztó, filctoll, hungarocell darabok, olló, vonalzó

A szakköri füzet megírásának ötlete [15]

A részecskefizika nem szerepel a fizika tanmenetekben, bővebb tárgyalására legfeljebb szakköri keretek között kerülhet sor. Ráadásul nagyon nehéz a diákokhoz közelebb vinni a témakört, hiszen a részecskék nagyon parányiak, például egy kvark mérete 10^{-18} m, egy protoné három nagyságrenddel nagyobb, emiatt nagyon nehéz elképzelni őket makrovilágunkban. Szubatomi részecskékről van szó, vagyis az atom 10^{-10} m méreténél is kisebbek. Kémia órán a diákok megismerkednek az atom főbb alkotórészeivel, amelyeket a XIX. század végétől kezdve fedeztek fel. 1897-ben Thomson az atom egyik alkotórészét, az elektront fedezte fel katódsugárcsőves kísérletei közben. Később Rutherford rájött munkatársaival együtt, hogy az atom belsejében egy parányi, kemény mag található, amelyen az alfa-részecskék különböző mértékben szóródnak. 2011-ben volt ennek százéves évfordulója. 1932-ben pedig Chadwick az atommag másik nukleonját, a neutron tudta azonosítani egyik kísérletében, amelyben alfa-részecskével bombázott berilliumot, aminek következtében egy semleges részecske lökődött ki. Az 1950-es évektől kezdve pedig rohamosan nőtt a felfedezett szubatomi részecskék száma, hiszen a részecskegyorsítóknál egyre nagyobb energiákon tudtak részecskéket ütköztetni és azonosítani is tudták a keletkezett bomlástermékeket.

Az adatokat a részecskékről több tanár is megtanítja az órákon, de tapasztalom, hogy nagyon nehezen rögzül a diákok fejében. Hiszem, hogy a szemléletesség az oktatás során is nélkülözhetetlen, hiszen az emberek többsége vizuális típus.

Ennek érdekében született meg az ötlet, hogy egy "kézzel fogható", szabad szemmel is látható modellkészlet segítségével tanítsuk meg a láthatatlan mikrovilágban zajló folyamatokat, ismerkedjünk részecskékkal.

Bevezető - tévedések vígjátéka

Az emberiséget mindig foglalkoztatták a végső kérdések. Hogyan keletkezett a világ? Mért léte-zünk? Milyen törvények szabályozzák a világ létét és változását? Mi az anyag? Hogyan keletkezett a Föld és a földi élet?

Még ennél is többet állíthatunk: talán nincs is olyan ember, aki életének egy szakaszában legalább fel ne tette volna ezeket, vagy az ehhez hasonló kérdéseket. A legtöbbször fiatalon, iskolás korunkban a világ megismerésével együtt szembesülhettünk ezekkel a talányokkal. A többség a kellemes bizsergés

után talán napirendre tér a kérdések felett: „ki tudja...”, „mit számít...”. Néhányan azonban nyughatatlanul újra és újra felteszik a legnagyobb és legmerészebb kérdéseket, aztán kitartóan kutatni kezdenek a lehetséges válaszok után.

Így volt ez már a civilizáció hajnalán is. A kérdésre, hogy „Miből áll a világ?” az első, alaposan végig gondolt választ az ókori filozófusok adták. Spekuláció útján arra a következtetésre jutottak, hogy az anyag egy darabig újra és újra kisebb részekre osztható, míg végül egy olyan kicsi anyagrészhez érke-zünk, amely már oszthatatlan – görögül „atomosz” – innen az atom szavunk. Mivel kísérleti úton sem megerősíteni, sem cáfolni nem lehetett az atom elképzelést, ezért a tudományos figyelem más irányba fordult. A felvilágosodás azonban a tudományos módszereket is új alapra helyezte, így az korábban sosem látott fejlődésnek indult. De mi is tulajdonképpen a tudományos módszertan? Néhány alapelv következetes betartása:

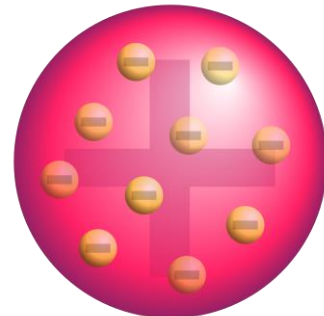
- Első lépés: a megfigyelés. A tudósokat szűnni nem akaróan érdeklik a természet jelenségeit. Azok megfigyelése a tudományos munka alapja.
- Második lépés: hipotézis (elmélet) alkotás. A megfigyelés alapján a tudósok elképzelik és kitalálják, milyen törvények és szabályok lehetnek a megfigyelt jelenségek mögött. A fantázia, képzelőerő – és persze a korábban megszerzett tudás – a legfőbb segítők ebben.
- Harmadik lépés: A hipotézis alapján a tudósok megjósolják, hogy az új elképzelés szerint ellenőrzött környezetben milyen eredménnyel kell végződnie egy kísérletnek vagy megfigyelésnek.
- Negyedik lépés: a kísérlet megtervezése és kivitelezése és összevetése a hipotézissel. A kísérletnek megismételhetőnek kell lennie és azonos körülmények között ugyanazt a tapasztalt jelenséget kell adnia.
- Ötödik lépés: Az elmélet/hipotézis felülvizsgálata: megerősítése, módosítása vagy elvetése.

A tudósok, így a fizikusok is, rengeteg megfigyelést és kísérletet végeznek. A kísérletek alapján pedig elképzeléseiket folyton módosítják, annak alapján, amit tapasztaltak. Minden elmélet tartalmazhat hibákat, vagyis a tudósok, bár sokat tudnak, még többet tévednek, beleértve akár a legnagyobbakat is. Pontosan így történt az elemi részecskék esetén is.

Az ókori filozófusok atom elméletét a XVIII. század végén és XIX. század elején élő John Dalton¹ szintén igaznak gondolta. Ezzel az elmélettel jól megmagyarázható volt, hogy miért oldódik jobban a széndioxid a vízben a nitrogénnél.

Majd száz évvel később viszont J.J. Thomson² katódsugárcsöves kísérletével kimutatta, hogy az atomokból ki tud lépni valami, ami nem fény és ráadásul negatív töltésű. Ezt a valamit elektronnak nevezte el és egy majd kétezeréves közmegegyezésről azt állította, hogy nem egyezik a megfigyelésekkel: az atom nem oszthatatlan, hanem osztható. Ezért a felfedezéséért Nobel díjat kapott.

Ha már tudjuk, hogy a (tévesen) oszthatatlannak gondolt atom mégis osztható, akkor milyen lehet a szerkezete? J.J. Thomson felállított egy „mazsolás kalács” atommodellt. Ebben a modellben a negatív elektronok (mazsolák) egy pozitív, egységes atomtestben (kalács) úszkálnak. Nobel-díj ide vagy oda, csak pár év kellett, hogy kiderüljön, Thomson tévedett.



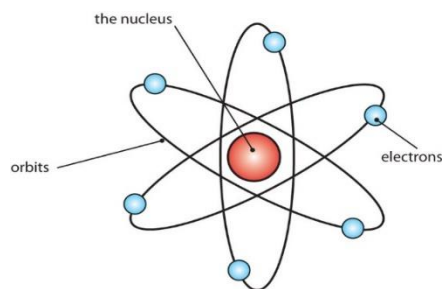
1. ábra A Thomson féle mazsolás kalács atommodell

¹ John Dalton (1766-1844) Angol kémikus, fizikus és meteorológus, az atomelmélet megfogalmazója a kémiában.

² Joseph John Thomson (1856-1940) Nobel-díja brit fizikus, az elektron felfedezője.

Nem is akar ki, hanem egy korábbi tanítványa Ernest Rutherford³ cáfolta meg az elméletét. Ő olyan kísérletet alkotott, amelynek segítségével kimutatta, hogy az atomban van egy, magánál az atomnál három nagyságrenddel, tehát ezer-szer kisebb, de az atom tömegének nagy részét magában foglaló valami. Ezt atommagnak nevezte el. A felfedezésért szintén járt a Nobel-díj.

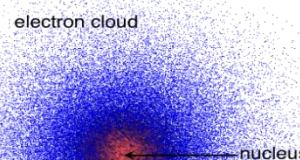
De ha már tudjuk, hogy van atommag és vannak elektronok, akkor milyen az atom szerkezete? Rutherford megalkotta a maga elméletét erről. Ezt mutatja a 2. ábra A Rutherford-féle atommodell.



2. ábra A Rutherford-féle atommodell

Ismerős? Pedig ez is tévedés. Ha az elektronok ilyen pályán keringenének, akkor a keringésük során energiát veszítenének, amelyet fény formájában kisugároznának, és ezzel párhuzamosan belezuhanának az atommagba. A tapasztalatunk viszont az, hogy ilyesmi nem történik, tehát a modell hibás, biztosan nem a valóságot írja le.

A sok-sok – utólag helytelennek bizonyuló – elmélet mégsem volt haszontalan. A kutatók alig két-három generációja a kvantum-mechanika elméletével és kísérletek ezreivel végül megalkotta azt a modellt, amely leginkább illeszkedik a megfigyeléseinkhez és a legpontosabban jósolja meg egy-egy kölcsönhatás kimenetelét. Ezek szerint az atom nem más, mint egy protonokból és neutronokból álló atommag, amelyet különböző alakú elektron felhők vesznek körül. A felhőben az elektron egyszerre fordul elő mindenhol – csak eltérő valószínűséggel. (Lásd: 3. ábra A hidrogén atom jelenlegi atommodellje)



3. ábra A hidrogén atom jelenlegi atommodellje

Ez az eredmény tévedéseken, kísérleteken, cáfolatokon, újabb kísérleteken, még újabb kísérleteken, még újabb cáfolatokon, még újabb elméleteken, végül igazolásokon és megerősítéseken át kristályosodott ki, amit előbb a kutatók és tudósok közössége, majd végül mindenki más is elfogadott igazságnak, mert egyezik a megfigyelésekkel, és a segítségével helyesen tudunk következtetni jövőbeli kölcsönhatásokra.

Miért is érdekes ez a tévedések vígjátéka, ahol Nobel-díjas tudósok sorra alkottak a valósággal köszönőviszonyban sem lévő elméleteket? Nos azért, mert ezek a legkiválóbb koponyák bátran kísérleteztek, bátran gondolkodtak és jutottak el kutatásaikkal olyan ismeretlen területekre, ahol gondolatban még senki sem járt. Helyes meglátásaik a legnagyobb elismerésben részesültek, és még a tévedéseik is inspiráltak másokat, hogy megismerjék a valóságot. Az újabb tudós generációk ehhez újabb és újabb, mind nagyobb kísérleti berendezéseket alkottak, míg mára a világ legnagyobb és legbonyolultabb berendezései segítik a munkájukat: a részecskegyorsítók.

Ez a füzet a ma ismert elemi részecskékről szól (amelyekről ma azt gondoljuk, hogy elemiek, tehát nincs belső szerkezetük), és a ma ismert legteljesebb – de BIZONYOSAN hiányos – modellt, a részecskék standard modelljét ismerteti. Szemben a klasszikus mechanikával, ahol mondhatjuk, hogy mindent tudunk, a fizika ezen ágán ezernyi kérdőjel és talány várja a kíváncsi megfigyelőt. Ez a füzet ezért azokat szeretné megszólítani, akik a legkíváncsibbak, akiket folyton kérdéseket és kételyeket fogalmaznak meg, nem félnek akár meghökkentő hipotéziseket felállítani. Bízunk benne és reméljük, hogy a részecskefizikával itt megismerkedők egyszer majd hozzájárulnak a mostani modell tökéletesítéséhez, vagy egy másik, még teljesebb modell megalkotásához, amely leírja a minket körülvevő valóságot.

³ Ernest Rutherford (1871-1937) – új-zélandi születésű brit, Nobel-díjas fizikus, az atommag felfedezője

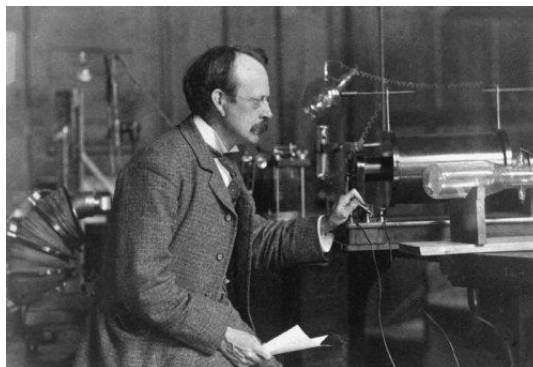
A legnagyobb részecskegyorsító, a CERN

Ahhoz, hogy J.J Thomson megállapítsa, hogy az atomok mégsem teljesen homogén és oszthatatlan részecskék, elég volt egy nagybacska asztal, rajta pedig egy pár kilós műszer, minden részecskegyorsító őse, a katódsugárcső. (4. ábra)

A kutatók hamar rájöttek, hogy minél kisebb részecskét szeretnének vizsgálni, tulajdonságaikat tanulmányozni, annál nagyobb energiára van szükségük. A nagy energia viszont nagy berendezésekhez vezetett. A nagyobb berendezések segítségével még kisebb részecskék létezését lehetett megjósolni, azok igazolásához majd tanulmányozásához viszont még nagyobb berendezésekre volt szükség. Így jött el a XX. Század második felében a részecskegyorsító korszaka. És így született meg a világ leghíresebb kutatóközpontja a CERN, a részecske kutatás „fellegvára”, Svájcban, Genf mellett.

A francia-svájci határ mentén, 1954-ben alapított CERN nagyenergiás fizikai kutatóintézet (angol nevén European Organization for Nuclear Research) jelenleg a világ legnagyobb kutató laboratóriuma. 2009 óta itt működik a világ legnagyobb energiájú részecskegyorsítója, a Nagy Hadronütköztető (LHC: Large Hadron Collider), amely a nagyenergiás részecske- és magfizikai kutatások legfontosabb infrastrukturális berendezése. A CERN a nagyenergiás fizikai kutatások összeurópai stratégiai központja, egyben meghatározó partner a rokon területeken (asztro-részecskefizika, asztronómia, kozmológia, magfizika, nukleáris asztrófizika) folyó kutatásokban. 2010-ben a CERN „világ-kutatóintézetté” nyilvánította magát és azóta lehetővé teszi, hogy nem-európai országok is rendes tagokká válhassanak a jelenlegi 22 európai tagország mellett.

Magyarország 1992-ben csatlakozott hivatalosan a CERN-hez. Az elmúlt évek során jelentős mértékűre nőtt a magyar részvétel, nagy számú magyar kutatófizikus, kutatómérnök, diák és technikus vett részt a CERN-ben folyó kísérletek megépítésében, üzemeltetésében, a nyert adatok kiértékelésében és a fizikai eredmények megértésében. A magyar hozzájárulás mértéke alapján úgy is tekinthetjük, hogy a CERN 1 %-ban magyar kutatóintézet, a magyar nagyenergiás fizikai kutatások helyszíne [1].



4. ábra - J.J. Thomson Katódsugárcsőes kísérlete

A CERN kutatóközpont gyorsítói

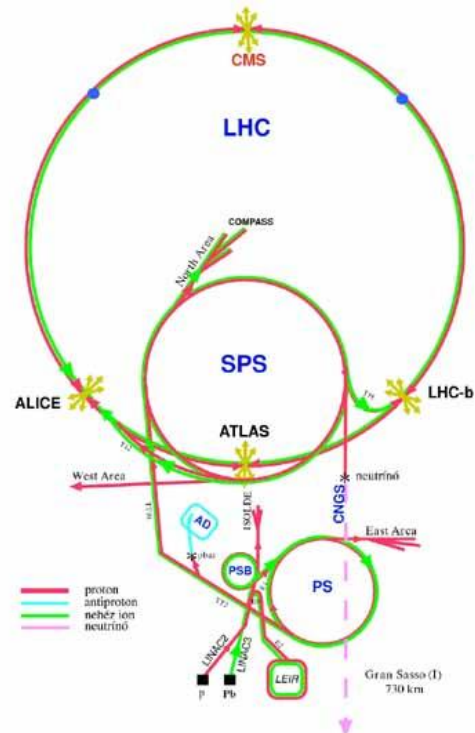
Ebben a fejezetben a gyorsítókról beszélünk és sok olyan fogalmat használunk – mint a pozitron, a lepton, a kvarkok, bozonok, fermionok stb. stb. – amelyeket csak később határozunk meg pontosan. Akit már most érdekelnek ezek a fogalmak, lapozzon a Standard Modell fejezethez.

A részecskefizika Standard Modellje – amelyet később szintén részletesen ismertetünk – valóságos diadalmenetet járt be az elmúlt évtizedekben. Ezt elsősorban néhány elektron-pozitron ütköztetőnek köszönhetjük, utoljára a CERN-beli LEP (Large Electron Positron Collider) és a stanfordi (SLC: Schwab Learning Center) gyorsítónak, de sok új ismeretet hozott a Fermilab Tevatronja, amely protont antiprotonnal, és a hamburgi DESY központ HERA gyorsítója, amely elektront és pozitront protonnal ütköztetett. A Standard Modell valamennyi elemi részecskéjét, a leptonokat, a kvarkokat és a kölcsönhatásokat közvetítő bozonokat sikerült kísérletileg megfigyelni és azonosítani.

Az elektron-pozitron ütköztetők precíz mérésekre szolgálnak, hiszen jól meghatározott energián ütköztetnek pontszerű leptonokat, míg a protonütköztetőknek óriási a felfedezési potenciálja. A protonban úszó alkatrészek – a kvarkok és a kölcsönhatásokat közvetítő gluonok – sokféle energiával ütközhetnek, ezért rengeteg információt adnak az elérhető energiatarományban lehetséges

folyamatokról. A gyenge kölcsönhatást közvetítő W^\pm és Z^0 bozont a CERN proton-antiproton ütköztetőjénél fedezték fel 1983-ban, és tulajdonságaikat utána elektron-positron ütköztetőknél tanulmányozták. A CERN Nagy hadron-ütköztetője (5. ábra A CERN gyorsítókomplexuma) 2012-ben protonok (7-7 TeV energián való) ütköztetésével igazolta a korábban csak elméletben megjósolt "isteni részecskét", a Higgs-bozont [2].

Miért van szükségünk egyre nagyobb gyorsítókra (és egyáltalán részecskefizikusokra 😊), ha egyszer a Standard Modell olyan csodálatosan leírja a természetet? Azért, mert a Standard Modell tudottan nem alkalmas a világegyetem teljes leírására. Nem tudjuk, hogy teljes-e a modell, és azt sem tudjuk, hogy minden tulajdonságát felfedeztük-e a részecskéknél. A fizikusok szeretnék, amennyire lehet, megközelíteni az Univerzum ősrobbanást közvetlenül követő állapotát, mert a részecskék bizonyos tulajdonságait és viselkedésüket csak ilyen extrém körülmények között lehet vizsgálni, vagy elméleteket igazolni. Nagyenergiájú részecskék ütköztetésével rekonstruálható az ősrobbanást milliomod másodperccel követő állapot, mielőtt a hadronok, majd atomok kialakultak volna. A nagyenergiájú fizika lényegében kizárólag energiát és hatáskeresztmetszetet mér, az utóbbival lehet ugyanis a legegyszerűbben kifejezni azt, hogy két egymásnak repülő részecske milyen valószínűséggel lép kölcsönhatásba. A luminozitás az ütközőnyalábok információszolgáltatását, eseményhozamát jellemző, az álló céltárgyas gyorsítóknál használt fluxushoz (időegység alatt, felületegységen áthaladó részecskék száma) hasonló mennyiség. Az LHC-t igencsak ambíciózusan tervezték és építették meg. A Genf mellett, a svájci-francia határon, a Jura-hegység lábánál 50–140 m mélyen fúrt 27 km hosszú alagutat lényegében megtöltötték szupravezető mágnesekkel. A 7 TeV⁴-es protonokat körpályán tartó 1232 szupravezető terelőmágnes egyenként 15 m hosszú, 35 tonna súlyú és 1,9 K⁵ hőmérsékleten 8,3 Tesla erősségű mágneses mezőt biztosít. A gyorsítógyűrűben 40 MHz az ütközési gyakoriság, tehát a detektorokban 25 ns-onként találkoznak a nyalábok és mindegyik találkozáskor 10–20 (túlnyomórészt egyszerű rugalmas szóródással járó) proton-proton ütközés történik, amikor az LHC eléri teljes intenzitását. Az összesen 9300 mágnes ellenőrzése, levitele és beillesztése 6 évig tartott és 2008 elején fejeződött be. Utána le kellett hűteni a sok ezer tonnányi mágneset 1,9 K hőmérsékletre, hidegebbre, mint a világűr (annak a kozmikus háttérsugárzás 2,7 K-es hőmérsékletét tulajdonítjuk), ehhez 96 tonna héliumot keringtetnek.



5. ábra A CERN gyorsítókomplexuma

⁴ TeV – azaz Tera elektron volt. Egy elektronvoltnak nevezzük azt az energiát, amelyet az elektron 1 V (megfelelő irányú) potenciálkülönbség hatására nyer. 1 eV = 1,602 176 487(40) 10⁻¹⁹ J. 1 TeV = 1 billió eV.

⁵ Ez olyan alacsony hőmérséklet, hogy a természetben nem is fordul elő – így néha azt mondják, hogy a világegyetem leghidegebb pontja itt található a Földön. És tényleg 😊.

Detektorok

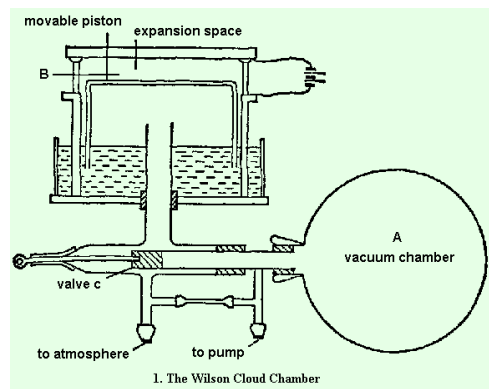
Az elemi részecsek világába csak úgy lehet behatolni, hogy egyre nagyobb gyorsítókat építve reakciókat váltunk ki, egymás közötti kölcsönhatásra kényszerítjük a részecskéket. A kölcsönhatás végeredményéről, a keletkezett részecskékről nem olyan könnyű tudomást szerezni, hiszen közönséges nagyítóval nem láthatók, élettartamuk sem teszi lehetővé, hogy megfigyelhessük őket.

Az elemi részecskék az anyagokon történő áthaladásukkor változásokat hoznak létre. A kölcsönhatás jellege, a visszamaradt jelzések teszik lehetővé, hogy a fizikusok megállapítsák a részecske jellemzőit: töltését, energiáját, impulzusát stb. A töltött részecskék pályájuk mentén ionizálják az anyag atomjait, molekuláit. Ez azt jelenti, hogy útjuk során ütköznek az atomokkal, s külső elektronjuknak annyi energiát adnak át, hogy azok képesek leválni az atomról, kikerülnek az atommag elektromos vonzásának hatóköréből. A semleges részecskék nem hagynak nyomot, de bomlásuk vagy valamilyen atommaggal való ütközésük pillanatában felismerhetők a keletkező töltött részecskék ionizációs nyoma alapján.

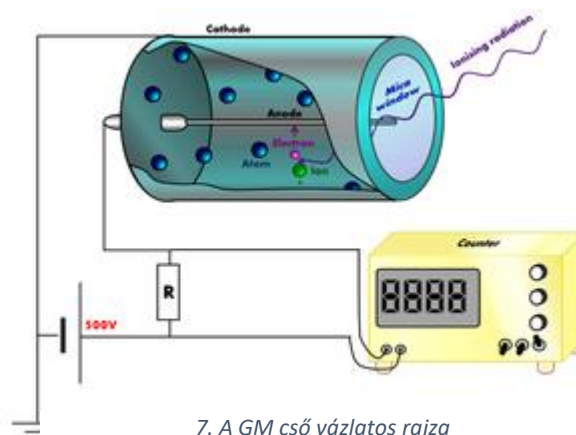
Az elemi részecskék megfigyeléséhez többféle típusú műszert használnak. A részecskenyom-detektorok a részecskék valamely anyagon történő áthaladásának nyomait mutatják, például a Wilson⁶-féle ködkamra és a buborékkamra is ide sorolható. A részecskeszámláló csak a részecske áthaladásának tényét jelzik, esetleg információt nyújtanak az energiájukról. Szcintillációs detektorok segítségével észlelhetjük az áthaladó részecskét fényfelvillanásokkal, félvezető spektrométerek pedig az elektromos áram növekedése által adnak jelet [3].

G. Charpac⁷, 1968-ban a CERN-ben kifejlesztette ki sokszálas proporcionális kamrát, ötletét 1992-ben Nobel-díjjal ismerték el. A kamra feltöltésére nemesgázt használnak, a stabilitás eléréséhez pedig UV-fényt elnyelő gázt adnak hozzá. A gáztérbe beérkező, elegendő energiával rendelkező részecske a gázatomok kötött elektronjait kiszakítja, így visszamarad egy ionpár. Az alkalmazott elektromos mező hatására az elektronok a katódos elektróda, az anód felé sodródnak, ugyanakkor a pozitív ionok sokkal kisebb sebességgel a katód felé sodródnak. Az elektronok a közepes szabad úthosszukon újabb atomokat ionizálnak, így kialakul egy elektronlavina, a teljes létrejövő töltésmennyiség arányos a felszabadult energiával. Több anódszál egymás mellé helyezésével a részecske pályája két dimenzióban is meghatározható [4].

Gáztöltésű számlálók esetében a gáz ionizációja folytán keltett töltéspárokat az elektromos tér a megfelelő elektródákra kigyűjti. Ha a térerősség olyan nagy, hogy a gázban az elektron két ütközés között elegendő energiára tesz szert az atom ionizálásával újabb elektronok keltéséhez, akkor az eredeti áram sokszorozódik, belső vagy gázerősítés lép fel. Ez az áram arányos az energiával: proporcionális kamra tartomány, ahol spektrum mérésre nyílik lehetőség. A jel nagysága egy adott feszültségnél a részecske ionizálóké-



6. ábra A Wilson féle ködkamra részei



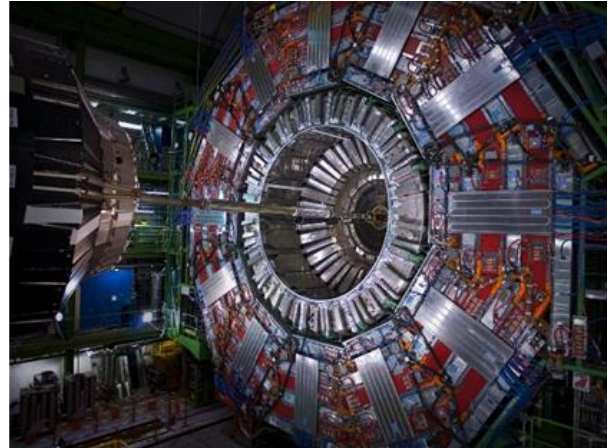
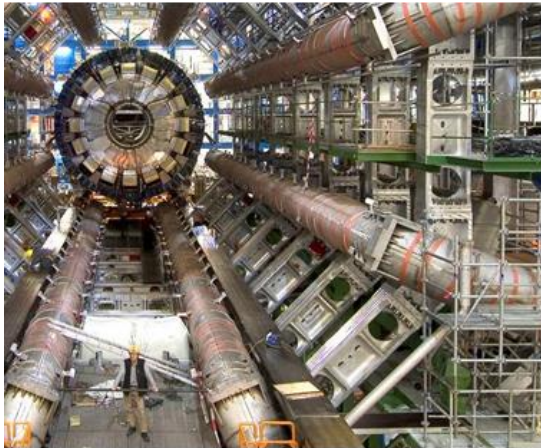
7. A GM cső vázlatos rajza

⁶ Charles Thomson Rees Wilson (1869-1959) skót, Nobel-díjas fizikus.

⁷ George Charpak (1924-2010) Lengyel-francia fizikus.

pességétől is függ, azaz a részecskefajták megkülönböztethetők [5]. Ennek egy iskolában is használatos válfaja a Geiger–Müller számlálócső, röviden GM-cső (7. A GM cső vázlatos rajza).

A Cern legnagyobb gyorsító gyűrűjében 4 óriás detektor található (ATLAS, CMS, ALICE, LHCb (8. ábra Az LHC detektorai). Ezeknek a hatalmas “fényképezőgépeknek” a segítségével számos mikrorészecskét fedeztek fel az utóbbi 10 évben. A méreteket jól lehet érzékelni, mert a bal felső képen egy kutató is rákerült a képre.



8. ábra Az LHC detektorai

A részecskék világa

A részecskefizikával foglalkozó fizikusok, tudósok, kutatók 5-6 generációja a teljes XX. században és a XXI-ik század első két évtizedében egy hatalmas puzzle-ként összerakta a világunk építőköveinek egy-séges – de még biztosan nem teljes – rendszerét. Ebben a rendszerben helyet kapott minden eleminek gondolt részecske, tulajdonságaik alapján pedig csoportokba, oszlopokba, és sorokba rendezhetők. A következőkben megismerkedünk a Standard Modellel. Mielőtt azonban ezt megtennénk, nézzük meg, hogyan tudjuk mindezt szemléltetni is.

Részecskék és erők szemléltetése [15]

A szemléltető eszköz ötletének alapjául több dolog is szolgált. A részecskefizikában a fizikusok mindenhol hármas csoportokba sorolják a részecskéket, de szerintünk a hatos a bűvös szám, hiszen

hat kvarkot, antikvarkot, leptont vagy antilepont is ismerünk, illetve 6 olyan fizikai mennyiséget ismerünk, amely minden részecskefizikai folyamatban megmarad. Kézenfekvő tehát egy hexaédert, vagyis kockát használni, amelynek mind a hat oldalára különböző fogalmakat tüntethetünk fel, és ezekkel játékos feladatok során ismertethetjük meg a részecskefizika alap-, középiskolában is tanítható fejezeit. A projektben legfontosabb a játék, és az úgynevezett „Hands-on mind-on” módszer, hiszen amit csak hallunk vagy látunk, azt könnyen elfelejtjük, viszont amit magunk készítünk és utána beépítjük a tanulási folyamatunkba, az hosszú távon is bevésődik a memóriánkba. A tanulásnak ezen kívül még az is fontos eleme, hogy a diákok a készítés folyamata során maguk is új ötletekkel állhatnak elő, és egy hosszabb foglalkozás-sorozat, szakkör során folyamatosan fejlődhet a modellkészítő projekt, amit így sokkal inkább magukénak érezhetnek.

Tapasztalatom szerint a tanulók nagyon szeretik a maguk által készített kísérleti tárgyakat. Ezekhez otthon található, akár hulladékokból álló alapanyagokat javaslok, így nincs szükség anyagi ráfordításra egy-egy jelenség vagy modell bemutatásához. A kockakészlet elkészítése nagyon egyszerű



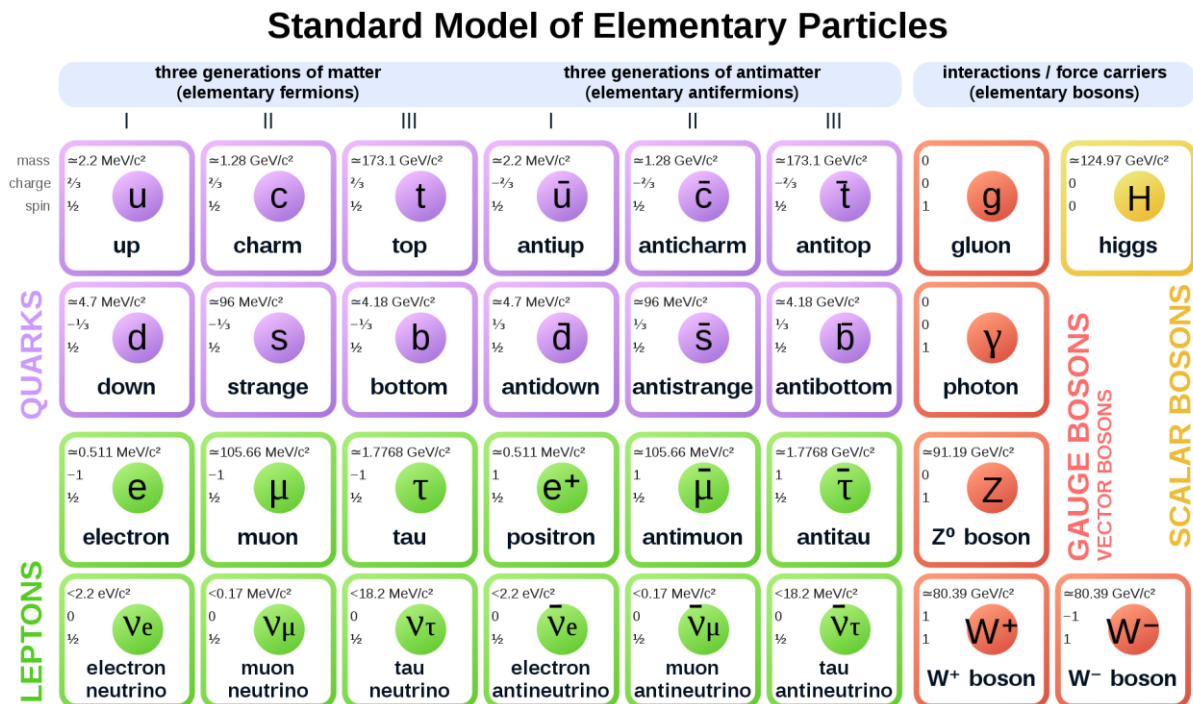
9. ábra A papírból készített készlet

és kis költségvetésű. Csupán színes kartonpapírokra, hungarocell töltőanyagra, ollóra, ragasztóra festékre és filctollra van szükségünk. Többféle méretű kockát érdemes kivágni, a legtöbb részecskéhez 5 cm x 5 cm x 5 cm-es kockahálót, a nukleonokhoz 10 cm x 10 cm x 10 cm-eset és a tengerkvarkokhoz 2 cm oldalhosszúságúakat javaslok. A legfontosabb színek a piros, a zöld és a kék, ezekből vágjuk ki majd a kvarkokat és az antirészecskék szimbolizálásához a kis háromszög (5 cm oldalhosszúságú, egyenlő szárú, derékszögű) lapokat. A nukleonok, leptonok, a közvetítő bozonok tetszőleges színű kartonból készülhetnek, a műveleti jelekhez fehér papírt használtam. A többnyire fehér színben forgalmazott töltőanyagot pedig meghatározott szabály szerint kell befesteni. Fekete filctollal pedig a végén az elnevezéseket és a fizikai paramétereket tudjuk ráírni a kockákra (9. ábra). Egy teljes készlet bekerülési költsége 1000 Ft körüli összegbe kerül.

Az elkészült kockákat érdemes egy nagyobb cipősdobozban tárolni nehogy sérüljenek. A papír meggyűrődhet, elszakadhat a használatban, így újabb ötlettel álltam elő: készítsük el ennek a tartós változatát is, 5 cm x 5 cm x 5 cm-es fakockákból legyenek az alaprészecskék, természetesen ahhoz nem jók, hogy „elrejtünk” bennük újabb részecskéket. Elég őket temperafestékkel egyszer átkenni, majd fekete, illetve a sötét színű kockákra fehér jelölő filctollal az adatokat felírni (12. ábra).

A Standard Modell

A Standard Modell alapvető "alkatrészei" a három fermion család és a három helyi szimmetria, amelyből a három kölcsönhatás és $1 + 3 + 8$ közvetítő bozonja származtatható a szimmetriasértő Higgs-tér áldásos közreműködésével, amely utóbbi melléktermékeként megjelenik a Higgs-bozon. Nem tudjuk, miért éppen az említett három szimmetria hozza létre a három kölcsönhatást, de azt igen, hogy az elektromágneses $U(1)$ szimmetriája az elektromos töltés skalár (azaz egykomponensű) voltával, a gyenge kölcsönhatás $SU(2)$ szimmetriája a kétkomponensű gyenge izospinével, az erős kölcsönhatás $SU(3)$ szimmetriája pedig a háromféle színével van összefüggésben.



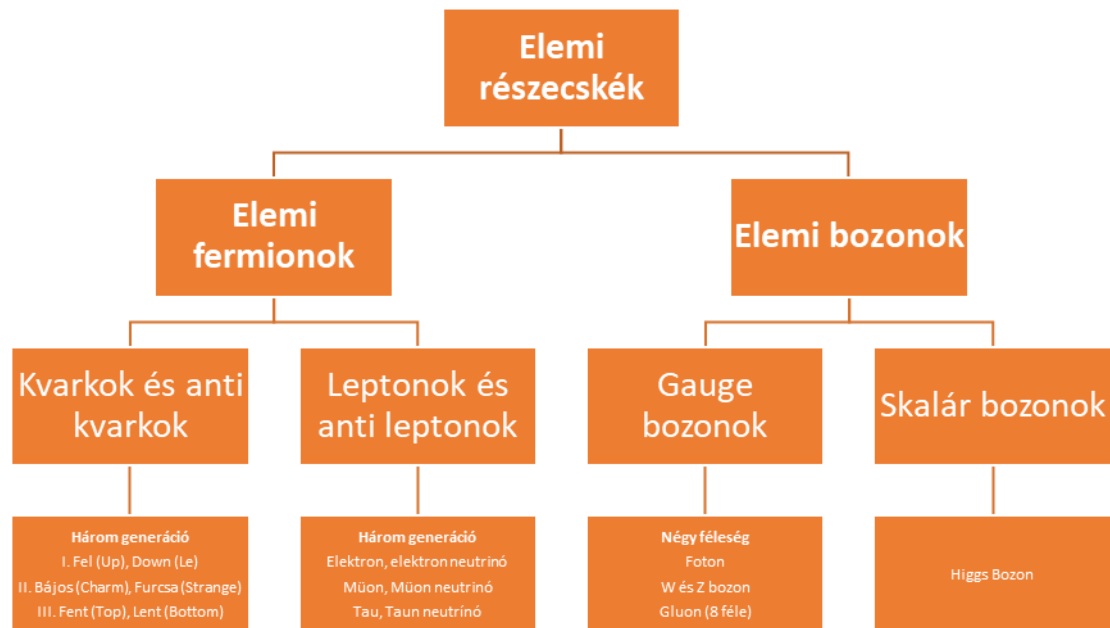
A Standard Modell helyességét számtalan kísérleti megfigyelés igazolja. Mindjárt születésekor számszerűen megjósolta a gyenge bozonok tömegét és más tulajdonságait, amit a kísérlet később teljes mértékben igazolt (C. Rubbia és társai, Nobel-díj, 1984). A létrehozása óta eltelt csaknem 30 év alatt a modell minden jóslatát teljes mértékben igazolták, semmiféle olyan megfigyelésünk nincs, amely ellentmondana neki. Valamennyi ismert alkatrészét megfigyeltük, utoljára a t-kvarkot és a Higgs-bozont, és a természet vakon engedelmeskedni látszik neki. Még az az új megfigyelés sem mond igazán ellent a Standard Modellnek, hogy a neutrínóknak van némi (igen kicsi) tömegük.

Joggal felmerül tehát a kérdés, mi szükség van még gyorsítókra, és egyáltalán részecskefizikusokra, ha egyszer ilyen, mindent helyesen leíró elmélettel rendelkezünk. A válasz a Standard Modell nevében rejlik: nem teljes elmélet, csak modell, amelyről nem igazán értjük, miért működik ilyen jól. Három egymástól teljesen független, remek elméletet, a három kölcsönhatását, jó néhány szabad paraméterrel ellátva összeházasítottunk; megfejeltük egy Higgs-mechanizmussal, mert különben nem működik; mesterségesen hozzátettük a fermionok tömegét, és annak örültünk, hogy mindezt hagyja, azaz nem vezet elméleti ellentmondásokra. A modell kulcsfigurája, a Higgs-bozon léte és tulajdonságai bizonyítják a Standard Modell érvényét [13].

A részecskék csoportosítása

A Standard modell részecskéit többféle módon csoportosíthatjuk. Jelenlegi ismeretünk szerint a modellben található összes részecske elemi részecske, vagyis eddig úgy látjuk, hogy belső szerkezetük nincs.

A részecskék két alapvető csoportja az elemi fermionok és az elemi bozonok. Azért hangsúlyos, hogy „elemi”, mert létezhetnek nem elemi fermionok és bozonok, ahogy azt majd látni fogjuk. Mindkét csoport tovább bomlik két-két további csoportra. A fermionok közé tartoznak a kvarkok és a leptonok, míg az elemi bozonokat mérték- (gauge) bozonokra és skalár bozonokra oszthatjuk fel – ez utóbbi jelenleg egyetlen típust, a híres Higgs bozont tartalmazza.



11. ábra Az elemi részecskék csoportosítása

Valamennyi részecskére jellemző, hogy részecske-hullám kettős természetük van, vagyis felfoghatók kiterjedés nélküli részecskének és hullámnak is. Az ismert mérték- (gauge-) bozonok az univerzumban megfigyelt négy alapvető erőből háromnak közvetítő részecskéi. Például ma úgy látjuk, hogy az elektromágneses erő közvetítő részecskéje a foton, elektromágneses kölcsönhatáskor végső soron foton kibocsátásról és elnyelésről beszélhetünk.

Fermionok

Az elemi részecskék nagyobb részben fermionok. A fermionok olyan részecskék, amelyeknek spinje félegész ($1/2$, $3/2$, $5/2$ stb.) és érvényes rájuk a Pauli elv, vagyis, hogy két részecske nem foglalhatja el ugyanazt a kvantumállapotot egy időben. A fermionok közé tartoznak az anyagi világot felépítő részecskék, mint a kvarkok, a leptonok, köztük az elektron, és ezek anti részecskéi. A fermionok a nevüket Enrico Fermiről kapták, aki Paul Dirac-kal együtt dolgozott a részecskék energiaállapotának statisztikus leírásán. Azok a részecskék, amelyeknek a leírására a Fermi-Dirac statisztikával lehetséges, fermionoknak hívjuk.

Kvarkok és gluonok

A kvarkok és a gluonok az univerzum legalapvetőbb építőkövei. A kvarkok az összes alapvető kölcsönhatásban részt vesznek, (gyenge, gravitációs, elektromágnesesség, erős) de a legjobban az erős kölcsönhatáshoz fűződnek, amit a gluonok közvetítenek. Az elektromágneses töltésük értéke a kutatókat is meglepte. Értéke $+2/3$ és $-1/3$ lehet, anti kvarkoknál $-2/3$ és $+1/3$. A természetben a kvarkok



12. ábra Részecskék fakockákból

sosem fordulnak elő önállóan, egyedül, mindig valamilyen kvark formációban figyelhetjük meg őket. Ezt a jelenséget kvark-bezárásnak hívjuk.

A diákokkal első feladatként érdemes megvizsgálni a proton és a neutron belső szerkezetét látható tárgyak segítségével. Ezzel a modellel rendkívül szemléletesen el tudjuk oszlatni a protonról és a neutronról az oszthatatlan, vagyis elemi részecske tévhitét⁸.

Nagyobb méretű, kb. 15x15 cm-es kockába rejtünk el egy piros, egy zöld és egy kék kvark kockát, színesre festett (részletek később) hungarocell töltőanyaggal töltjük ki a fennmaradó helyeket, és ha még pontosabban szeretnénk modellünket összeállítani és a nukleonok összetételét elmagyarázni, akkor még kvark-antikvark párokat is helyezhetünk bele. Az RGB (piros, zöld, kék) kockák a nukleonokat alkotó kvarkok lesznek, az angol elnevezésüknek megfelelő kezdőbetűt az oldalukra írjuk. A



13. ábra A proton belső szerkezete

⁸ A 2018-as, Mozaik kiadású Kémia tankönyv pl. a 98. oldalon a protont és a neutront elemi részecskének nevezi.

hungarocell „kukacok” modellezik az erős kölcsönhatás közvetítő részecskéit, amelyek összetartják az azonos töltésű nukleonokat, tulajdonképpen, mint egy szuper ragasztó, míg a kvark-antikvark párok az úgynevezett „tengerkvarkok”, amelyekkel tele van a nyugvó nukleon, és ezek adják a nukleon tömegének több mint 90%-át (13. ábra).

Leptonok

A leptonok a saját perdületű, félegész spinű elemi részecskék gyűjtőneve. A lepton név a görög “könnyű” szóból ered, mivel mindegyik könnyebb volt elnevezésükkor, mint az akkor ismert más részecskék. Egyik fő tulajdonságuk, hogy nem vesznek részt az erős kölcsönhatásban. Közéjük tartozik az elektron, müon, és a tau részecske, valamint a hozzájuk tartozó neutrínók és azok antirészecskéi [8].

A standard modellben összesen 6 leptont fedeztek fel (14. ábra) és később az antirészecskéiket is igazolták. A legismertebb, egyben a legrégebben - J.J Thomson által - felfedezett lepton az elektron, minden atom alapvető építőköve. Három fajta családja van a leptonoknak: az elektron, a müon és a legnehezebb a tau. Mindegyik családhoz tartozik egy negatív töltésű részecske ezek az előbbieken felsoroltak, és minden negatív töltésű részecskéhez tartozik egy semleges töltésű neutrínó ezek az elektron-neutrínó, a müon-neutrínó és végül a tau-neutrínó. A müon részecske jóval ritkább, mint az elektron, viszont gyenge kölcsönhatás esetén létrejöhet. Amikor felénk tart a napszél és eléri a légkört, ott a részecskék ütköznek egymással és létrejöhet müon sugárzás, amit müon-detektorokkal lehet érzékelni a földfelszínen. Ennek a részecskének negatív a töltése, és nagyon rövid az élettartama, tehát nagyon gyorsan elbomlik. A leptonok 3 családja:

1) Első elemirészecske-család:

- a) Elektron neutrínó
- b) Elektron

2) Második család:

- a) Müon neutrínó
- b) Müon

3) Harmadik család:

- a) Tau neutrínó
- b) Tau

ν_e	e neutrino
e^-	electron
ν_μ	μ neutrino
μ^-	muon
ν_τ	τ neutrino
τ^-	tau

14. ábra Leptonok

A játékos, gyakorlati feladatokhoz készített (5x5x5 cm-es) kockák oldalaira írjuk fel az egyes lepton fajták jeleit, elektromos töltésüket, spinjüket, tömegeiket feltüntetve.

Neutrínók

A neutrínók a leptonok közé tartozó könnyű elemi részecskék. A részecskék világában nem jelentős gravitációt kivéve csak gyenge kölcsönhatásban vesznek részt, erős kölcsönhatásban nem mutathatók ki. Elektromos töltésük nincs, semlegesek (innen a neve is, melynek jelentése olaszul “semlegeske”), [8] emiatt elektromágneses kölcsönhatásban sem vesznek részt. Ez a magyarázata annak, hogy a neutrínók rendkívül közömbösek az anyaggal szemben, azaz a kölcsönhatás (ütközési) hatáskeresztmetszetük igen kicsi, s egy fényév vastag ólomfalban a neutrínóknak mintegy fele haladna át. Eme tulajdonságuk jelentős mértékben megnehezíti, hogy kísérleti úton észlelni tudjuk őket, mert a kimutatás alapja valamely kölcsönhatás. A kölcsönhatási valószínűség ugyanakkor erősen függ a neutrínó energiájától: ennek következtében az is erőteljesen nő. Amikor egy nagy energiájú neutrínó kölcsönhatásba kerül az anyaggal, általában töltött lepton keletkezik, ehhez hasonló folyamat felelős a hadronok gyenge bomlásaiért is. A pozitív pion bomlása során például a pionban lévő kvark-antikvark

pár megsemmisül, és ennek során egy müonból és egy müon–antineutrínóból álló pár keletkezik. A különböző típusú neutrínók – és vele a részecskecsaládok – számának megállapítására legjobb módszer a Z-bozon bomlásának vizsgálata. Ez a részecske többféle neutrínóra és azok antineutrínóira bomlik [9].

Neutrínó oszcilláció

A neutrínóoszilláció egy kvantummechanikai jelenség, mely során a neutrínó háromfajta íze (elektron, müon, tau) átalakul egymásba. A jelenséget a japán Super-Kamiokande neutrínóobszervatórium fedezte fel, majd a kanadai Sudbury Neutrínó Obszervatórium megerősítette.

A jelenség magyarázatot ad a napneutrínó-problémára, és választ ad arra is, hogy van-e a neutrínóknak nyugalmi tömegük. Mivel oszcilláció csak tömegkülönbség esetén jöhet létre, ezért legalább az egyik fajta neutrínónak tömeggel kell rendelkeznie [10].

Bozonok

Ahogy láttuk, a standard modellt több részre is bonthatjuk: egyik részébe tartoznak a kvarkok és a leptonok, együttes nevükön fermionok. A másik csoportot a bozonok alkotják, ide tartoznak az erőközvetítő részecskek, mint például a foton, a gluon, a W és Z bozon. Ezeket a bozonokat mértékbozonoknak is nevezik. A négy alapvető erő közül háromnak itt található a közvetítő részecskéje. Az egy kivétel a feltételezett „graviton”, amelyet még nem fedeztek fel. Ha igazolnák a létezését, ez lenne a gravitáció közvetítő részecske (15. ábra).

A bozonoknak változatos a tömegük: a fotonnak és a gluonoknak nincs nyugalmi tömege, ezért sebességük mindig megegyezik a fénysebességgel. Az Z és W bozon viszont viszonylag nehéz részecske. Az előbbi több mint 91-szer, az utóbbi több mint 80-szor nehezebb, mint egy proton.

A bozonok neve Satyendra Nath Bose, indiai fizikus nevéből származik, aki a XX. század elején Einsteinnel párhuzamosan dolgozott a részecskék viselkedésének statisztikus leírásán. Azokat a részecskéket, amelyek viselkedésének leírására a Bose-Einstein statisztika alkalmas, bozonoknak nevezzük.

A Higgs-bozon

2012. július 4-én egy konferencián a CERN jelentette, hogy találtak egy részecskét, aminek tömege $125 \text{ GeV}/c^2$. Ez a második legnehezebb elemi részecske a standard modellben. A kvantum-mező elmélet szerint minden elemi részecskének van egy saját mezője, és úgy keletkezhetnek a részecskék, ha ezt a mezőt gerjesztjük. A Higgs részecske megtalálása igazolja a Higgs mezőt, ha pedig a mező létezik, akkor igaz az elmélet, hogy a részecskék nyugalmi tömege a mezőből származik.

Fontos tudni, hogy a testek tömegét nagyrészt nem a Higgs mezőnek köszönhetjük, hanem a kvarkok (protonok, neutronok) nagy mozgási energiájának. És mivel nagy a mozgási energia, nagy a tehetetlenség is. Amikor el akarunk mozdítani valamit a helyéről azt érzékeljük, hogy annak van tömege, erőt kell rá kifejteni, hogy felemeljük.

Az anyagi részecskék három családja (fermionok)

	I	II	III		
tömeg→	2,3 MeV/c ²	1,27 GeV/c ²	173 GeV/c ²	0	125 GeV/c ²
töltés→	2/3	2/3	2/3	0	0
spin→	1/2	1/2	1/2	1	0
név→	u u-kvark	c c-kvark	t t-kvark	γ foton	H Higgs-bozon
	d d-kvark	s s-kvark	b b-kvark	g gluon	
	ν_e elektron-neutrínó	ν_μ müon-neutrínó	ν_τ tau-neutrínó	Z Z-bozon	
	e elektron	μ müon	τ tau	W W-bozon	

Bozonok (közvetítőhatások)

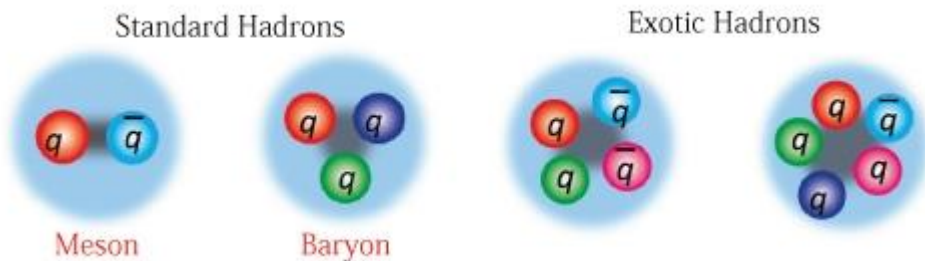
15. ábra A részecskék standard modellje

Hadronok, barionok, mezonok és már összetett részecskék

Mi ugyan a standard modell ismertetésekor végig elemi részecskékről beszélünk, érdemes azonban tudni, hogy a fizikusok előbb találkoztak a nagyobb, néha stabil, néha instabil összetett részecskékkal. Azt ráadásul, hogy összetett részecskékről beszélünk, csak a mostani tudásunkkal mondhatjuk, a felfedezésük pillanatában ezt még nem lehetett tudni. Nem volt még ismert a kvantum színdinamika és a kvark-bezárás sem.

A kvarkok a tulajdonságaik miatt mindenképp összetett részecskéket alkotnak. Ezeket hívjuk hadronoknak. (És innen a CERN nagy hadron-ütköztetőjének a neve: valójában protonokat ütköztetnek nagy sebességgel) Kezdetben a két és három kvarkos részecskéket azonosították. A három kvark által alkotott összetett részecskék összefoglaló neve a barion. A legismertebb barionok a proton és a neutron. A proton két fel (up) és egy le (down) kvarkból, míg a neutron két le (down) és egy fel (up) kvarkból áll.

A hármas konfiguráció mellett létrejöhetnek két kvarkból álló összetett részecskék is, azokat mezonoknak hívjuk. A legismertebb mezonok a különböző Pi mezonok, Kaonok és lambda részecskék.



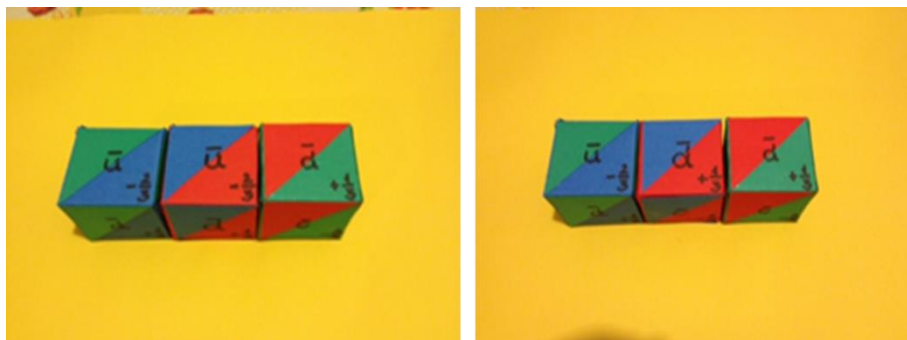
16. ábra A hadronok, mezonok és barionok kapcsolata

A kutatások későbbi szakaszában négy és öt kvarkból álló, nagyon hamar elbomló összetett részecskéket is megfigyeltek, ezek összefoglaló nevén exotikus hadronoknak hívjuk.

Antianyag részecskék

Érdekes kérdés és kutatási feladat lehet a gyerekeknek, amelyre a CERN kutatói is keresik a mai napig a választ, „Hova tűnt az antianyag?”. A Világegyetem 4-5%-át ismerjük jelenleg, amelyben nincs antianyag. Viszont az Ősrobbanáskor egyenlő számban kellett, hogy keletkezzenek részecskék és antirészecskék. A közös tanulás során ehhez hasonló problémafelvetésekre is sor kerül, és még jobban felkelti a diákok érdeklődését a XX-XXI. század fizikája iránt.

Az antirészecske fogalmát elmagyarázhatjuk kockák segítségével is, de ehhez a már korábban elkészített antikvark kockákra lesz szükségünk (17. ábra **Error! Reference source not found.**).



17. ábra Hadron és anti hadron

Minden részecskének van antirészecske párja, ezek minden fizikai paraméterükben pontosan megegyeznek, kivéve az elektromos töltésüket, amelyek egymás ellentettjei. Például a fel (up) kvark antirészecskéje az anti-up kvark. Míg előbbinek $+2/3$ az elektromos töltése, utóbbié $-2/3$. A proton, ami két up és egy down kvarkból épül fel, és így a töltése $+1$, az antiprotoné viszont -1 , mert $\bar{u}\bar{u}\bar{d}$ összetételű hadron.

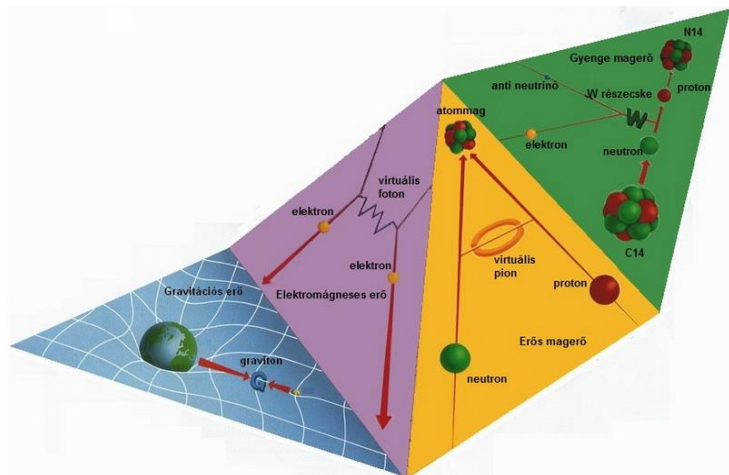
Kölcsönhatások

A fizikában alapvető erő, vagy alapvető kölcsönhatás a neve annak a mechanizmusnak, melynek segítségével részecskék kölcsönhatást gyakorolnak egymásra, és amely más kölcsönhatással nem magyarázható (18. ábra).

Az alapvető kölcsönhatás modellje szerint a természetben minden fermionokból áll. Ezek mindegyike töltésnek nevezett tulajdonságot hordoz magával, valamint egy fél egységnyi spinnek, magyarul pedig perdületnek is nevezett impulzusmomentumot (redukált Planck-állandó: $1/2$ spin). A gravitációs kölcsönhatástól eltekintve a fermionok egymásra való vonzó, vagy taszító hatása virtuális részecskék, ún. mértékbozonok kicserélése útján történik. A bozonokat kölcsönhatás-hordozóknak, vagy erőközvetítőknak is nevezhetjük. A kölcsönhatás kifejezés ezt a kölcsönös bozonátadást tükrözi.

A fermionok közötti bozoncsere mindig energia- és perdületátvitelt jelent, ami a fermionok irányváltozását és sebességváltozását jelenti. Töltésátvitel is történhet azonban, ami a fermionok minőségét is megváltoztathatja, egyikből másikat képez. Mivel a bozonok egy egész impulzusmomentumot hordoznak, a fermionok pedig felet, ilyen kölcsönhatás esetén a fermion perdülete előjelet változtat. A kölcsönhatás eredménye vonzás vagy taszítás is lehet, ezért ezt a kölcsönhatást *erő*nek is nevezzük [11]. A négy kölcsönhatás (erő) tehát:

1. **Gravitáció:** Jelenleg még nem tudjuk kvantumfizikai módszerekkel és modellekkel leírni.
2. **Elektromágnesesség:** Az elektromágneses erő mindenhol jelen van a mi világunkban és persze a szubatomi világban is. (A kockákon a töltés mértéke az elektromágneses kölcsönhatásban való részvételt mutatja meg.)
3. **Erős nukleáris erő:** Nagyon rövid hatótávolságú, az atommagon belül érzékelhető kölcsönhatás kvarkok vagy kvarkokból álló hadronok között.
4. **Gyenge nukleáris erő:** A gyenge nukleáris erő a radioaktív atommagoknak a bomlásában és az elemi részecskék átalakulásában vesz részt. Három közvetítő részecskéje a W (+/-) bozon és a Z bozon.



18. ábra Alapvető kölcsönhatások

Pauli-elv

A Pauli-elv (vagy Pauli-féle kizárási elv) a kvantummechanika egyik alapvető törvénye, amely azt mondja ki, hogy két azonos fermion (fél egész spinű részecske) nem foglalhatja el ugyanazt a kvantumállapotot ugyanabban az időben. A Pauli-elvnek az új részecskék furcsa világában is teljesülnie kell,

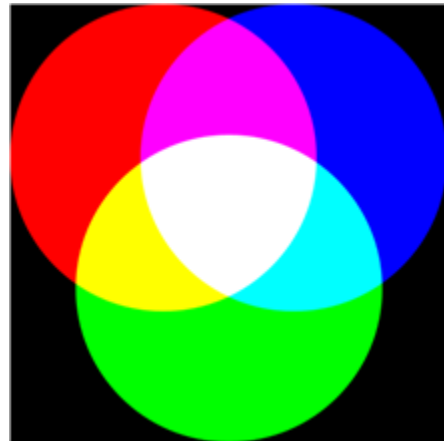
ugyanis létezik olyan részecske, (pl. $\Delta^{++}=uuu$) amely 3 azonos állapotú kvarkból áll, de tudjuk, hogy ez így nem felel meg a kizárási elvnek, tehát kell még egy "kvantumszám" vagyis tulajdonságnak lennie, amiben különböznek egymástól a kvarkok. Ezt az új tulajdonságot nevezték el "szín"-nek. Tehát egy delta-részecske esetében ($\Delta^{++}=uuu$) mind a három kvarknak más a "színe", piros, kék és zöld a kvantum-színdinamika szabályainak megfelelően [12].

A bozonok esetén nem érvényesül a Pauli-elv, a bozonoknak lehet egyidőben ugyanolyan kvantumállapota.

Kvantum Színdinamika (QCD) [15]

Arról, hogy miért éppen olyan színűek a kockáink amilyenek, elég csak a legfontosabbakat megemlíteni. A kvantum-színdinamika nagyon nehéz fejezet, magasabb szintű matematikai ismeretekre lenne szüksége a diákoknak a megértéséhez, ezért a középiskolában elég csak alapszabályokat rögzítenünk. A természetben csak „fehér” színű hadron létezik, amely előállítható a három alapszínből, vagy akár két színből is, de akkor egy színhez a részecske saját antiszínét kell párosítani. Ehhez használhatjuk az optikában tanult additív színkeverés analógiát (19. ábra).

Érdekességként megemlíthetjük, hogy ugyan a gluonok szintén színt és antiszínt hordoznak, a 3×3 szín-dublett variáció mellett mégis csak nyolcféle közvetítő részecskét ismerjük az erős kölcsönhatásnak, mert a fehérből fehér átmenet kiesik, de ez szintén meghaladja a középiskolai szintet. Az erős kölcsönhatást szimbolizáló hungarocell testek festegetése közben elegendő időnk jut a színek és antiszínek megtanulására, és a kvantumszíndinamika alapjainak begyakorlására és megértésére (20. ábra)



19. ábra Additív színkeverés



20. ábra Színek és antiszínek gyakorlása

Hadronjáték [15]

A Nagy hadronütköztetőben jelenleg 13 TeV (teraelektronvolt) energiákon protoncsomagokat ütköztetnek, vagyis a protonnak hadronnak kell lennie. Viszont nem csak a protonok, amelyek egyben barionok, tartoznak a hadronok csoportjába, hanem az úgynevezett mezonok is. Ezeket az ismeretlen

kifejezéseket is csak sok gyakorlással, szemléletes modellekhez kötve lehet maradandóan megjegyezni, és reményeim szerint ebben segít a hadronjáték.

Összesen hat darab 5x5 cm-es kockára lesz szükségünk, kettő-kettőt készítünk piros, zöld és kék színekből is. Viszont mindegyik kockapárból egynek az oldalaira még egy kiegészítő színű háromszöget is ragasztunk. Így kapjuk az úgynevezett antikvark kockáinkat. Igaz ugyan, hogy pl. a piros szín antiszínje a türkiz, ezt mégis kék-zöld kombinációval érzékeltetjük, mert a tapasztalat azt mutatja, hogy így jobban megértik a diákok az antiszín fogalmát.

Ezeknek a kockáknak az oldalaira a hatféle kvark és antikvark elnevezések (praktikusan az angol nyelvű) kezdőbetűit tüntetjük fel. Egy másik, későbbi feladathoz a betűjelek mellé a kvarkok törtöltéseit is odaírjuk. Újabb „szabályt” fogalmazunk meg, miszerint, ha három kvarkból áll egy részecske, barionnak, ha egy kvarkból és egy antikvarkból, akkor viszont mezonoknak nevezzük. Természetesen most már a színtöltéseket is figyelembe kell venni, hiszen a Pauli-elvnek itt is teljesülnie kell, ugyanis létezik olyan részecske, ($\Delta^{++}=uuu$) amely 3 azonos állapotú kvarkból áll, de tudjuk, hogy ez nem felel meg a kizárási elvnek. Csoportos feladatok során a diákok játszva jegyzik meg ezeknek a nehéz fogalmaknak a jelentését (21. ábra).



21. ábra Barionok és mezonok

A kvarkok elektromos töltésének ismertetése után a barionok és a mezonok töltését is meg lehet határozni, majd különböző szakirodalmi adatok alapján a tanulók ellenőrizhetik azok létezését, illetve csak azt, hogy mai tudásunk szerint sikerült-e már ezeket felfedezni.

Gyakorlás, vagy akár számonkérés során tesztelhetjük az eddig tanultakat például olyan gyakorlattal, amelyben „csukott szemmel” választanak ki három kvarkkockát, vagy kettőt, kvark-antikvark párt. A diáknak kell megmondania, hogy az adott kombináció egy természetben is megtalálható részecske-e vajon.

Bomlások

Néhány, a bomlással kapcsolatos alapfogalom.

Bomlás: Azt a magfizikai folyamatot, amely során nagy tömegszámú atommagok spontán módon, azaz véletlenszerűen (statisztikailag) más atommagokká válnak, bomlásnak nevezzük. A bomlás során tehát egy nagy tömegű atommag más atommagokká „alakul át”. A folyamatot radioaktív sugárzás kíséri.

Anyaelem: A magfizikai bomlás során a kiinduló (nagy tömegszámú) magnak megfelelő kémiai elemet anyaelemnek nevezzük.

Leányelem: A magfizikai bomlás végtermék magjainak megfelelő kémiai elemeket leányelemeknek nevezzük.

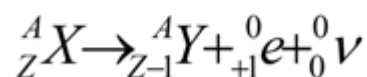
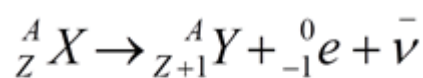
A ma ismert elemek atommagjai között található stabil és instabil atommagok. A stabil atommagok bomlásait még nem figyelték meg. Az instabil atommagok minden külső beavatkozás nélkül más atommaggá alakulnak, miközben nagy energiájú sugárzást bocsátanak ki. Ezt a jelenséget nevezzük radioaktív bomlásnak és a kibocsátott sugárzást radioaktív sugárzásnak [14].

Béta-bomlások [15]

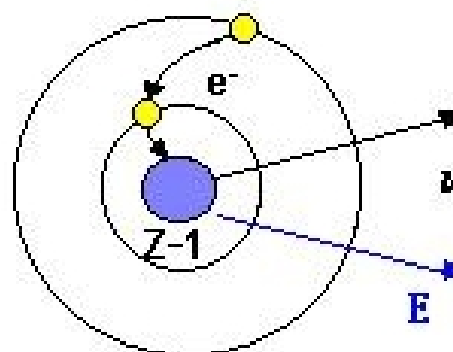
A béta-bomlásoknak 3 típusa van:

- 1) Negatív béta-bomlás (β^-): Az atommagban egy neutron protonná alakul át, és az eközben keletkező elektron kilép az atommagból. Tehát ez egy elektron-sugárzás, vagy elektron-nyaláb. A folyamat során az elem tömegszáma nem változik, de a rendszáma eggyel nő, azaz az anyagi minőség megváltozik. Fontos megjegyzés: Kiderült, hogy így a folyamat nem teljes. A megmaradási törvények csak akkor teljesülnek a folyamatra, ha egy harmadik új részecske keletkezését is feltételezzük. 1931-ben Pauli ötlete hozza a megoldást: kicsiny, „zérus tömegű”, töltés nélküli részecske keletkezésének ötlete (antineutrínó). Ez a részecske viszi el a maradék energiát (22. ábra).
- 2) Pozitív béta bomlás (β^+): Az atommagban egy proton neutronná alakul át, és eközben egy pozitron (e^+) és egy neutrínó keletkezik. A folyamat során az elem tömegszáma változatlan marad, de a rendszám eggyel csökken, így a kiindulási anyag minősége megváltozik (22. ábra).
- 3) Az elektron-befogás: Az elektron-befogás folyamatában a legnagyobb energiájú proton az elektronburokból befog egy elektront, és így neutronná alakul át és közben neutrínó keletkezik (23. ábra). Ebben a folyamatban az elektron bent marad az atommagban. A pozitív béta bomláshoz hasonlóan az elem rendszáma eggyel csökken, tehát az anyagi minőség megváltozik [14].

A középiskolai fizika tananyagának fontos részét képezi a modern fizika témakörén belül a radioaktív bomlások fejezete. Még a középszintű vizsgát tevő diákok is könnyedén ki tudják számolni függvénytáblázat segítségével a bomlási folyamatok hiányzó tagjait. Viszont tapasztalatunk szerint fogalmuk sincs arról, hogy mit miért csinálnak, csak a „bemagolt” sémákat követik. Be kell, hogy valljam, nekem is sokáig problémát jelentett, hogy megjegyezzem mikor és mennyivel változik a tömegszám és a rendszám és hogy mikor, milyen fajta részecske keletkezik. Elsősorban a magam számára próbáltam kitalálni valamilyen módszert, remélve közben azt is, hogy ezzel a diákjaimnak is megkönnyítem a megértést, tehetségesebb tanítványaimnak pedig a mélyebb szinten történő folyamatokat is el tudom majd magyarázni. Ehhez az ötletet gyermekeim egyik játéka adta, egy kockából álló puzzle, ahol a kockák forgatásával mindig különböző képrészlet válik láthatóvá, egyszerre és azonos irányba forgatva őket, felismerhető lesz a teljes kép valamelyik meséből. Mi lenne, ha mi is valami hasonló módszerrel vizsgálnánk meg a bomlási folyamatokat a nukleonok, vagy akár a kvarkok szintjén is? Most újfajta kockákat kell készítenünk, azoknak a részecskéknél a modelljeit, amelyek a béta-bomlásokban előfordulnak. Itt viszont a kocka hat oldalára annak a hat megmaradó mennyiségnek a részecskére vonatkozó adatait írjuk, amelyek minden kölcsönhatásban megmaradnak. Itt a „bűvös” hatos a következő: elektromos töltés, energia/tömeg, impulzusmomentum, barion-szám, lepton-szám és az izospin hármasszoros vektora. Ebből csak párat használunk a megértetéshez, csak azokat, amelyek könnyen számolhatók. Legyenek ezek a korábbi tanulmányokból már jól ismert paraméterek, mint az elektromos töltés, a barion-szám és a lepton-szám. Persze tisztáznunk kell azt is, hogyan definiáljuk a barion- és lepton-számot. Ehhez a játékhoz megadhatjuk a számokat egy táblázatban, amit használnak a feladat megoldása közben, nincs szükség a „száraz” adatok megtanulására, bár elég logikus a magyarázat. Leegyszerűsítve: minden, ami barion, annak a barionszáma +1, természetesen így a lep-



22. ábra Negatív és pozitív béta bomlás



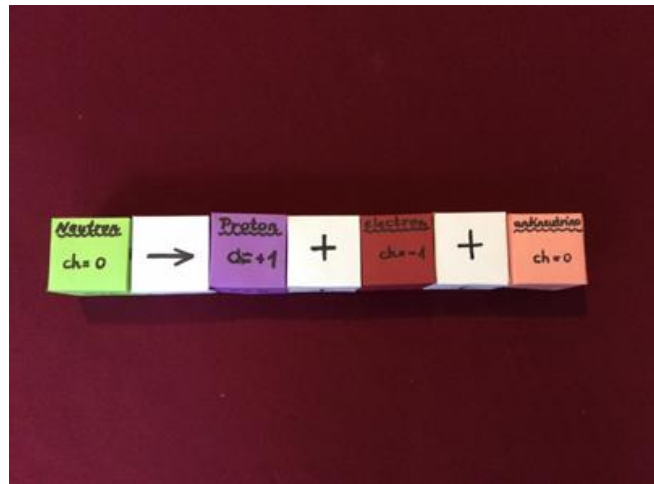
23. ábra Elektronbefogás

tömegszáma 0, a leptonoknál pedig éppen fordítva van, leptonszámuk +1, barion-számuk 0, az antileptonok leptonszáma logikusan -1. Először vizsgáljuk meg a neutron béta-bomlását (**Error! Reference source not found.**)! A mag belsejében lévő neutron egy protonná, egy elektronná és még valamivé kell, hogy alakuljon. Enrico Fermi felfedezése óta tudjuk, kell, hogy legyen még egy szinte zérustömegű részecske, amely elviszi a hiányzó energiát. És ez, a lepton-szám megmaradás értelmében egy antilepton kell, hogy legyen, negatív béta-bomlásnál elektron-antineutrínó (**Error! Reference source not found.**).

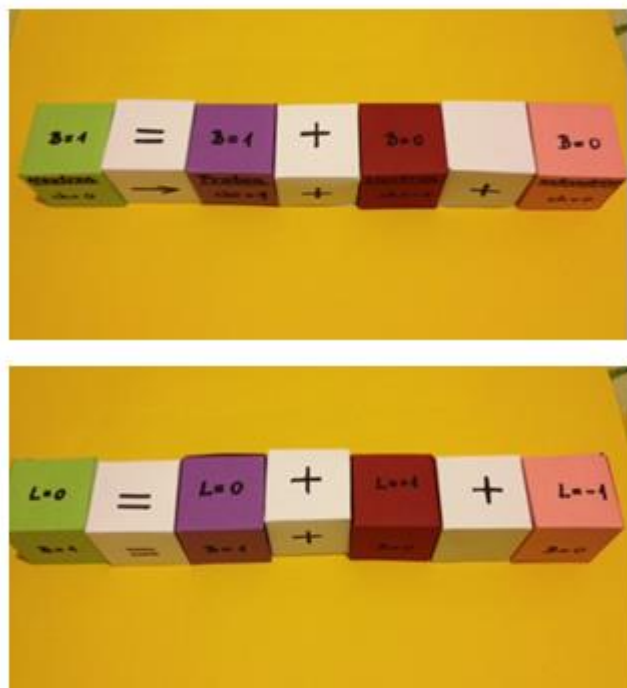
De sokkal izgalmasabb a feladat, ha előre nem áruljuk el az összes bomlásterméket a diákoknak, hanem maguknak kell rájönniük a megmaradási törvények használatával, milyenek keletkeznek. Ugyanis, ha csak az elektromos töltés megmaradását nézzük, akkor az is igaz, hogy neutronból egy proton és egy elektron keletkezik, sőt, ha forgatunk egyszerre, egy irányban mindegyik kockánkon, és így a barion-töltések válnak láthatóvá, még ebben az esetben is helyes az egyenletünk. Viszont a következő forgatás után felborul az egyenlőségünk, amikor is a lepton-szám megmaradást ellenőrizzük, hiszen $n \rightarrow p + e$ bomlás esetén a lepton-számok a következőképpen alakulnak:

$0 \rightarrow 0 + 1$ (**Error! Reference source not found.**). Ez azt jelenti, kell, hogy legyen egy antirészecske is, mert annak a leptonszáma -1. Az előre elkészített részecske-kockákból a diáknak magának kell kiválasztania, kiokoskodnia a hiányzó részecske fajtáját. Ellenőrzésképpen pedig ellenkező irányú forgatások során megvizsgálhatjuk a barionszám és az elektromos töltés számának egyenlőségét az egyenlet bal és jobb oldalán (25. ábra).

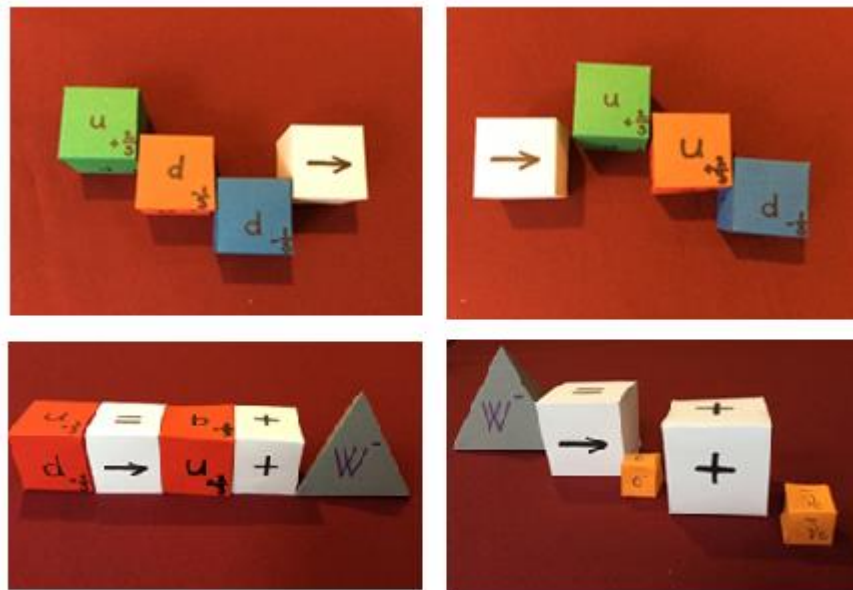
Szakkör keretein belül azt is megmutathatjuk, hogy a bomlás igazából kvarkszinten játszódik le, hiszen tulajdonképpen egy kvarkcsere történik, a d-kvarkból u kvark lesz vagy fordítva, eközben keletkezik egy negatív vagy pozitív W-bozon (a gyenge kölcsönhatás mértékbozonja), amely tovább bomlik egy lepton-antilepton párra (26. ábra).



24. ábra A neutron béta bomlása



25. ábra A barion- és a leptonszám megmaradása



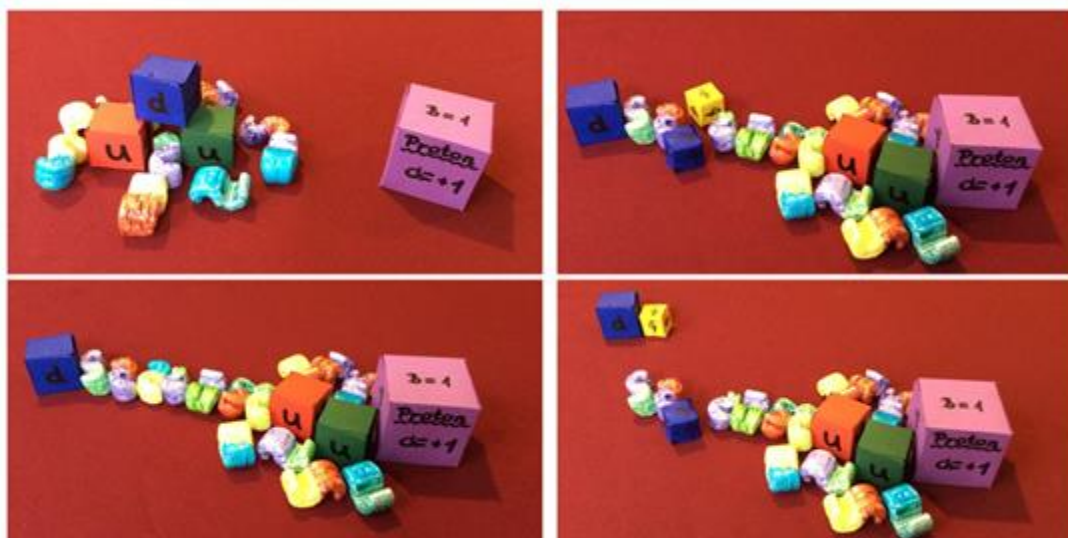
26. ábra Béta-bomlás kvark szinten

A cél az, hogy játszva, szemléletesen tanulják meg tanulók az amúgy kevés érdeklődést kiváltó, ráadásul nehezen emészthető részecskefizika témakört, itt is becsempészhetünk egy plusz trükköt. A W -bozonunkat, mivel ő a standard modell szerint már nem a fermionok családjába tartozik, és eddig azokat szemléltettük kockákkal, készíthetjük például tetraéder alakúra, és a belsejébe elrejtethetünk két kisebb kockát, ezek lesznek a lepton-antilepton párjaink. A bomlás kvarkszintű modellezésénél mintegy varázsütésre „előbújnak” a tetraéderből a bomlástermékek. A béta-bomlás mind a három fajtáját be lehet mutatni a kockák segítségével, és eközben tanítványaink észrevétlenül sajátítják el a tananyagot.

Hadronizáció[15]

A kockák segítségével számos folyamatot lehet még bemutatni és felhasználni a gondolkodató, felfedeztető oktatás gyakorlására. Azt tudjuk, hogy a detektorainkkal, amelyeket a diákokkal együtt fejleszték, müon részecskék áthaladását figyelhetjük meg, amelyek a kozmikus sugárzásban pionok bomlásából keletkeznek. De hogyan jönnek létre a pionok? Ezt a hadronizációnak nevezett folyamatot is a szemléletes modellkészlettel érthetőbbé tehetjük.

A kozmikus sugárzással főleg protonok érkeznek a légkörbe, ahol is ütköznek oxigén vagy nitrogén atomokkal. Az atomok protonjaiban lévő egyik kvark az ütközés hatására távolabb kerül a másik kettőtől, közben kialakul egy gluon-„fonal”, amelynek elemei nagy energiákon képesek átmenetileg átalakulni tengerkvarkokká, vagyis kvark-antikvark párokká. Az antikvark az eltávolodott kvarkkal létrehoz egy mezon (27. ábra), amely u formájában egy pozitív piont, d -ként egy negatív töltésű piont, de lehet u vagy kombinációjú semleges mezon is. A modellezés során végig figyelniük kell a kvantum színdinamika törvényeire, a három valencia kvark mindig piros, zöld és kék színű, a keletkezett mezon pedig színt és a saját antiszínét tartalmazza, vagyis összességében fehér kell, hogy legyen.



27. ábra Pionok keletkezése

Leptonszám megmaradás [15]

Egy szokatlan megmaradási törvényre vezethetjük rá a tanárokat és a diákokat, az úgynevezett elektronikus és müonikus leptonszám megmaradásra. A leptontöltés megmaradását Marx György ismerte fel 1951-ben. A háromféle lepton és a hozzájuk tartozó neutrínók leptontöltése 1, az antirészecskéiké -1, minden más részecskéé 0. Az elemi részecskék kölcsönhatása során a leptontöltés is megmarad, a hat megmaradó mennyiség közül ez az egyik.

Ennek bevezetését érdemes a tanárok és diákok körében is népszerű ködkamra készíttéssel és az áthaladó részecskék nyomvonalainak megfigyelésével kezdeni. Anélkül, hogy mágneses térbe helyezzük a kamrát, meg tudjuk állapítani, hogy a hosszú, vékony nyom az elektront jelzi számunkra. Egy „picit” segíthetünk, hogy ez egy müon bomlásából jöhetett létre, vagyis igazából a müon-részecske földre érkezését detektáltuk. Itt persze óhatatlanul előjön a speciális relativitáselmélet és a müon, mint ennek legdöntőbb bizonyítéka. Ezt a tanult képletek és a müon élettartama ismeretében az ügyesebb diákok ki is tudják számolni, így bizonyítani az idődilatáció és a hosszkontrakció érvényességét.

Vizsont mi most azt szeretnénk kockáink segítségével bebizonyítani, hogy egy müon bomlása tulajdonképpen kétbomlásos folyamat és három részecske keletkezik a bomlás során. Legtöbben azt gondolják, hogy Negatív töltésű müonból elektron és még valamilyen semleges részecske, pozitív töltésű müonból pedig pozitron és a feltételezett neutrínó keletkezik.

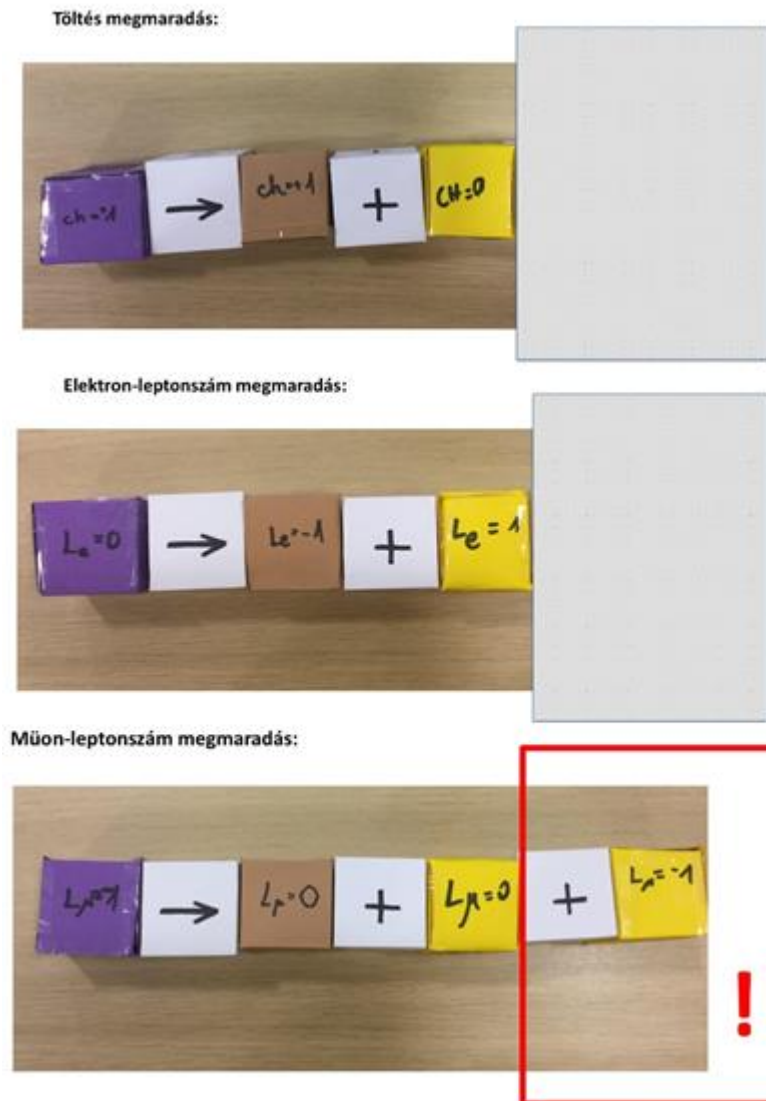
Nézzük meg kockák segítségével, hogy ennek a feltételezésnek a nyomán, hogy néz ki egy folyamat (28. ábra)!



28. ábra Pozitív töltésű müon bomlása

A rávezetési módszer lényege, hogy először nem áruljuk el a végeredményt, hanem ismert és kevésbé ismert törvények segítségével próbáljuk kitaláltatni a hiányzó részecske fizikai paramétereit.

Ehhez először az elektromos töltés megmaradását ellenőrizzük, majd a kétféle leptontöltés megmaradását (29. ábra).



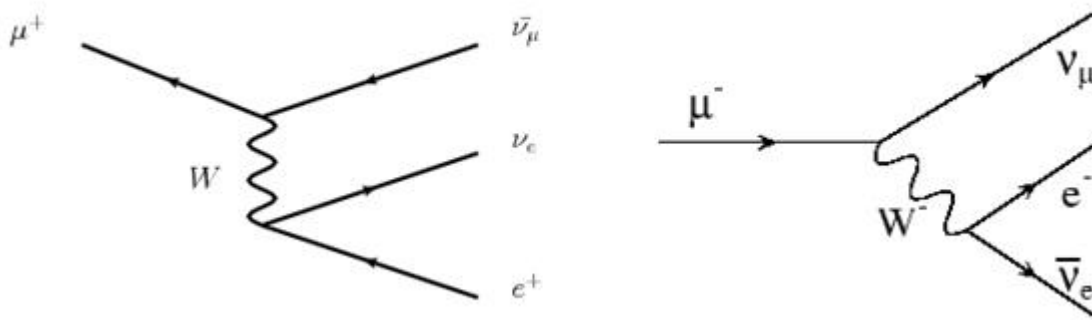
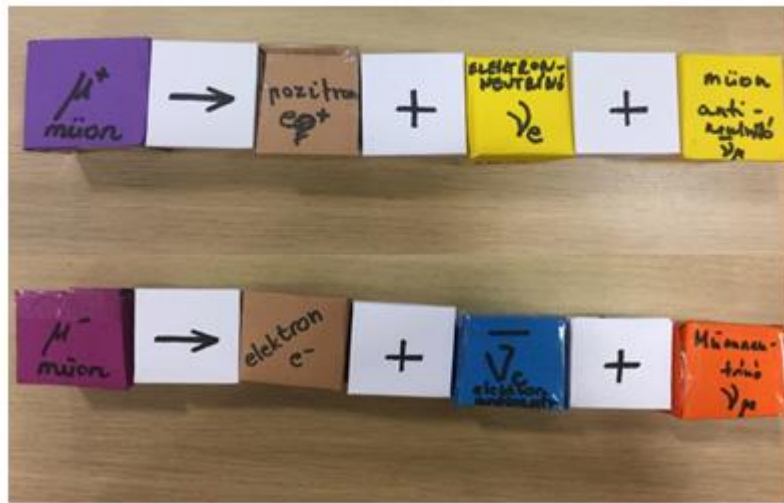
29. ábra A müonok bomlása rávezetéssel

Három megmaradó mennyiséget tüntetünk fel előre a leptonkockákon, az elektromos töltés, az elektronikus és a müonikus leptontöltést (30. ábra).

	e^-	e^+	ν_e	$\bar{\nu}_e$	μ^-	μ^+	ν_μ	$\bar{\nu}_\mu$
elektronikus-leptonszám	1	-1	1	-1	0	0	0	0
müonikus-leptonszám	0	0	0	0	1	-1	1	-1

30. ábra Leptontöltések

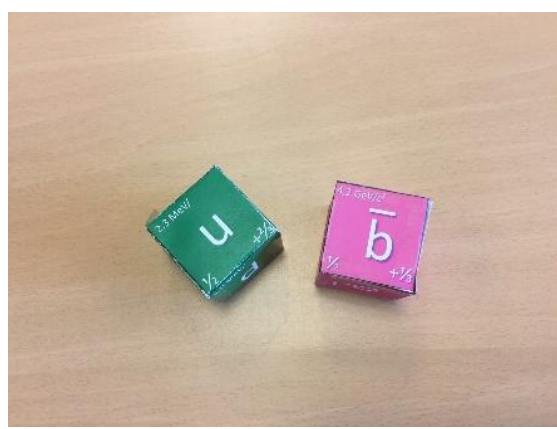
Mivel mindhárom mennyiség megmarad, az egyenlet bal és jobb oldalán a számok összege egyenlő kell, hogy legyen. A kockák megfelelő forgatásával ezeket ellenőrizni tudjuk, így kapjuk a háromrészesekés folyamatot mind a pozitív, mind pedig a negatív töltésű müon esetében (31. ábra).



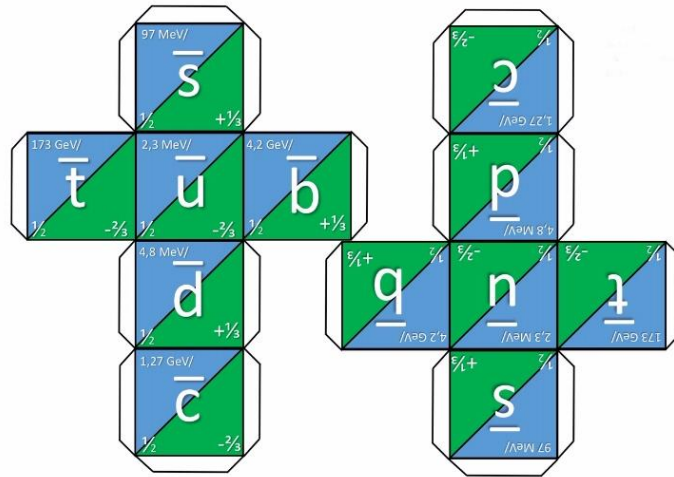
31. ábra A müonok bomlása kockákkal és Feymann diagrammokkal

A kockák előkészítése is egy fontos lépése a tanulási folyamatnak, hiszen a diákok által korábban még nem ismert mennyiségekkel, illetve azoknak jellemző értékeket kell rögzíteni. Sokszor segítenek a különböző táblázatok, mert nem a száraz adatok „bemagoltatása” a cél, hanem az együtt gondolkodás.

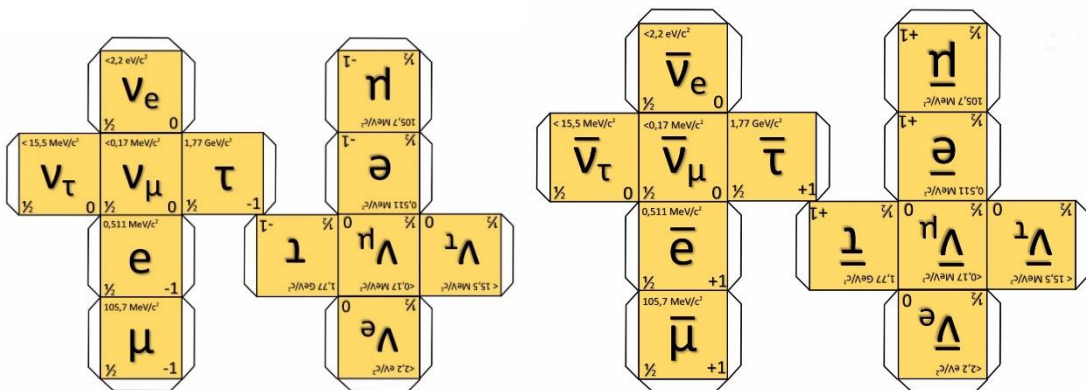
Színek és antiszínek



Antikvarkok

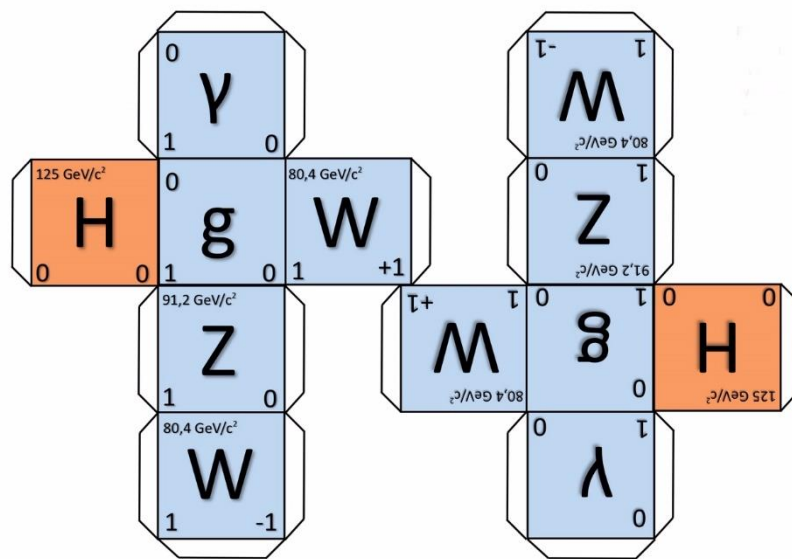


Leptonok és antileptonok

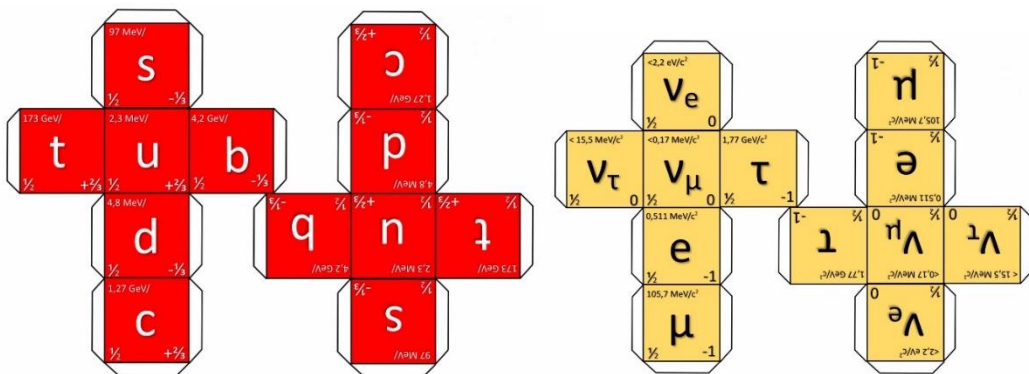




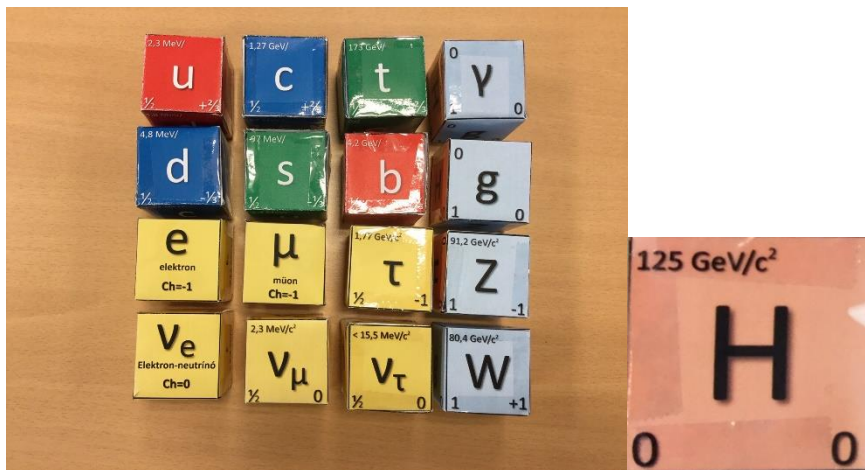
Bozonok



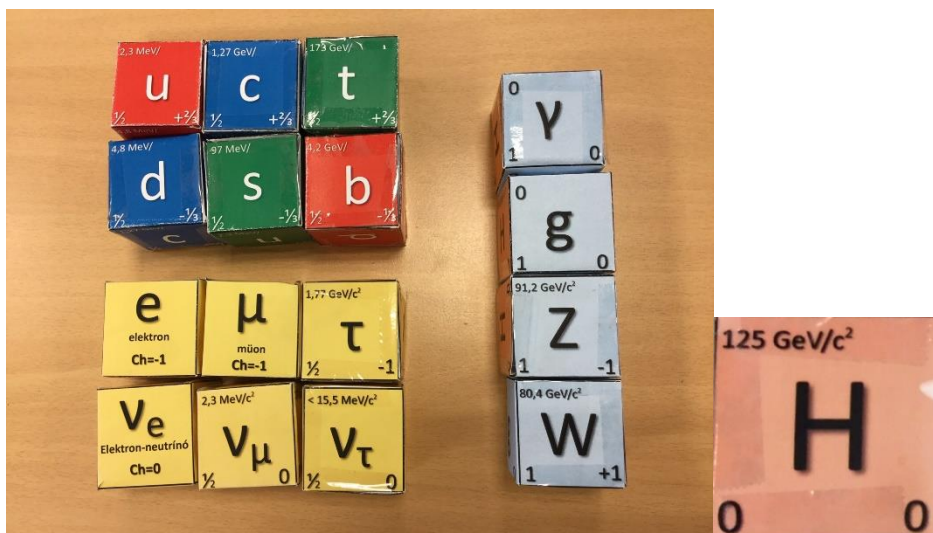
Fermionok



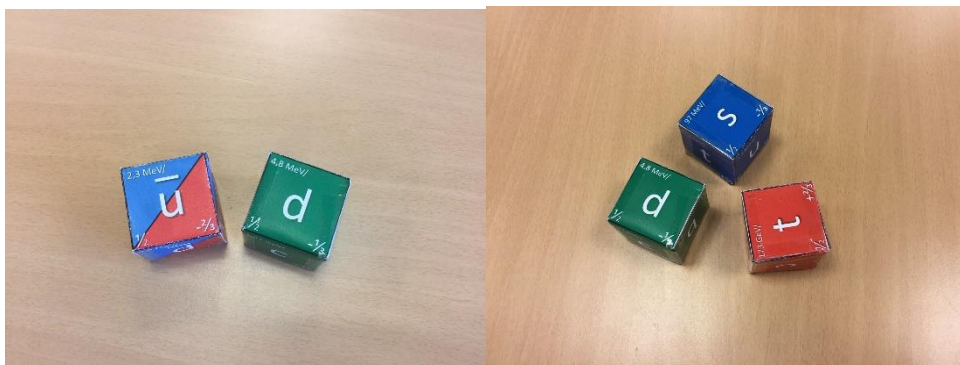
Standard modell



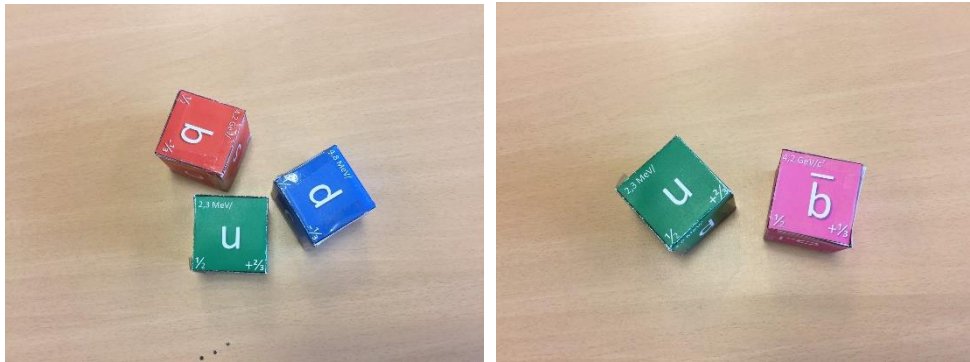
Részecske családok



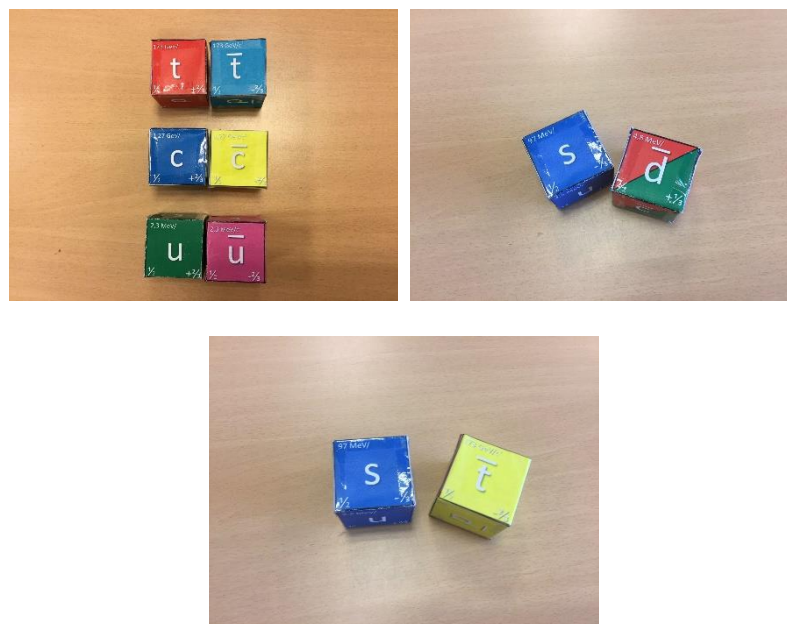
Hadronok



Barionok

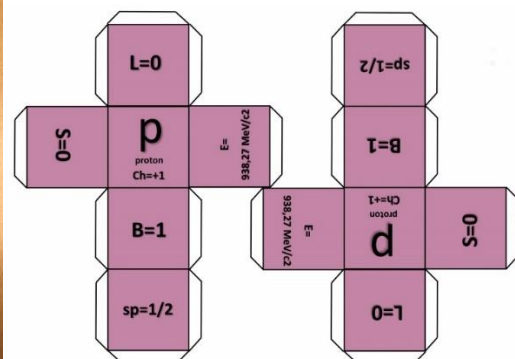


Mezonok



Összetett részecskék alkotása

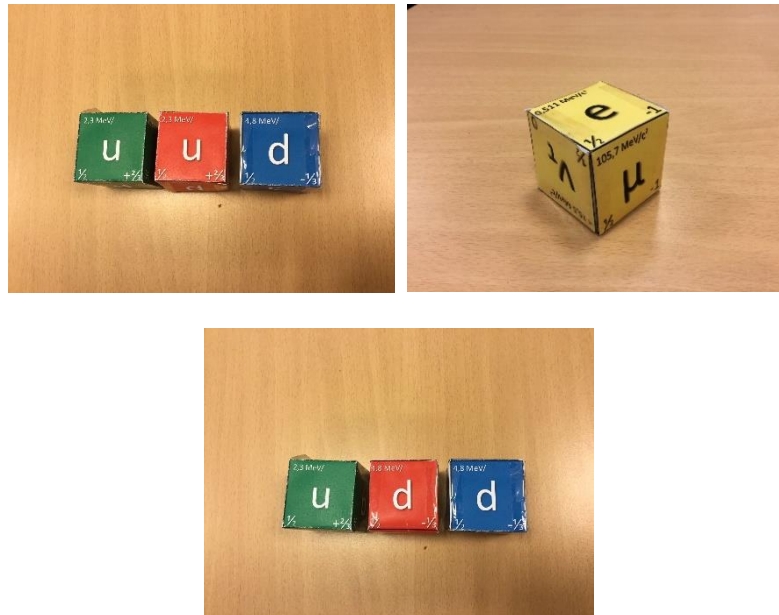
Proton



Neutron



Hidrogén



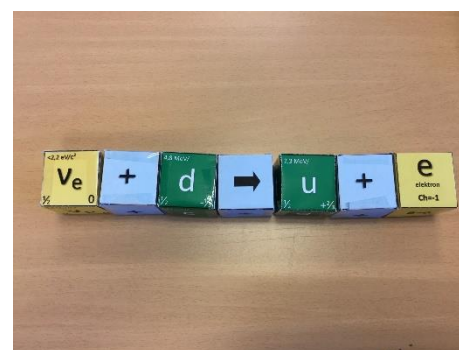
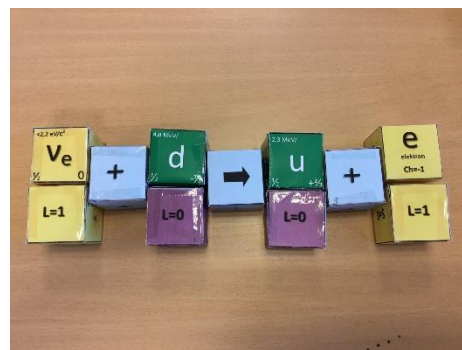
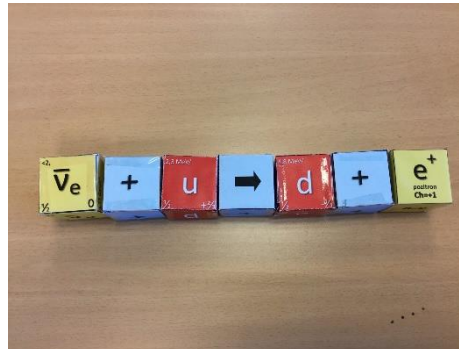
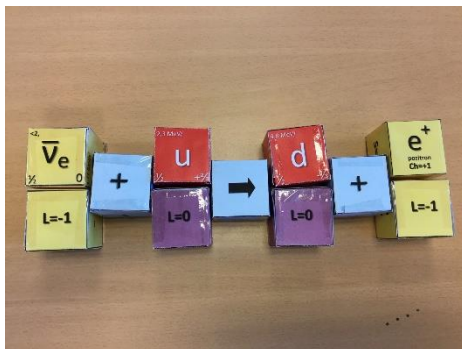
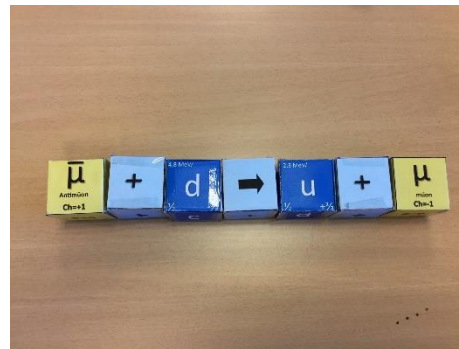
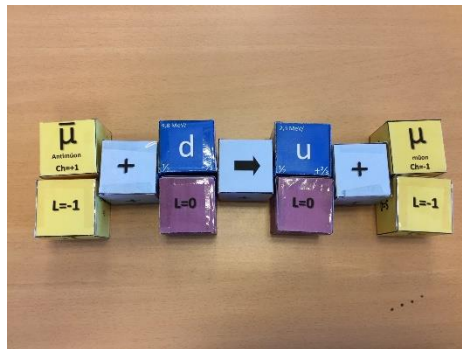
Deutérium

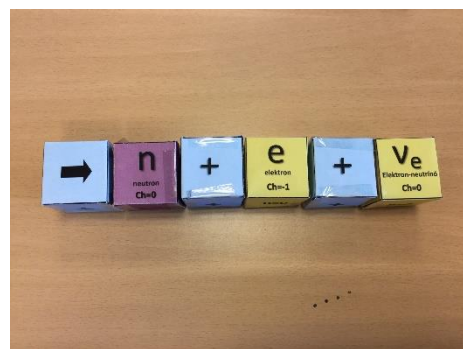
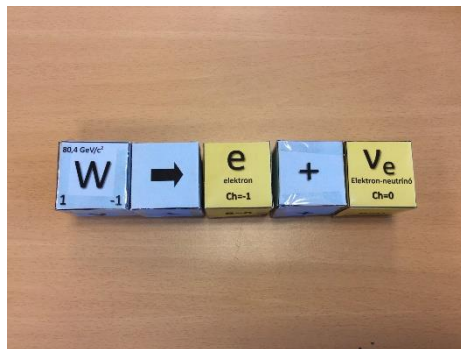
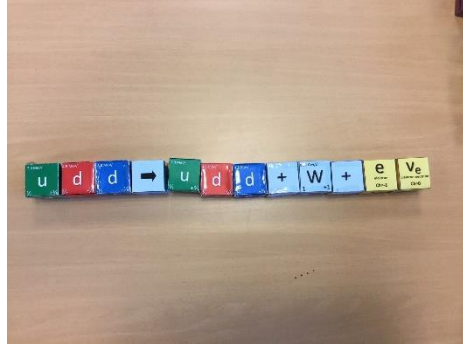
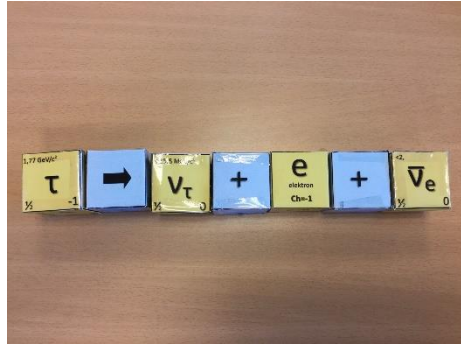
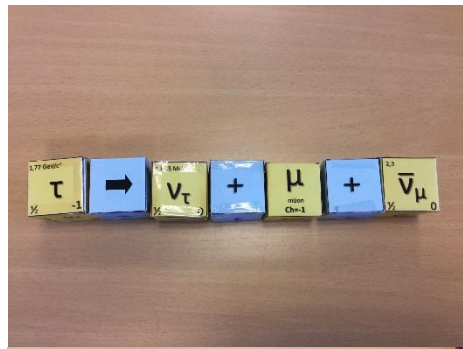
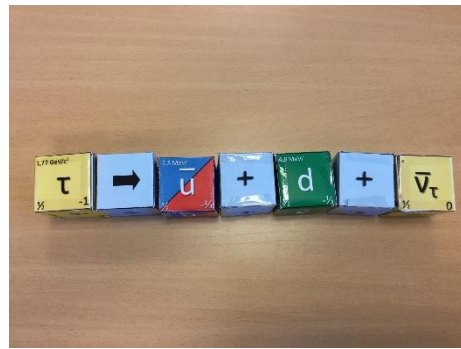
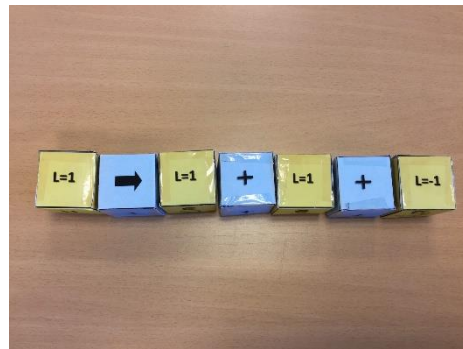
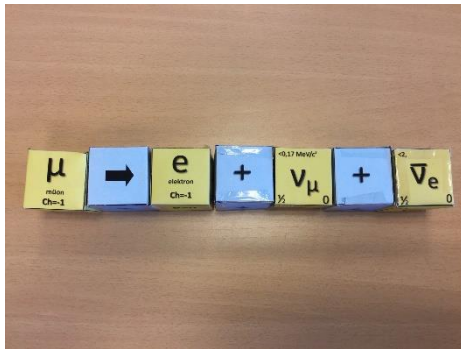
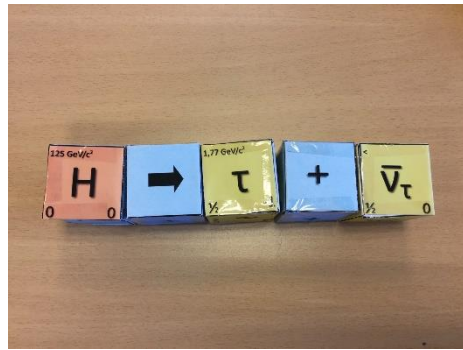
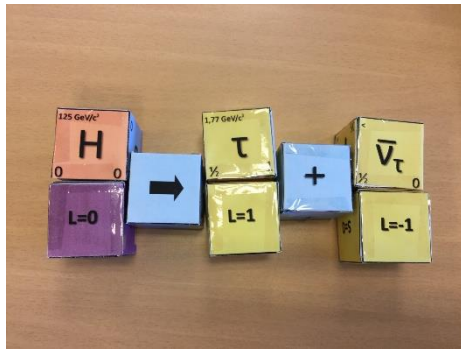


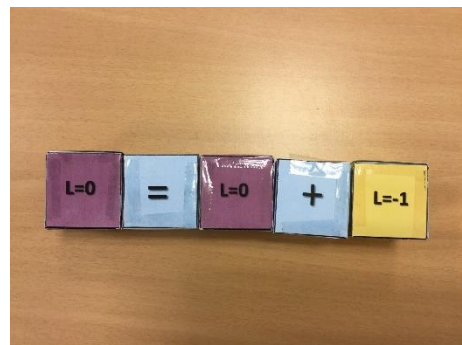
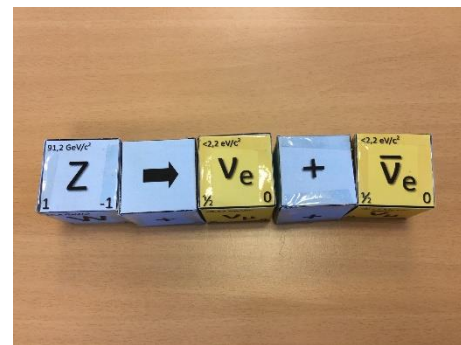
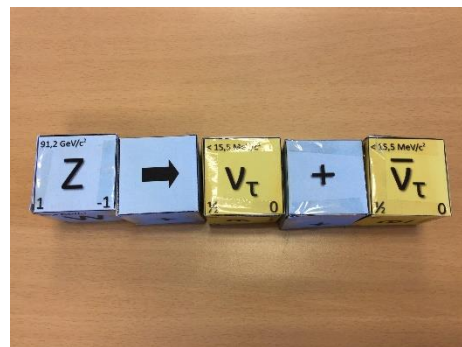
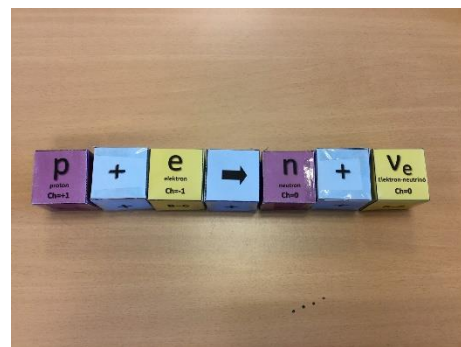
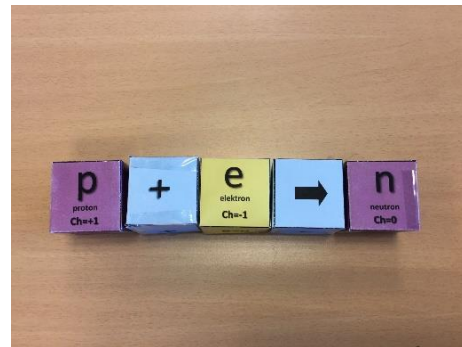
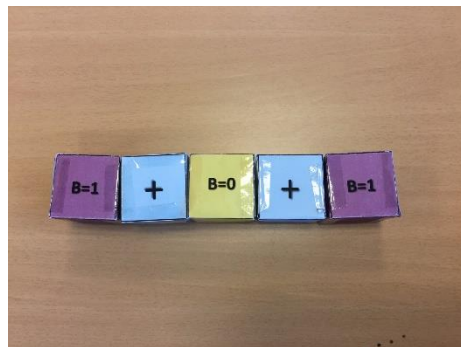
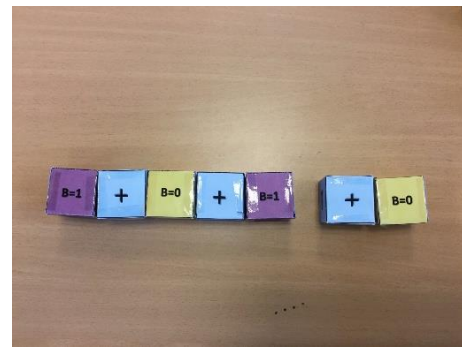
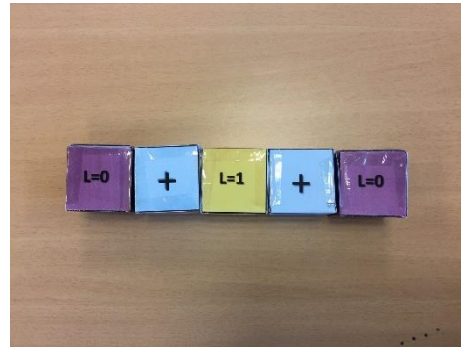
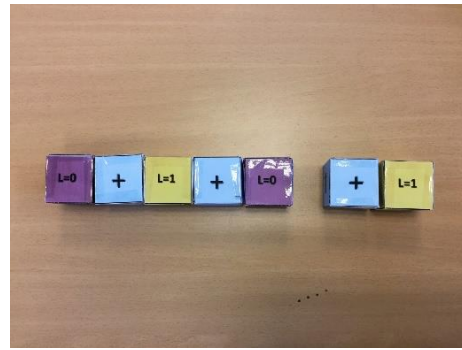
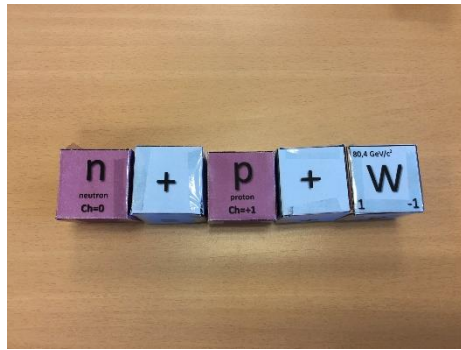
Antihidrogén

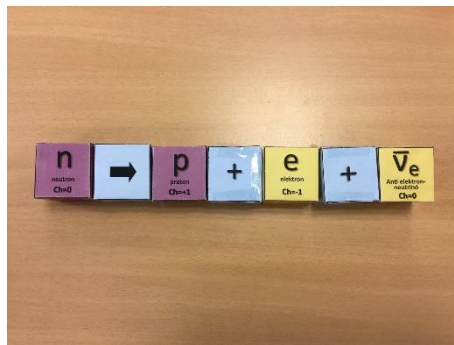
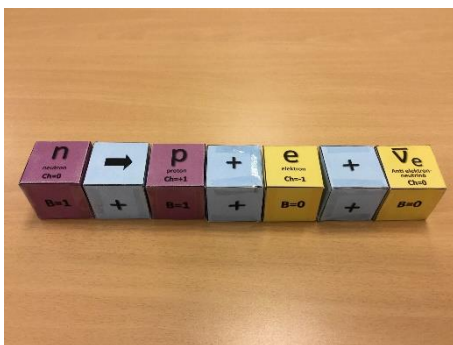
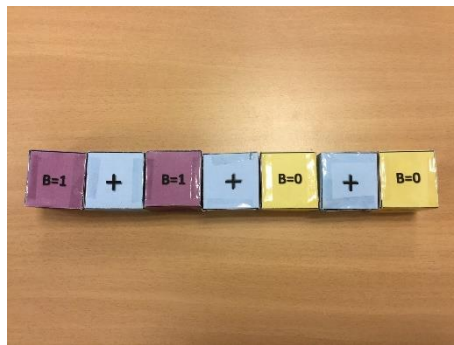
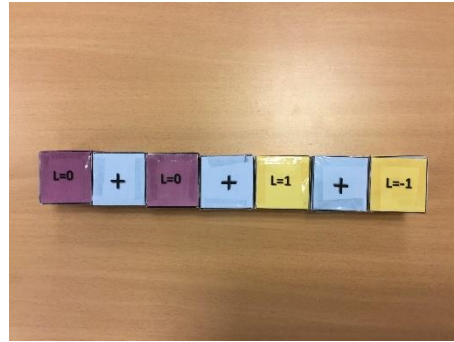
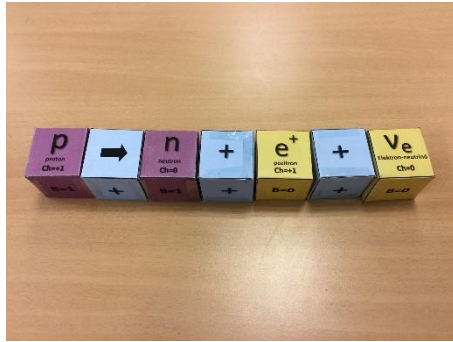
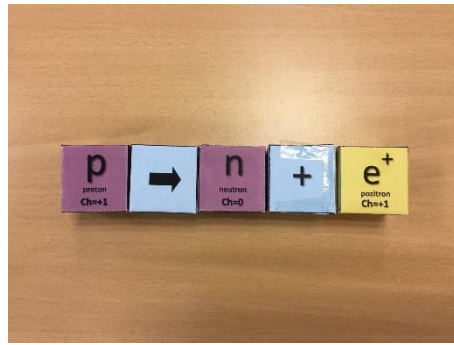
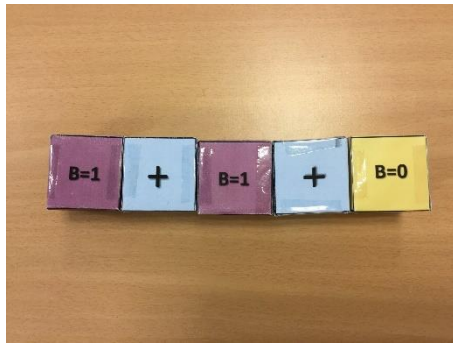


Átalakulások

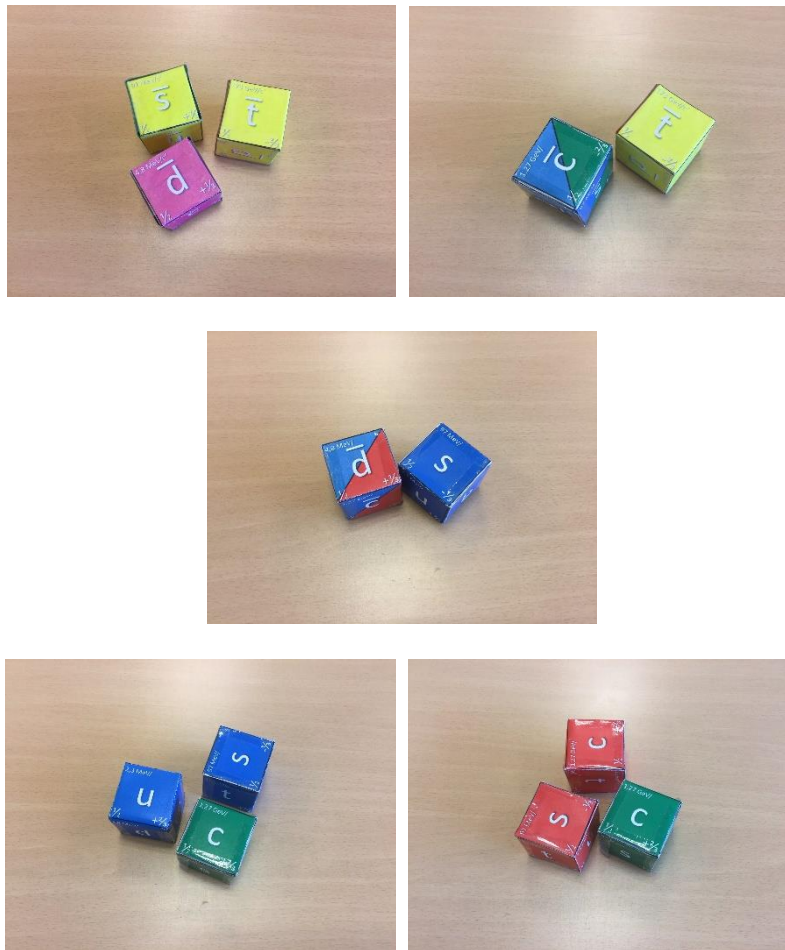








“Hibás” részecskék



További ötletek, javaslatok

Sorrendek

Tömeg/energia szerint

- kvarkok
- leptonok

Felfedezésük sorrendjében

- kvarkok
- leptonok
- bozonok

Elektromos töltésük alapján:

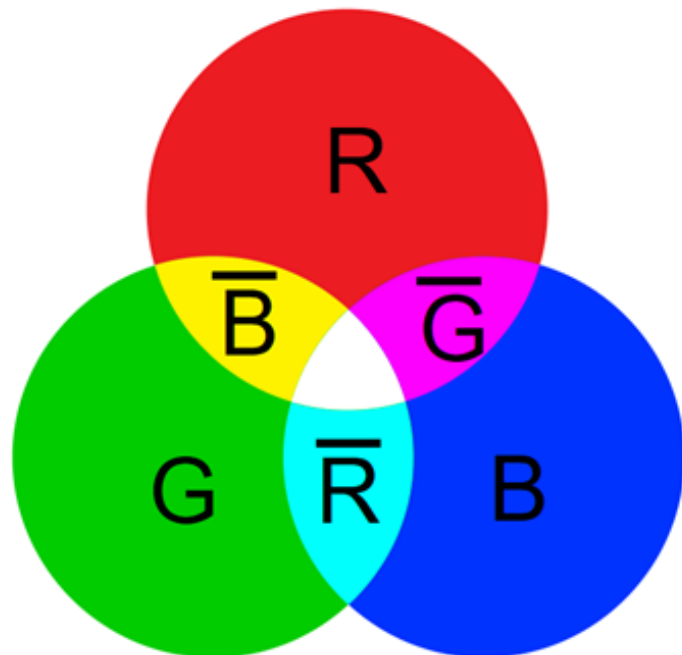
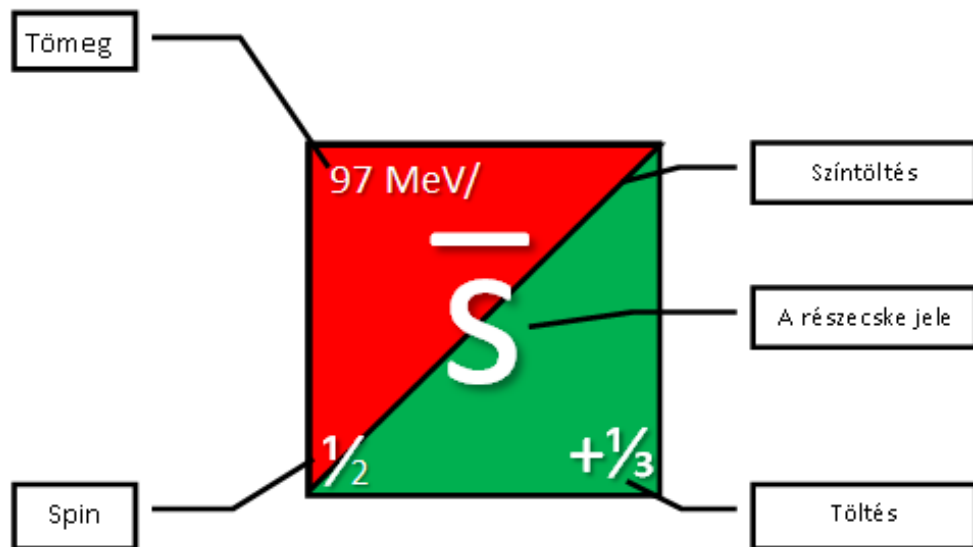
- semleges
- törtöltés
- egész töltés

A többi a tanárookra és a diákokra bízunk 😊

Mellékletek:

Sablonok

A kockatípus bemutatása



Az elemi részecske kockák mindegyik oldala 1-1 részecskét mutat be. A kockák valamennyi lapja azonos módon épül fel, a bal oldalon látható szerkezetben.

Egy-egy kockán hasonló részecskék találhatók:

- Kvarkok
- Antikvarkok
- Leptonok
- Antileptonok
- Bozonok
- Operátor jelek

A gluon részecskénél nem tüntettünk fel színtöltést.

A kvarkok és antikvarkok esetén a kocka színe egyúttal a részecske színtöltését is jelzi. Az normál színtöltések:

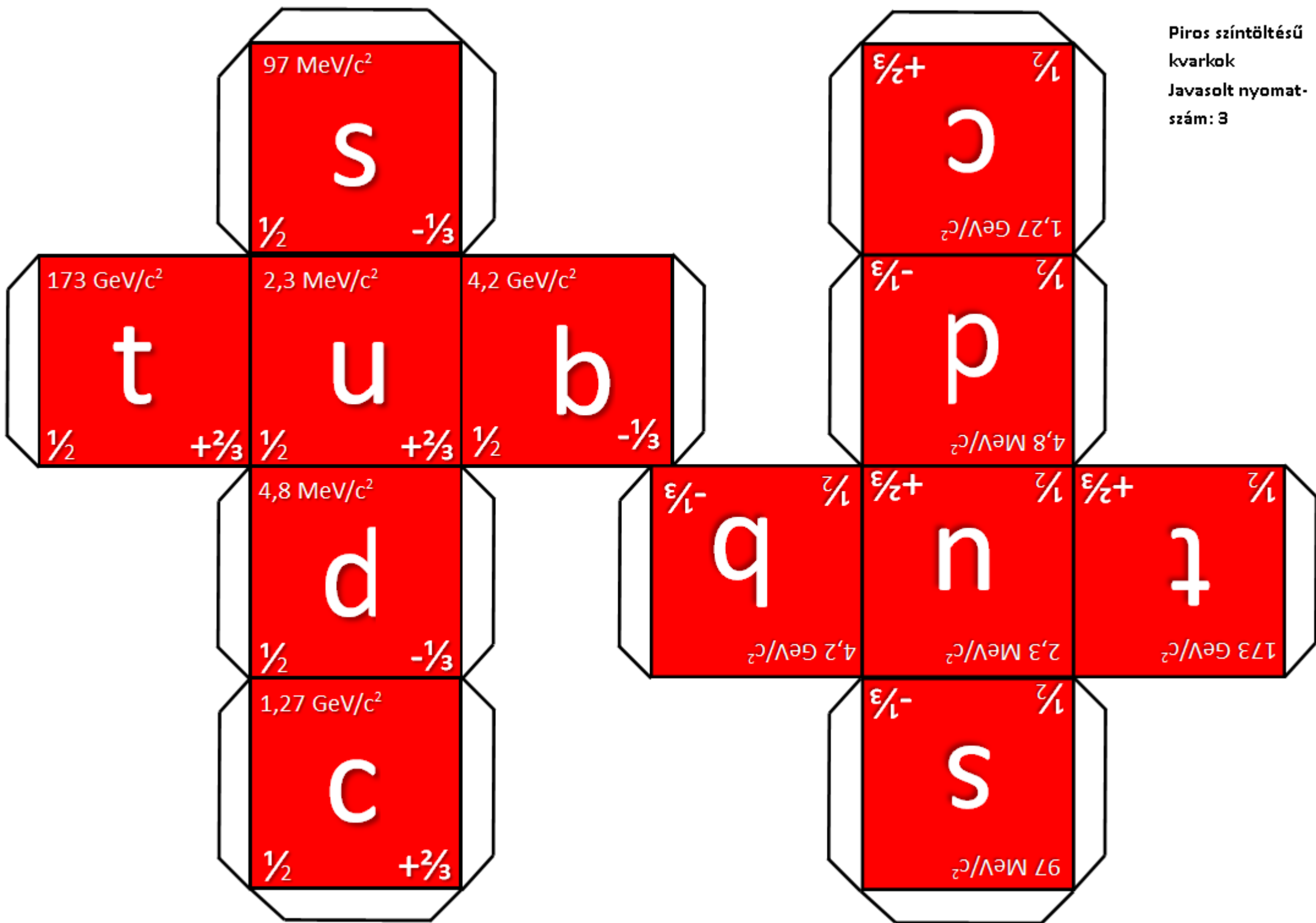
- Piros (R)
- Zöld (G)
- Kék (B)

Az antiszín töltéseket kétféle módon jelöltük. Az egyszerűbb mód a lap kettéosztása és két szín megadása. A Piros-Zöld pár pl. az „Anti-kék” színtöltést jelöli.

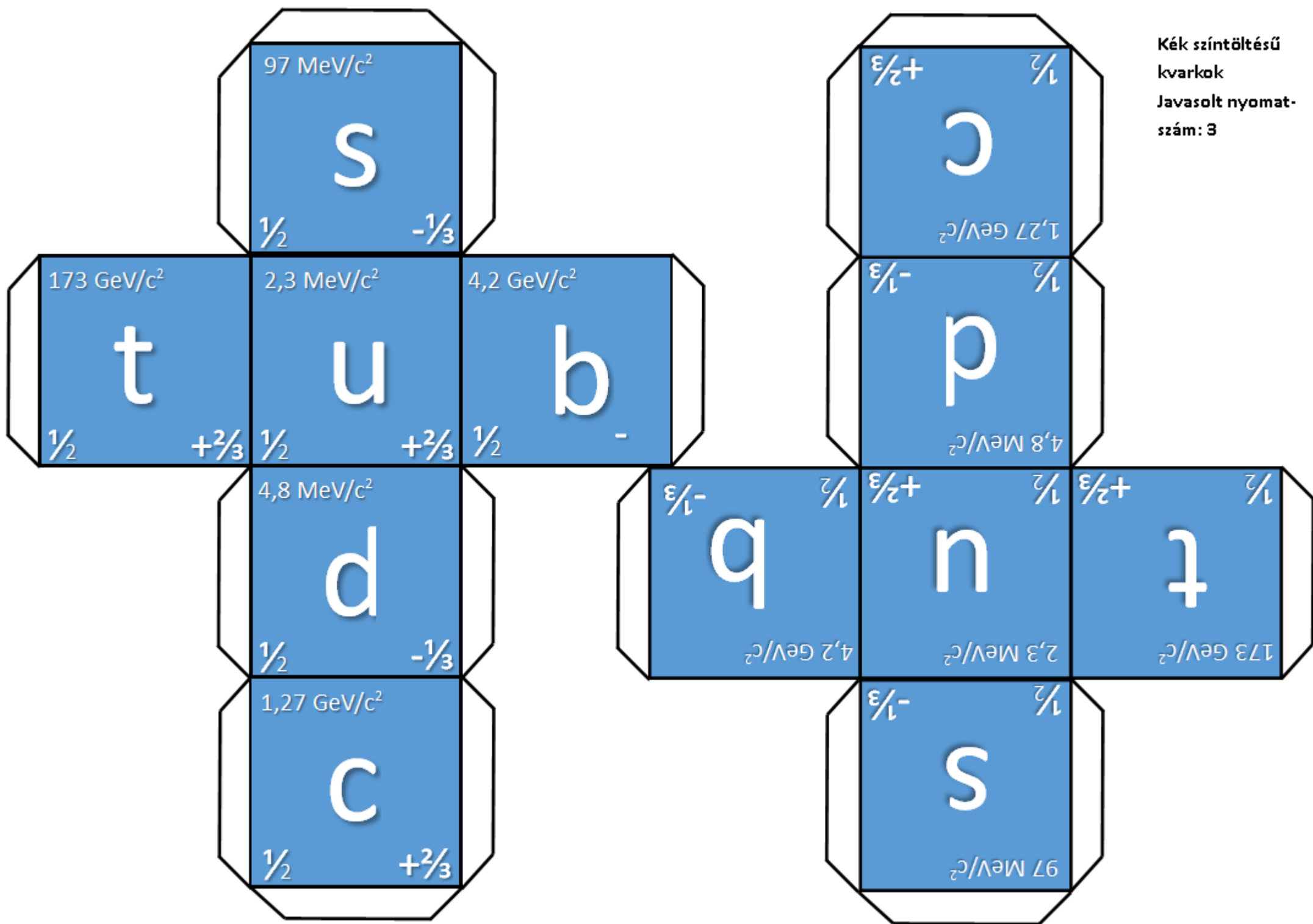
Emellett készítettünk „nehezebb” sablonokat is, ahol az additív RGB színrendszer használva az alábbi anti-színek jönnek létre:

- Türkiz—Anti-piros (R felülvonás)
- Magenta— Anti-Zöld (G felülvonás)
- Citrom—Anti-Kék (B felülvonás)

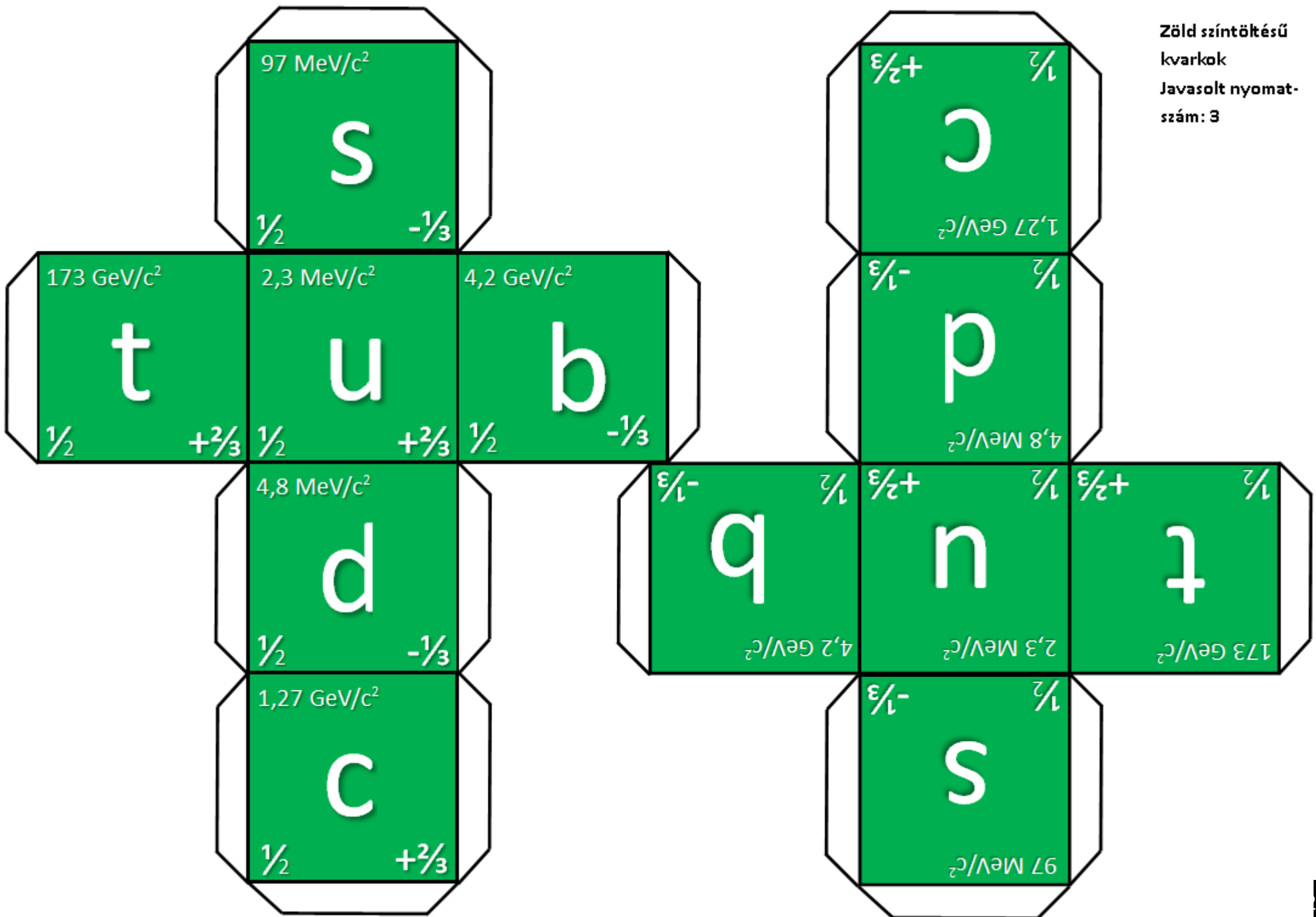
Piros színtöltésű
kvarkok
Javasolt nyomat-
szám: 3



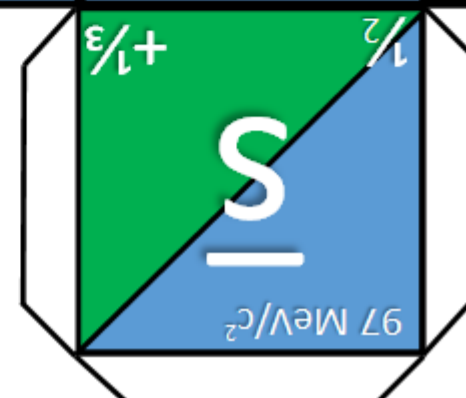
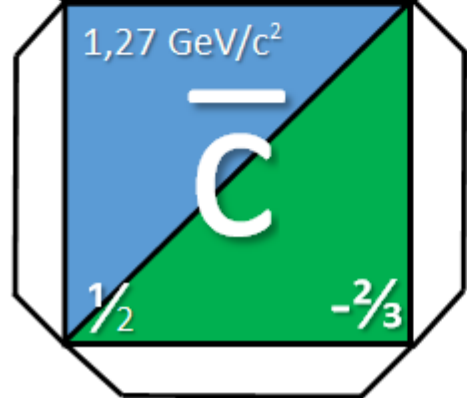
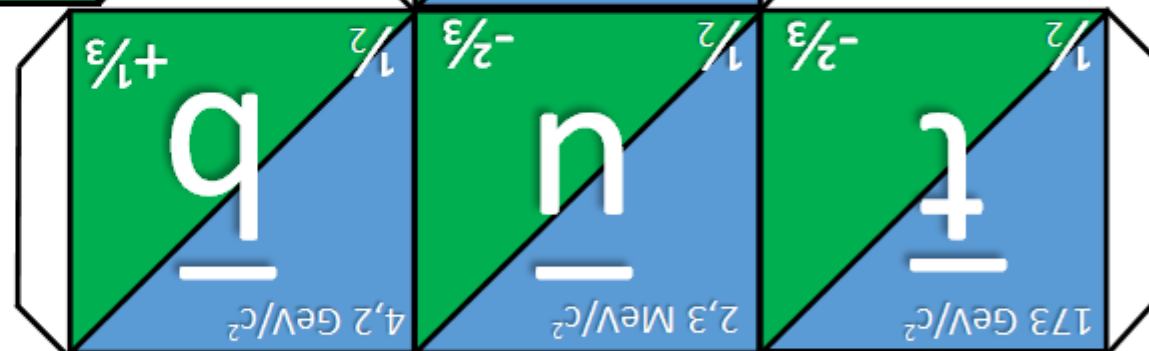
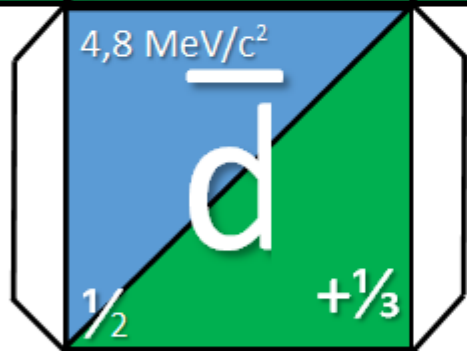
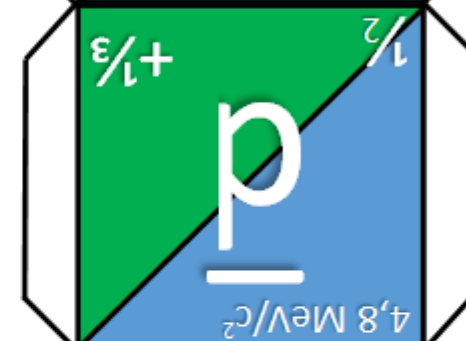
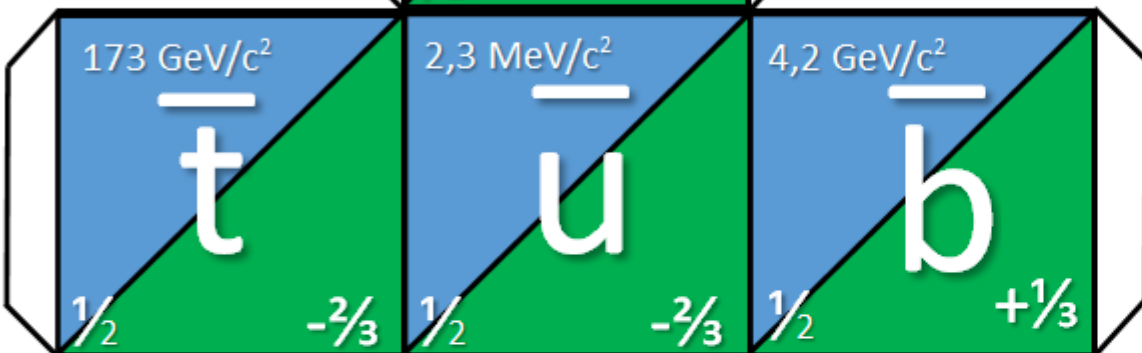
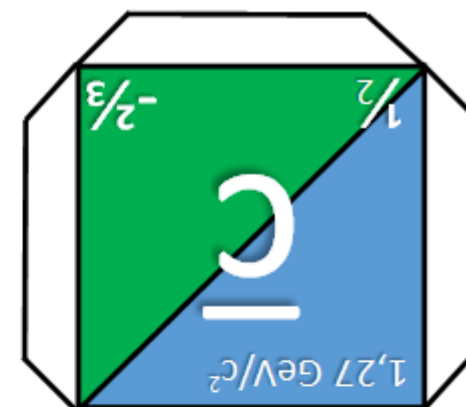
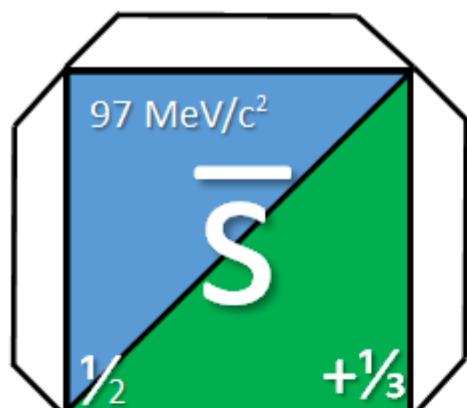
Kék színtöltésű
kvarkok
Javasolt nyomat-
szám: 3



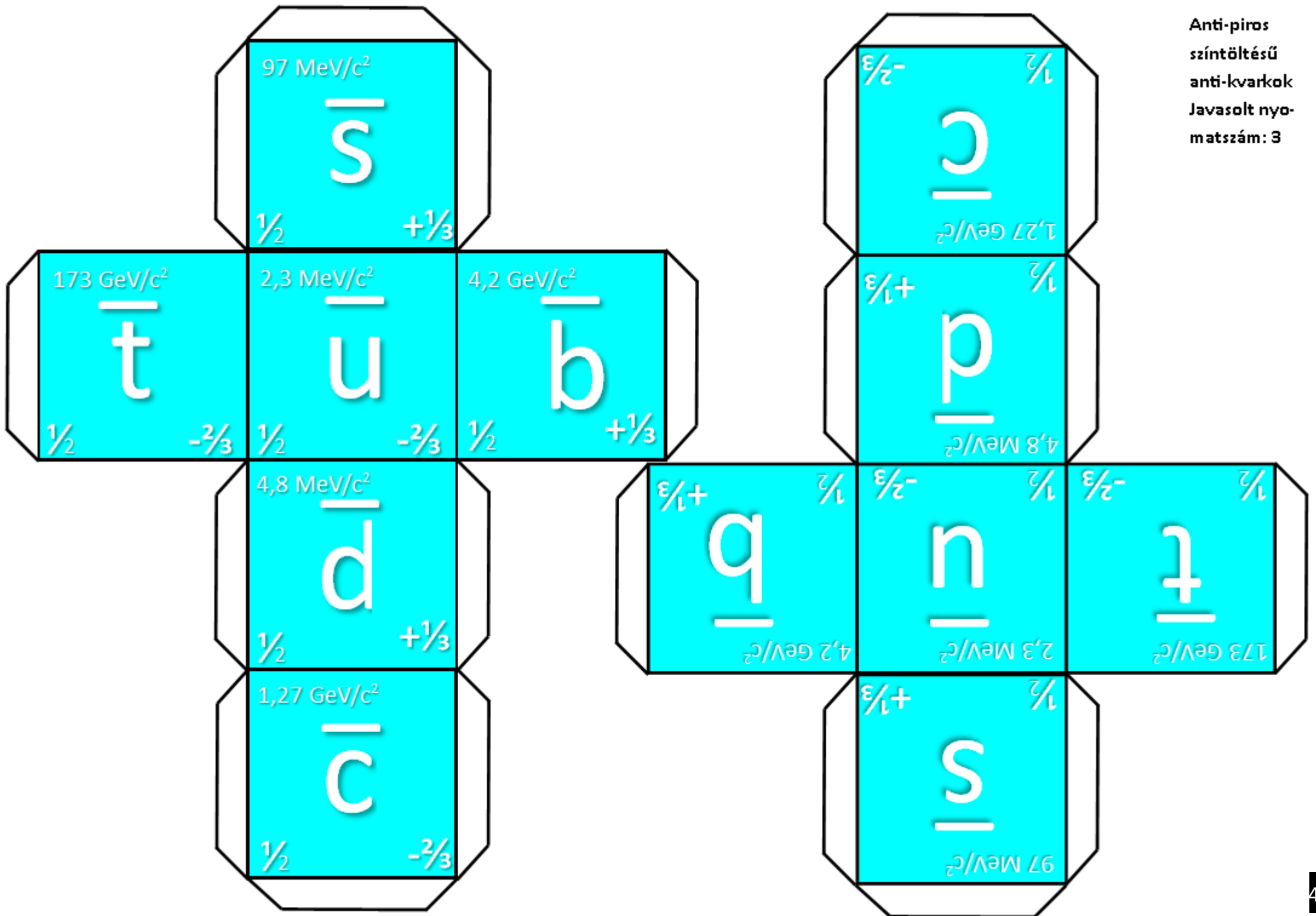
Zöld színtöltésű
kvarkok
Javasolt nyomat-
szám: 3



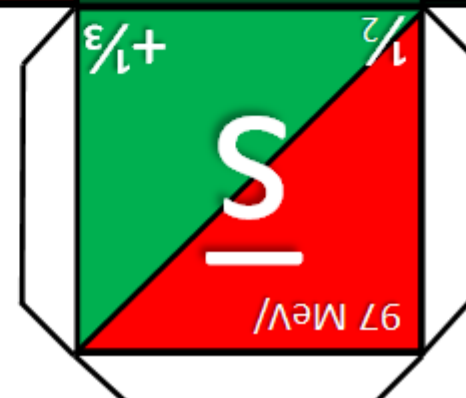
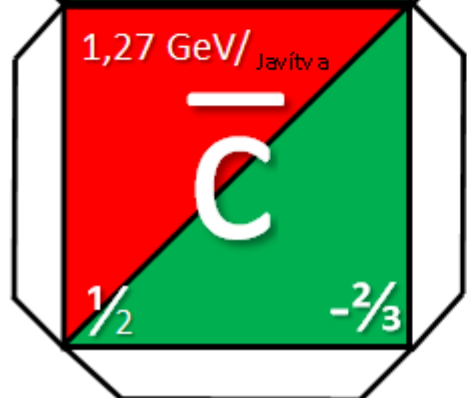
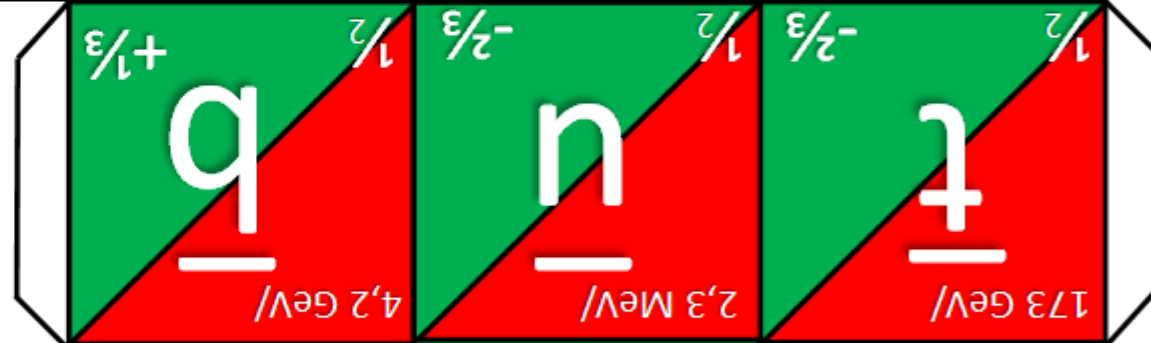
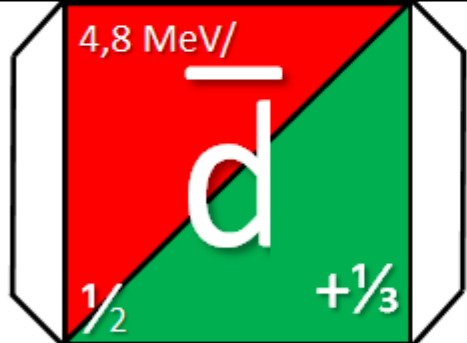
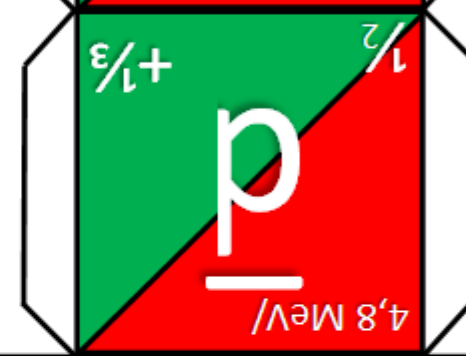
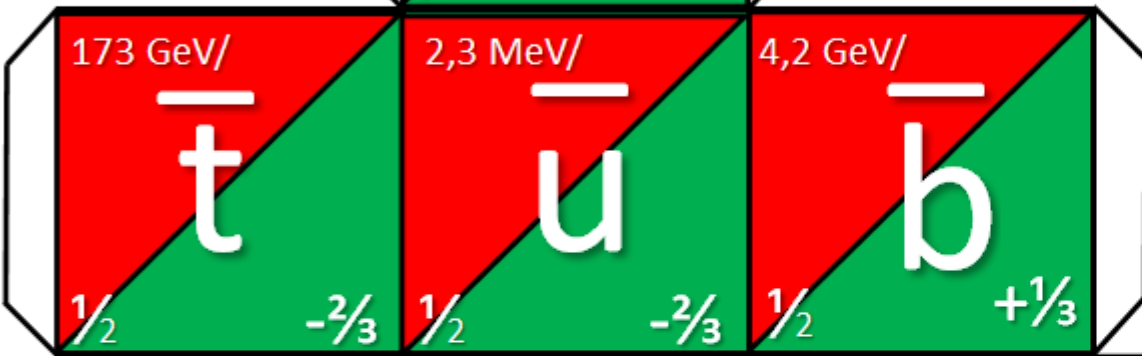
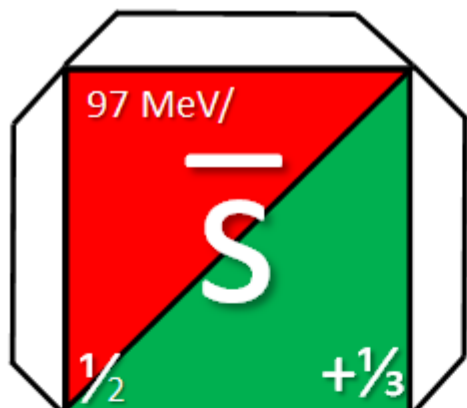
Anti-piros szín-
töltésű
anti-kvarkok
Javasolt nyomat-
szám: 3



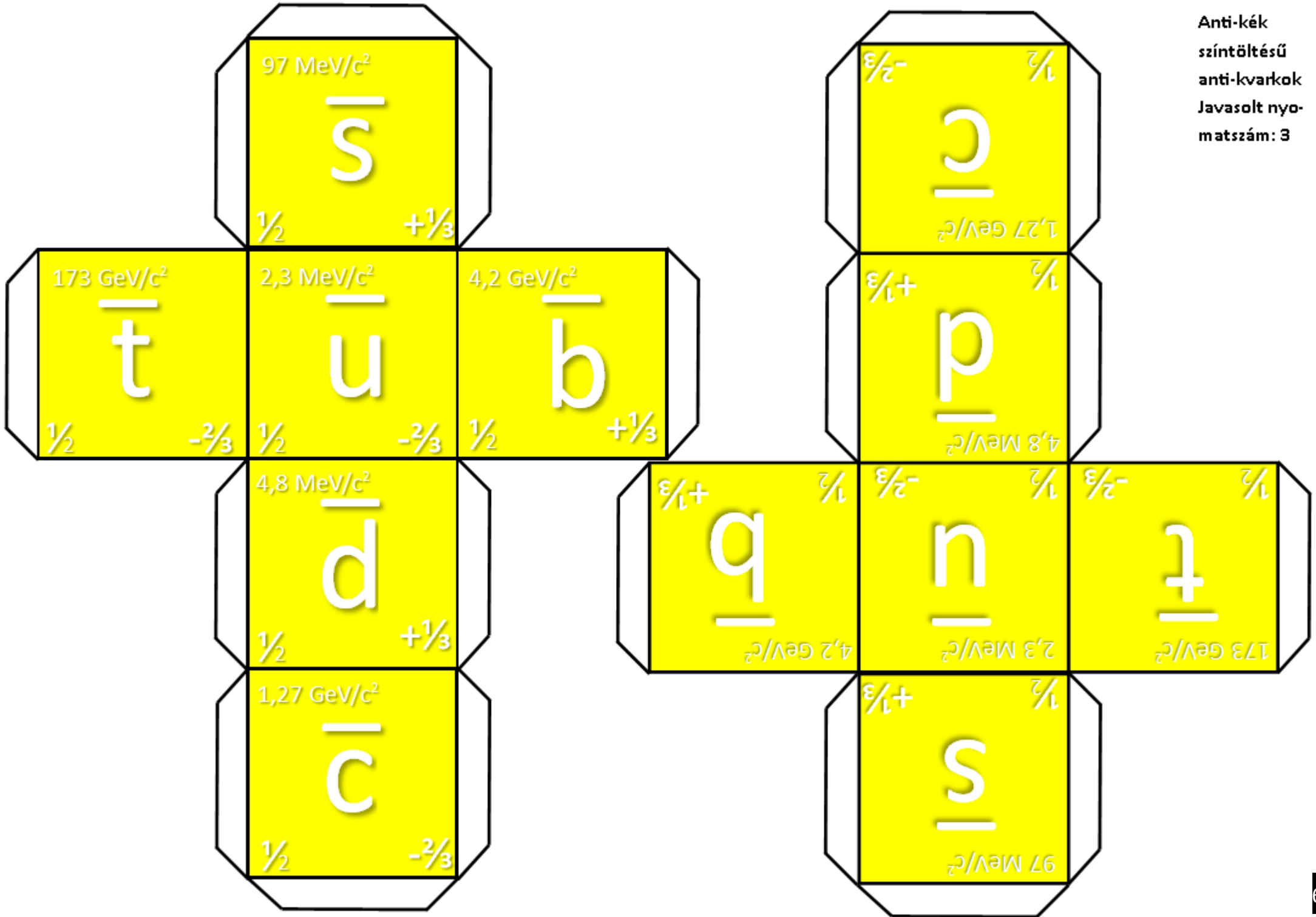
Anti-piros
színtöltésű
anti-kvarkok
Javasolt nyo-
matszám: 3



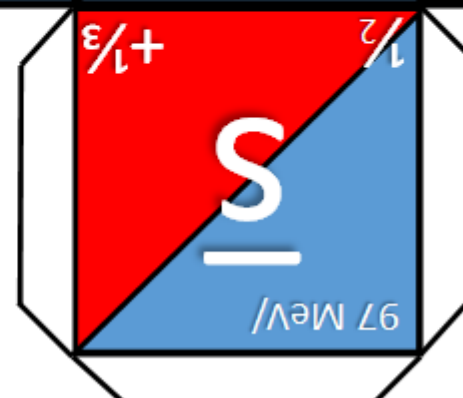
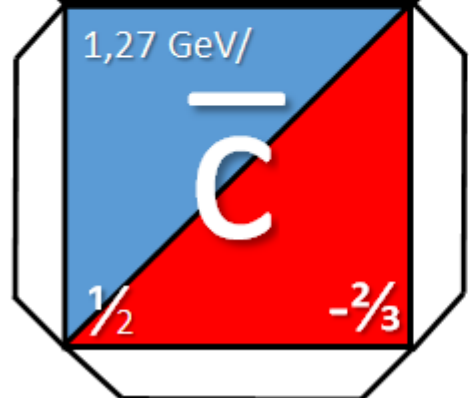
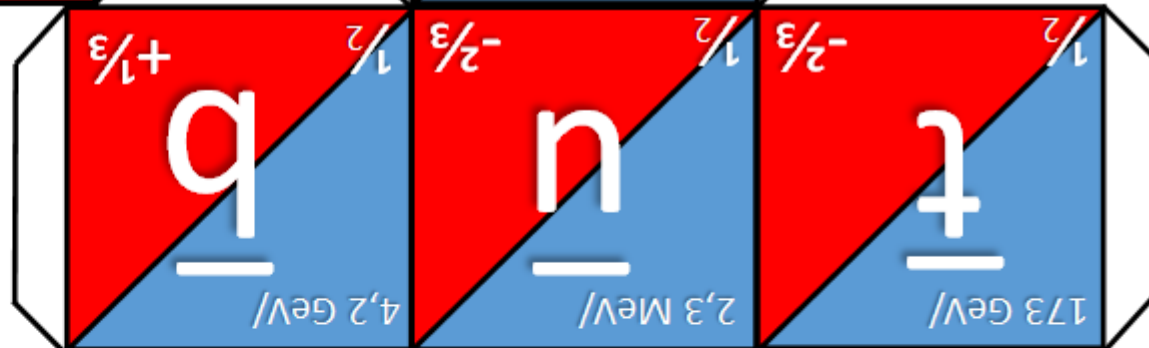
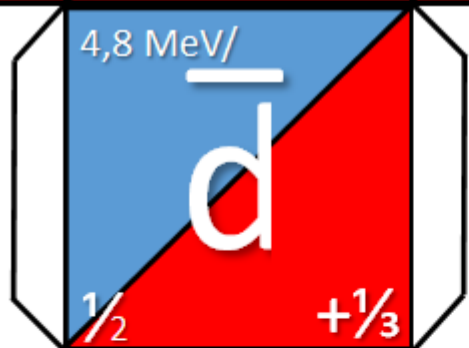
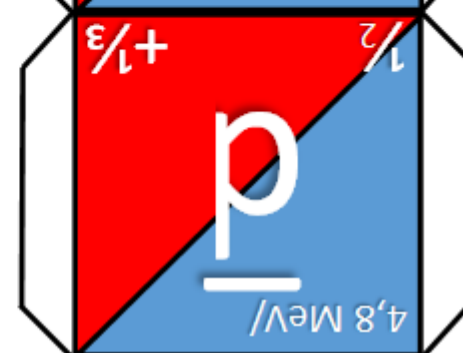
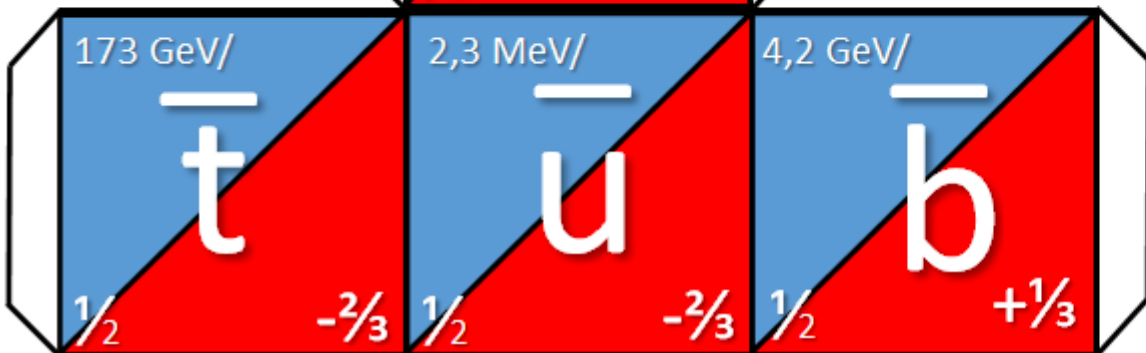
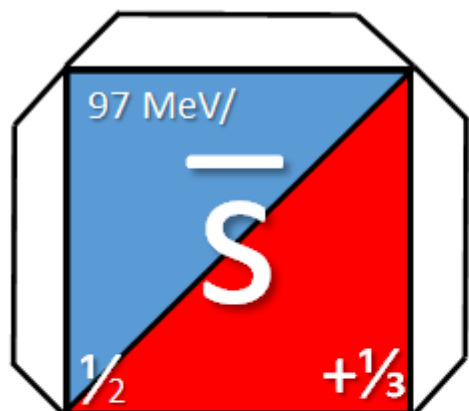
Anti-kék szintöl-
tésű
anti-kvarkok
Javasolt nyo-
matszám: 3



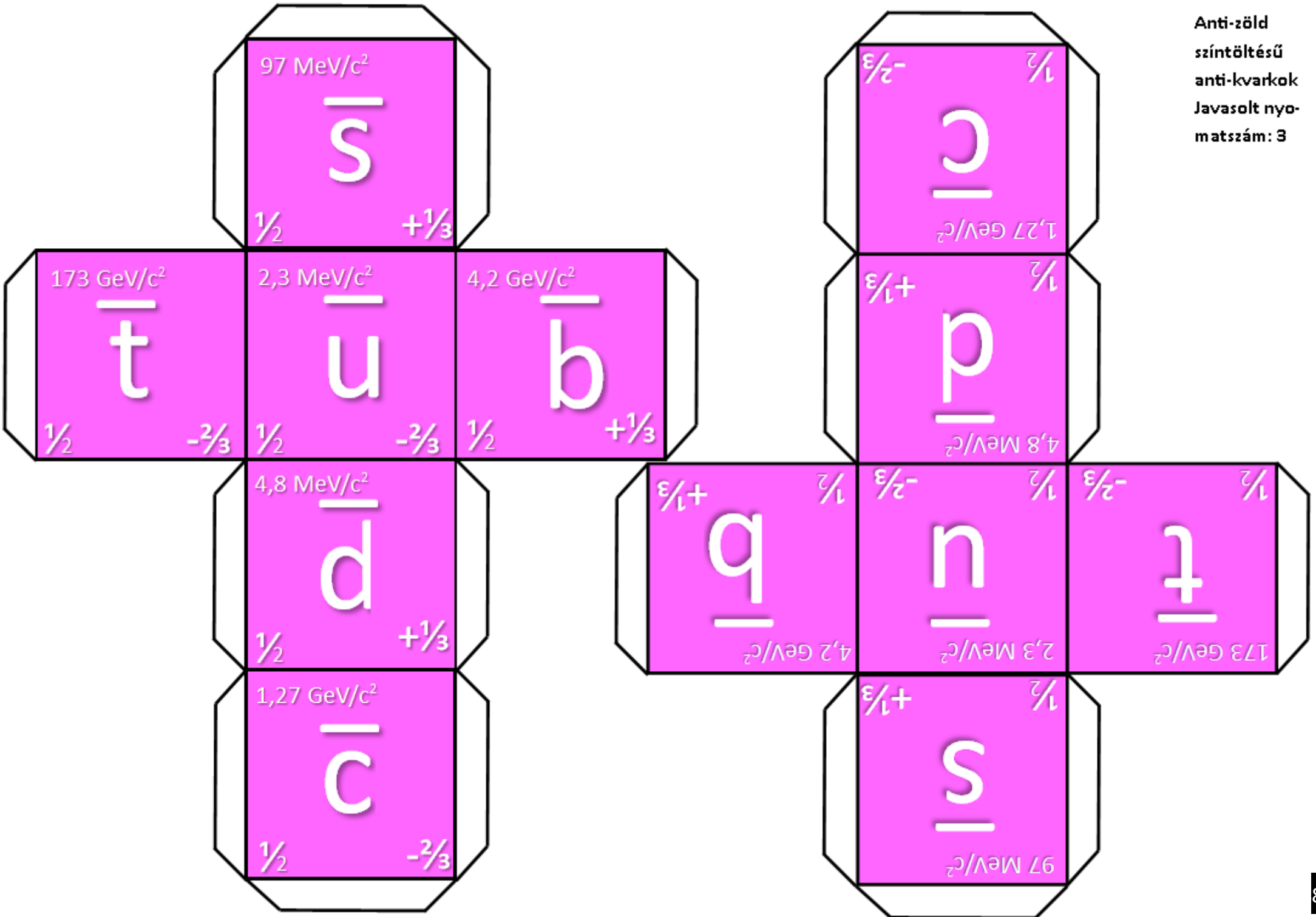
Anti-kék
színtöltésű
anti-kvarkok
Javasolt nyo-
matszám: 3



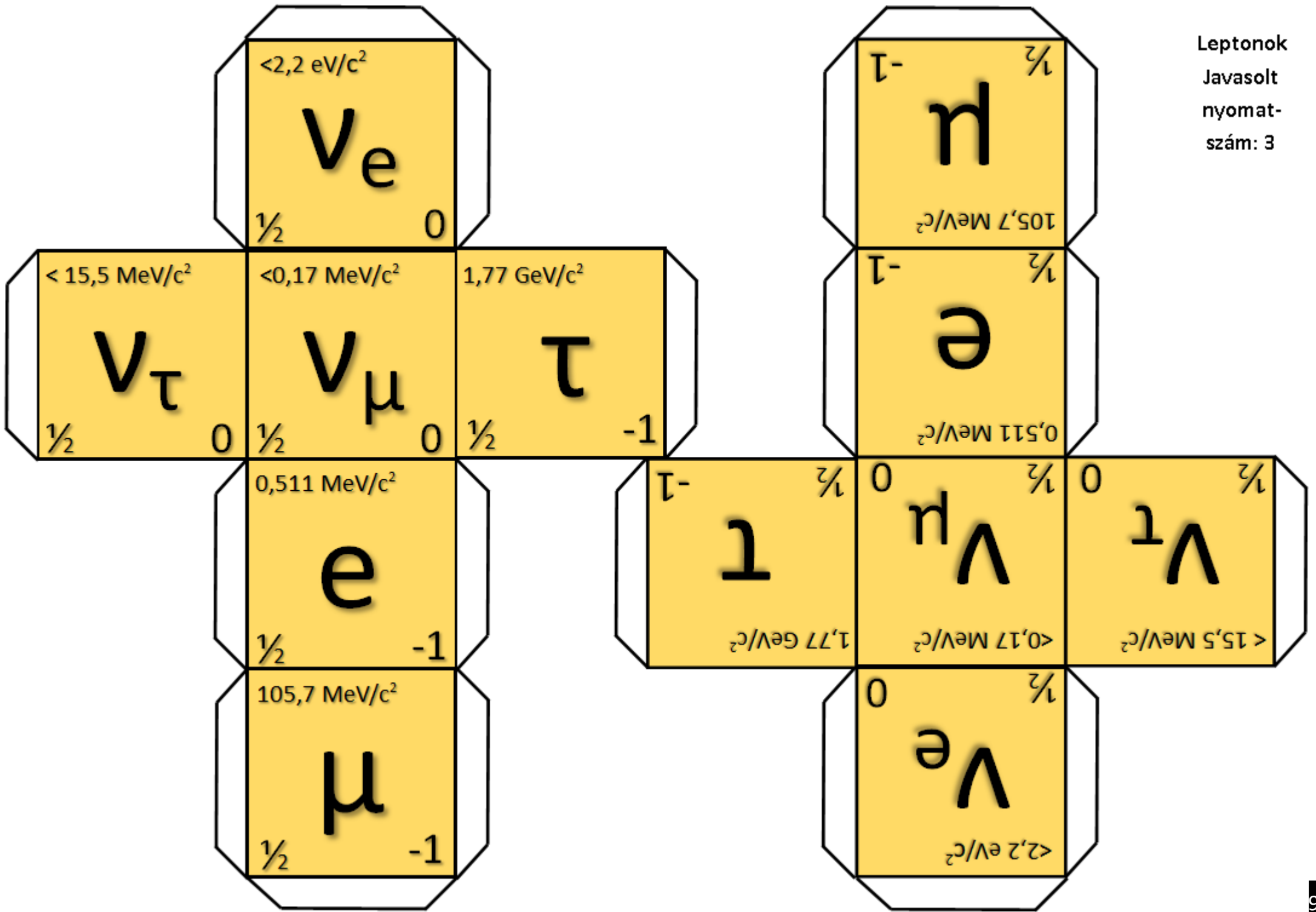
Anti-zöld színtöl-
tésű
anti-kvarkok
Javasolt nyomat-
szám: 3



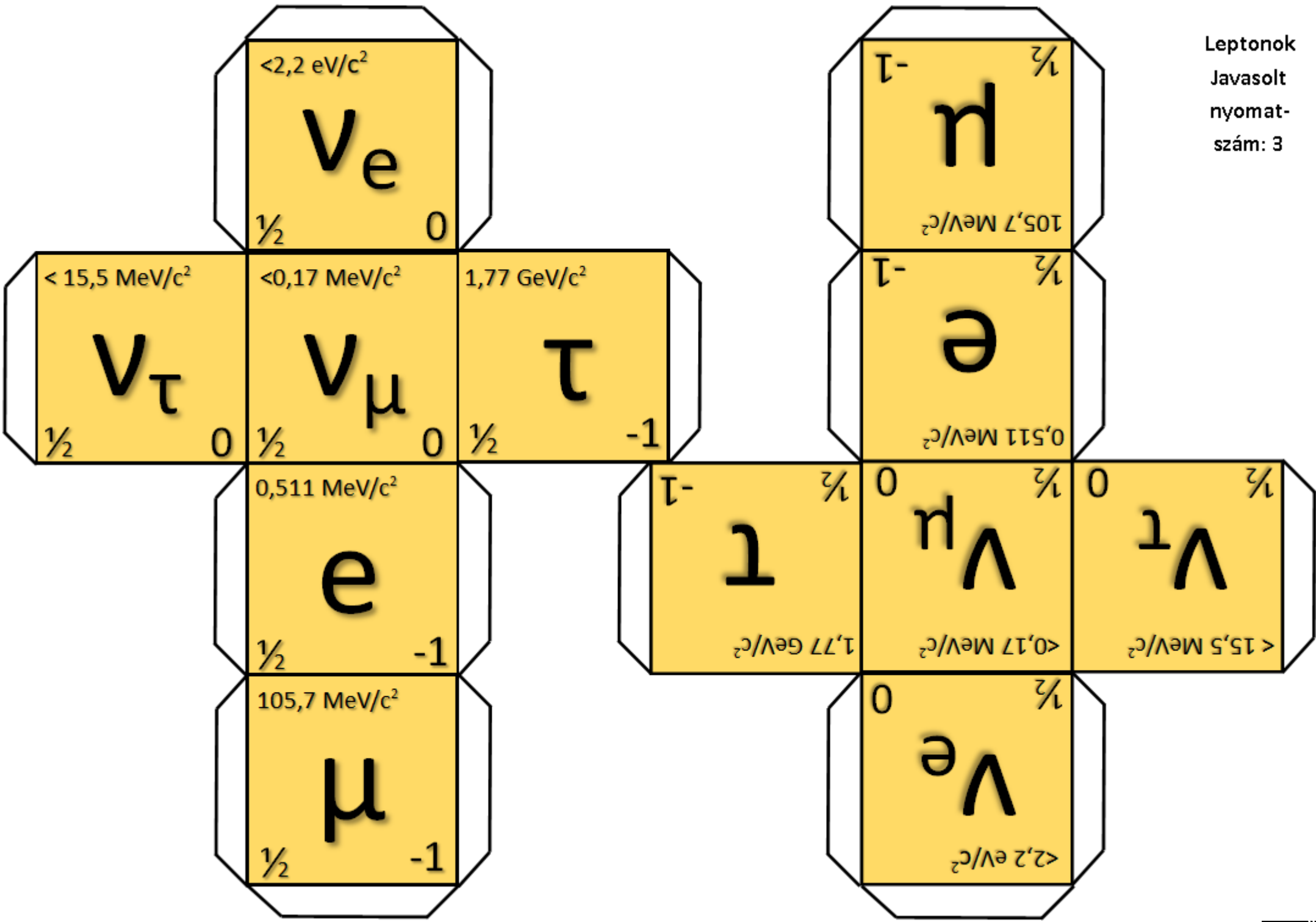
Anti-zöld
színtöltésű
anti-kvarkok
Javasolt nyo-
matszám: 3

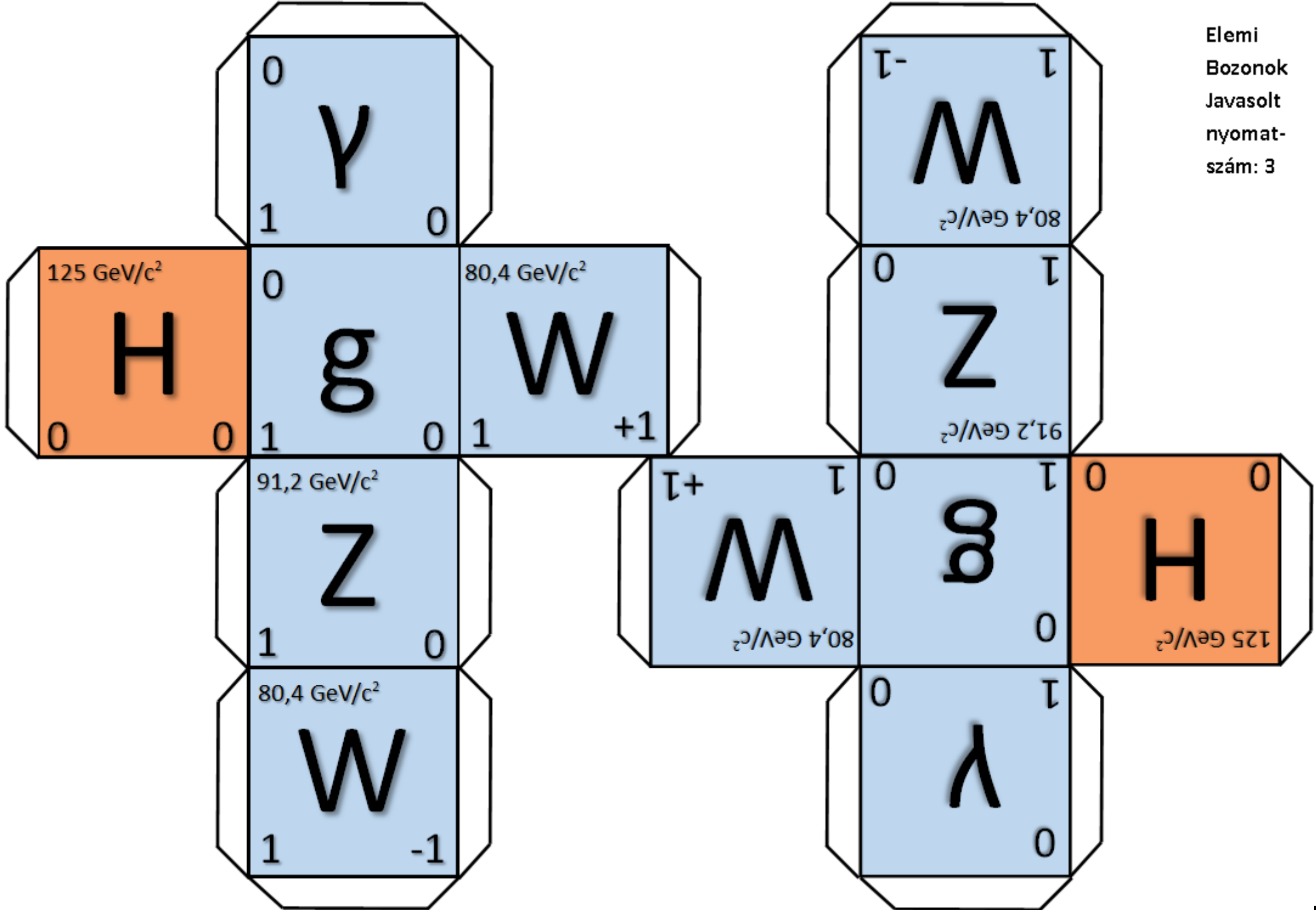


Leptonok
Javasolt
nyomat-
szám: 3

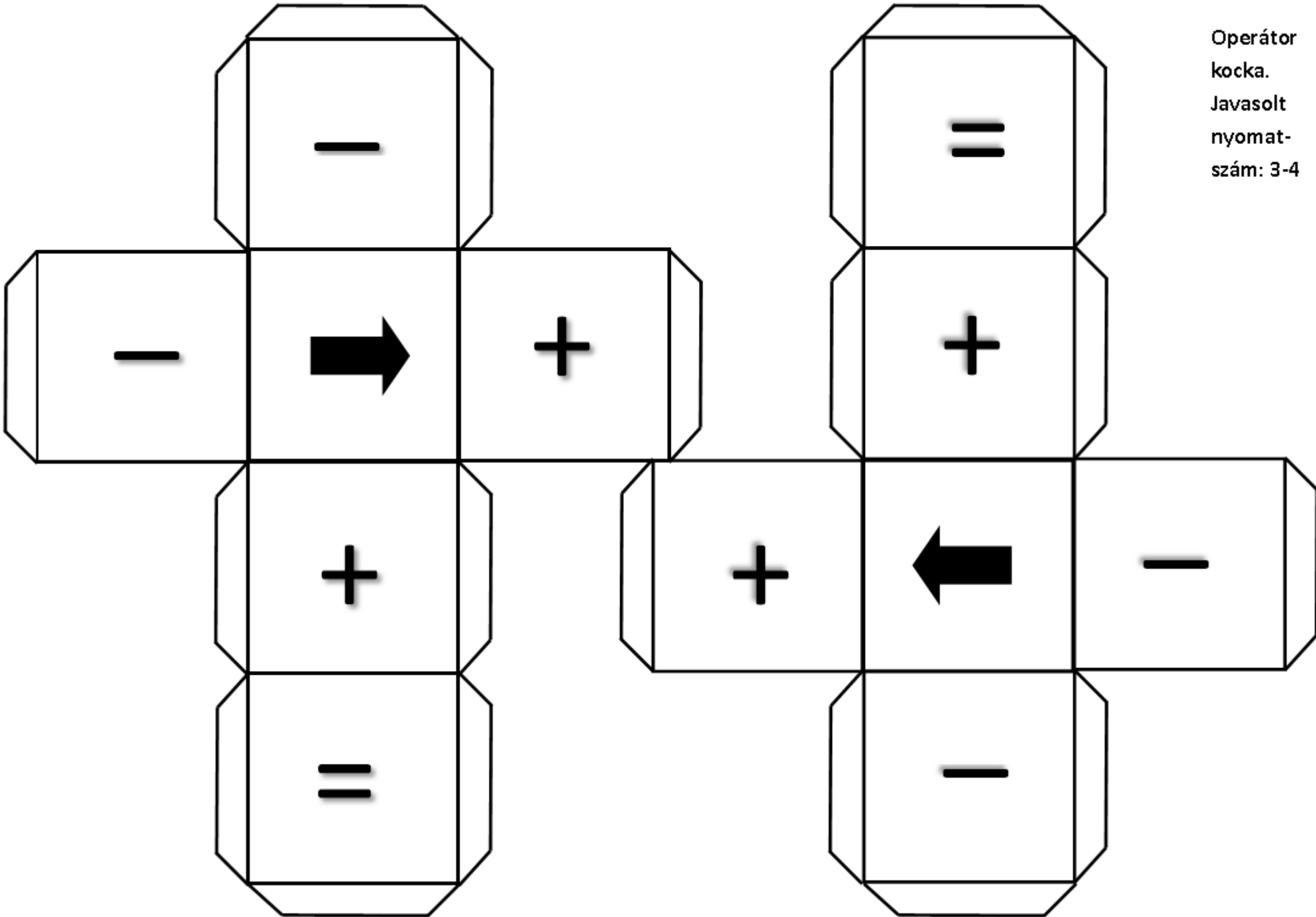


Leptonok
Javasolt
nyomat-
szám: 3

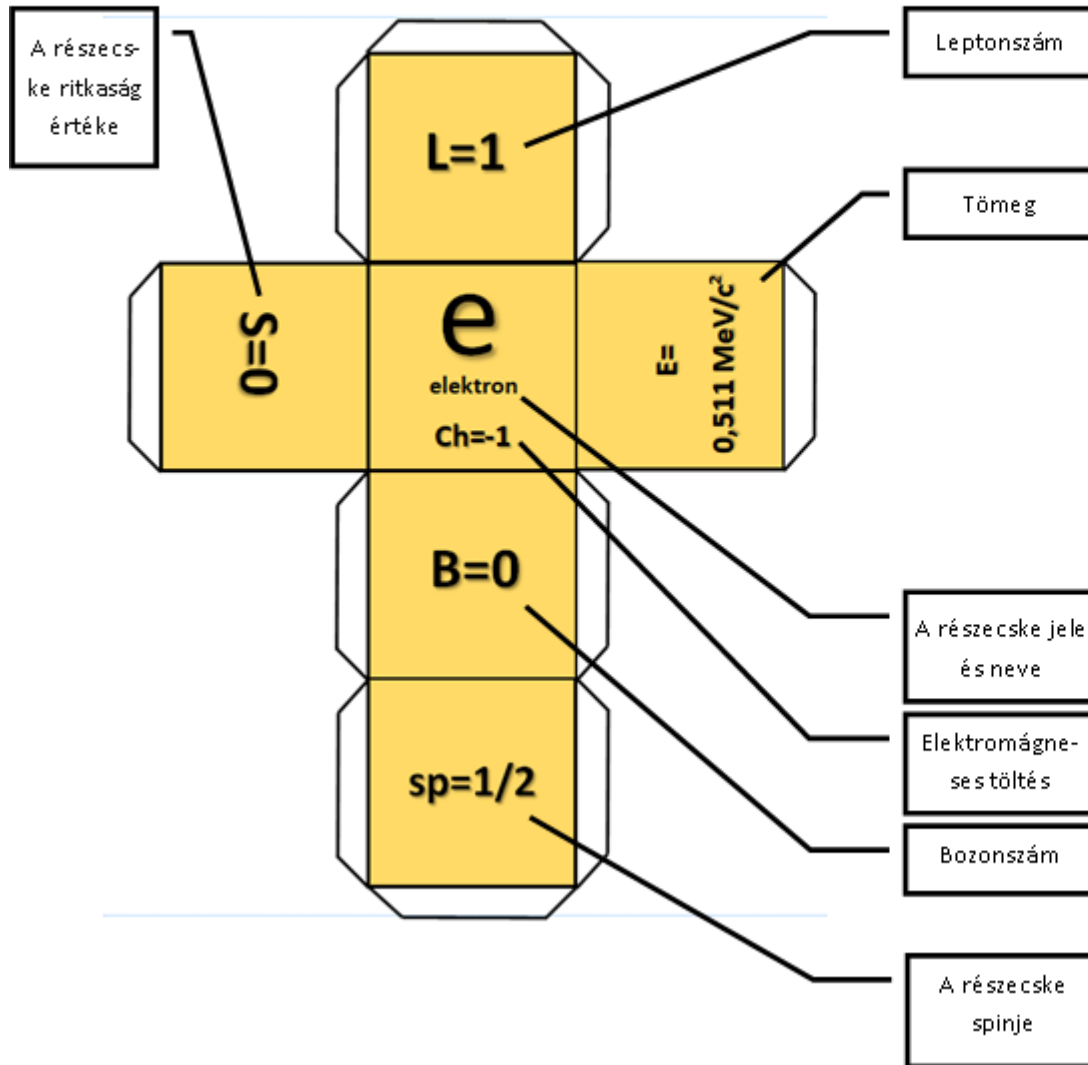




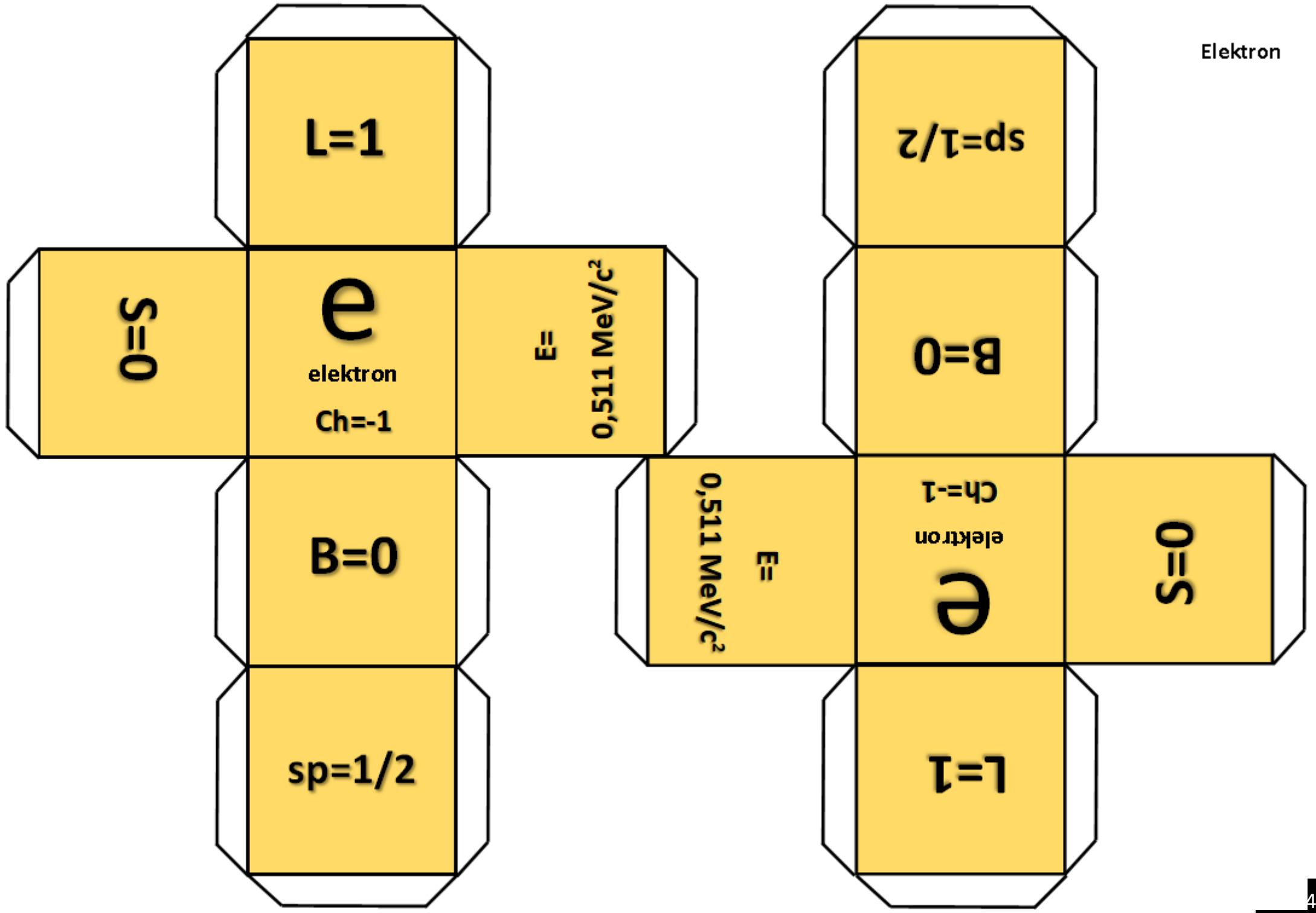
Operátor
kocka.
Javasolt
nyomat-
szám: 3-4

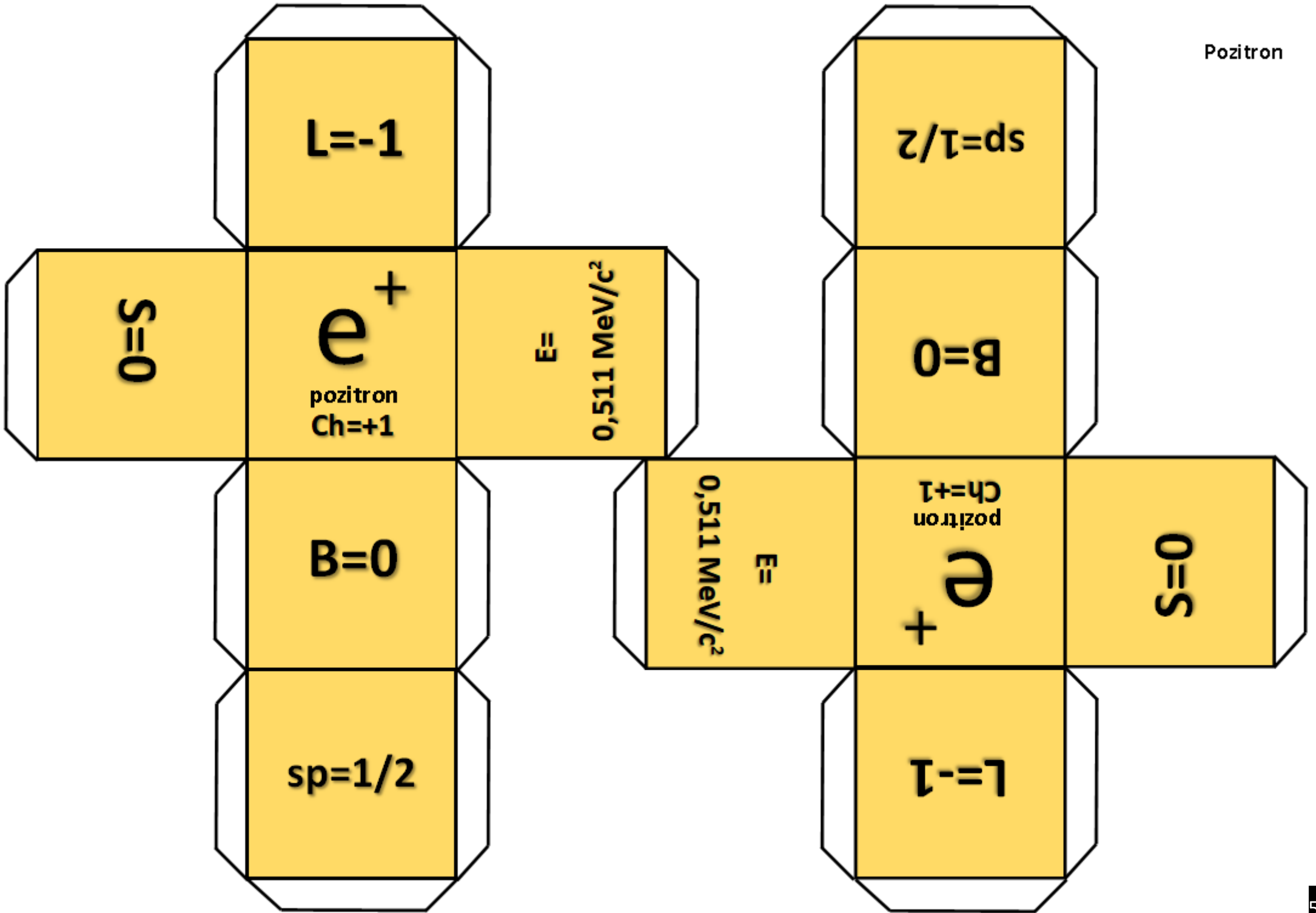


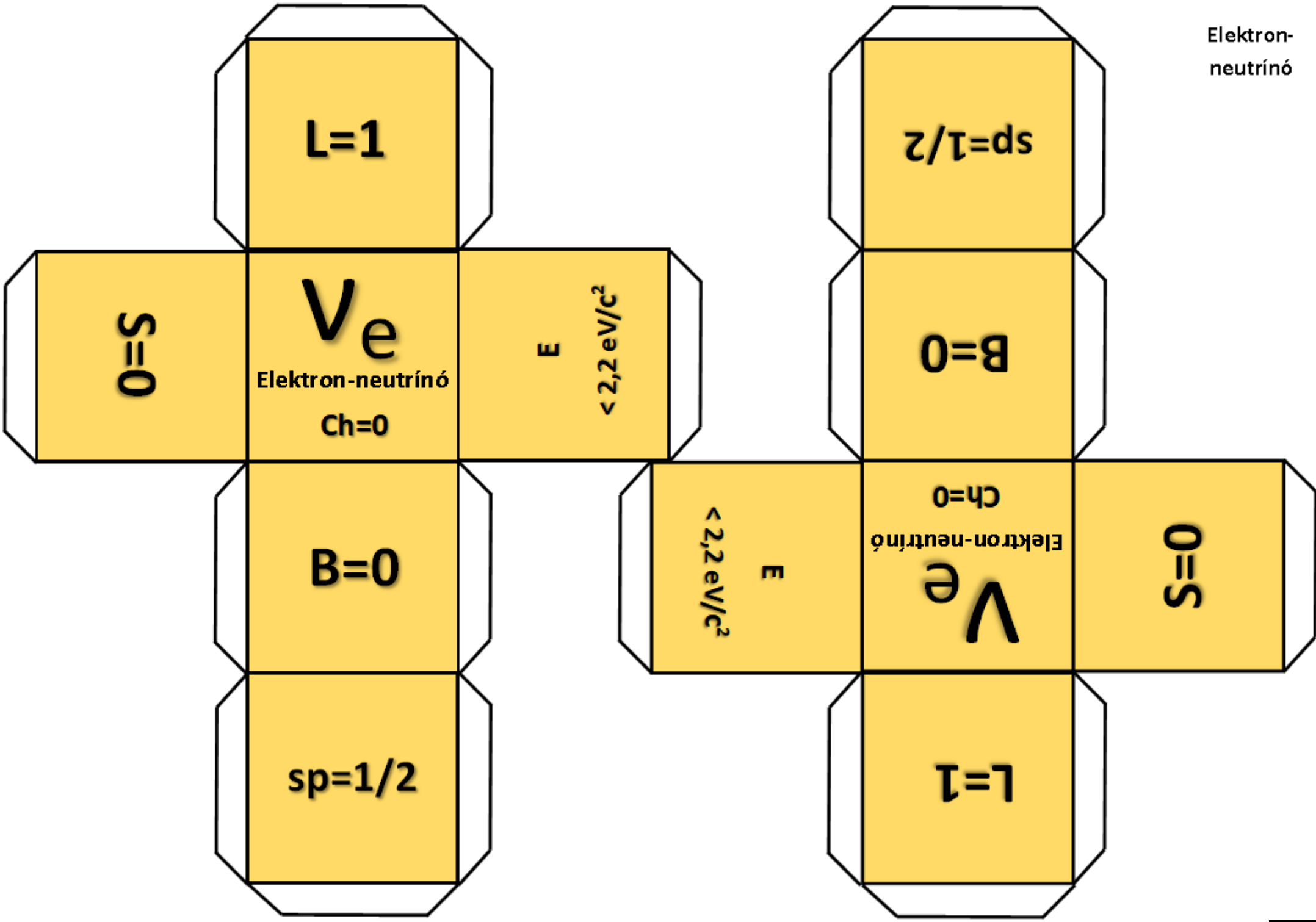
A kockatípus bemutatása

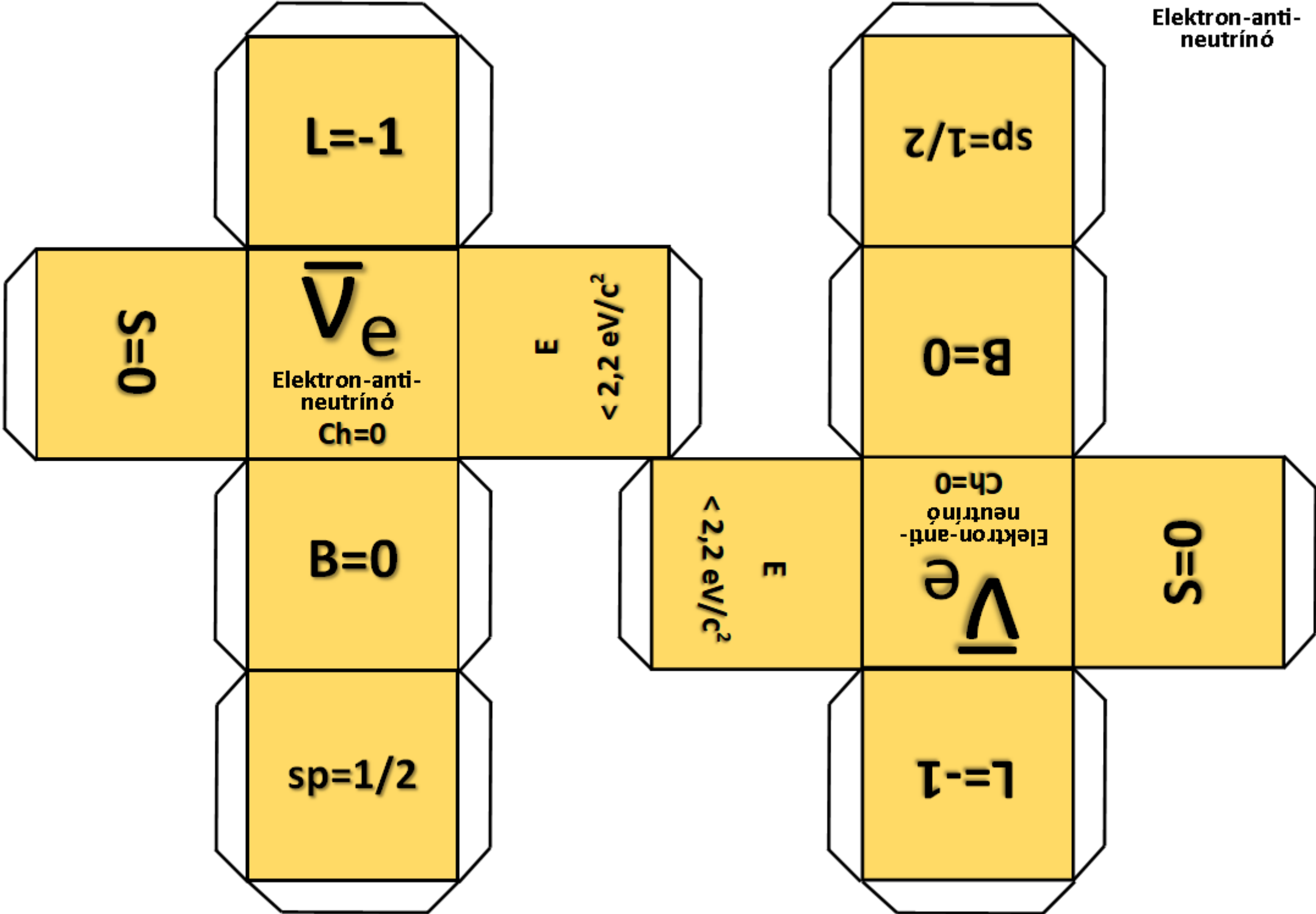


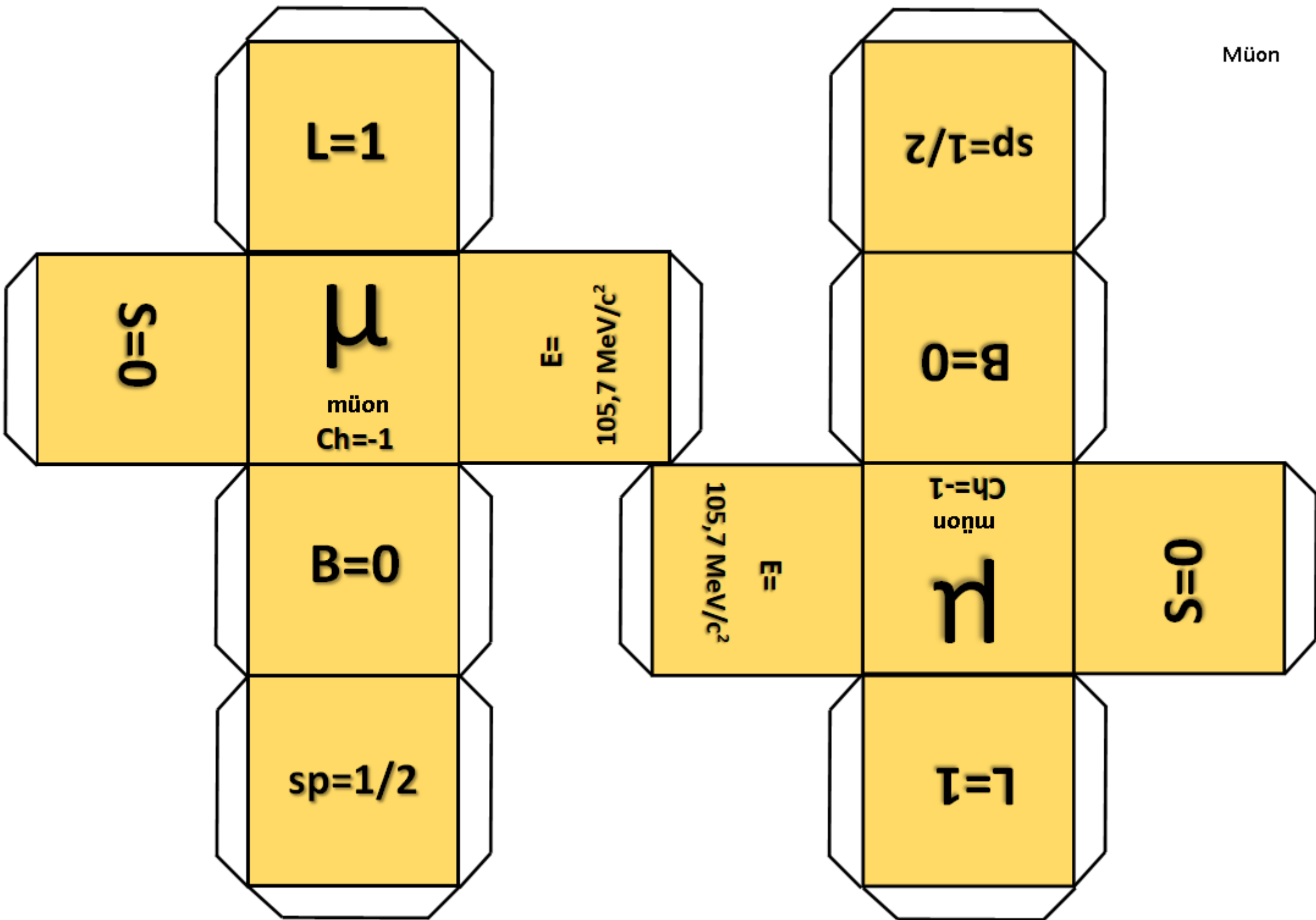
Ez a részecske-kocka típus egyetlen, elemi vagy összetett részecskét mutat be. A részecskekocka adott oldalán mindig egy-egy részecske tulajdonság jelenik meg a bal oldali ábrán látható módon.

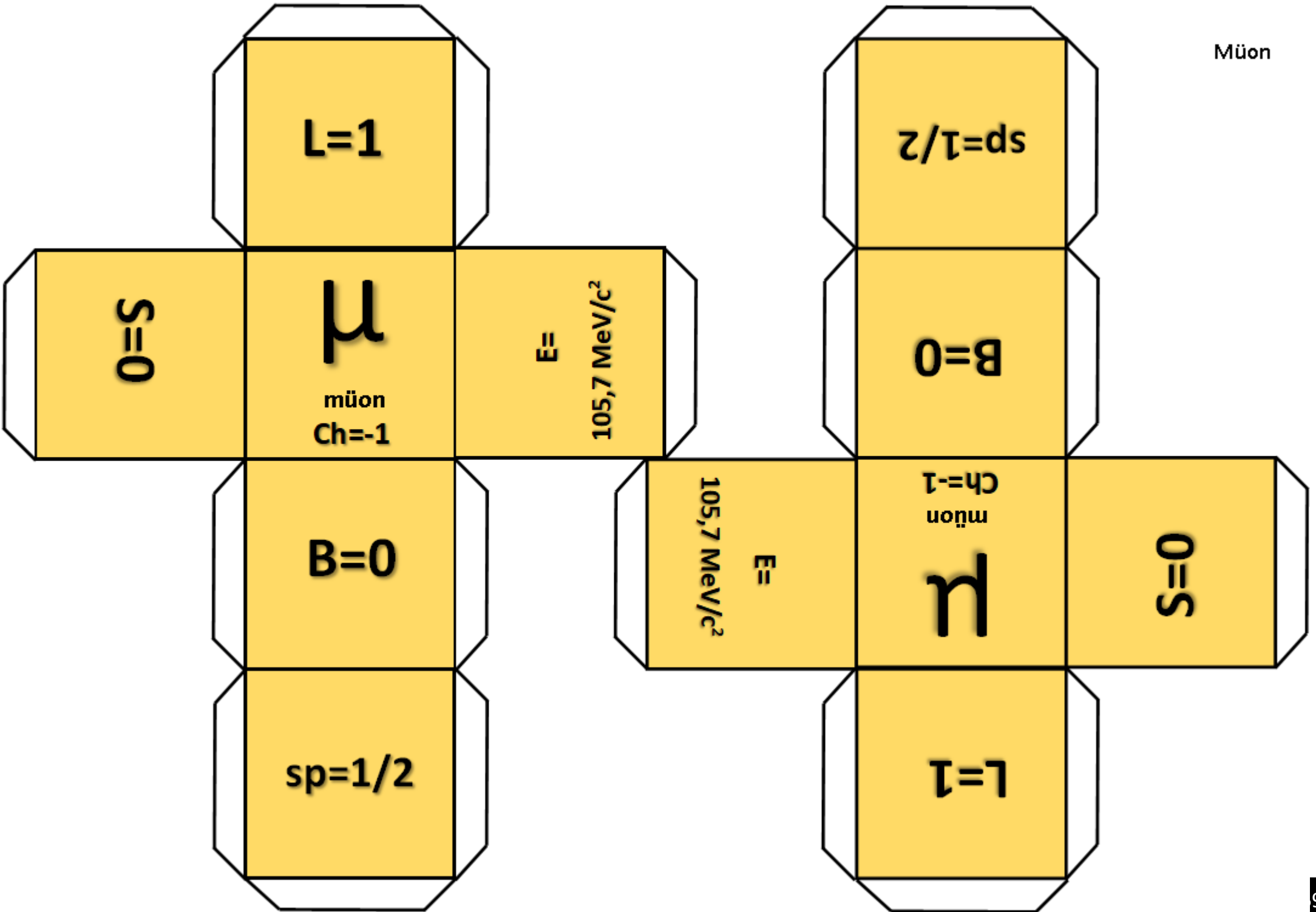




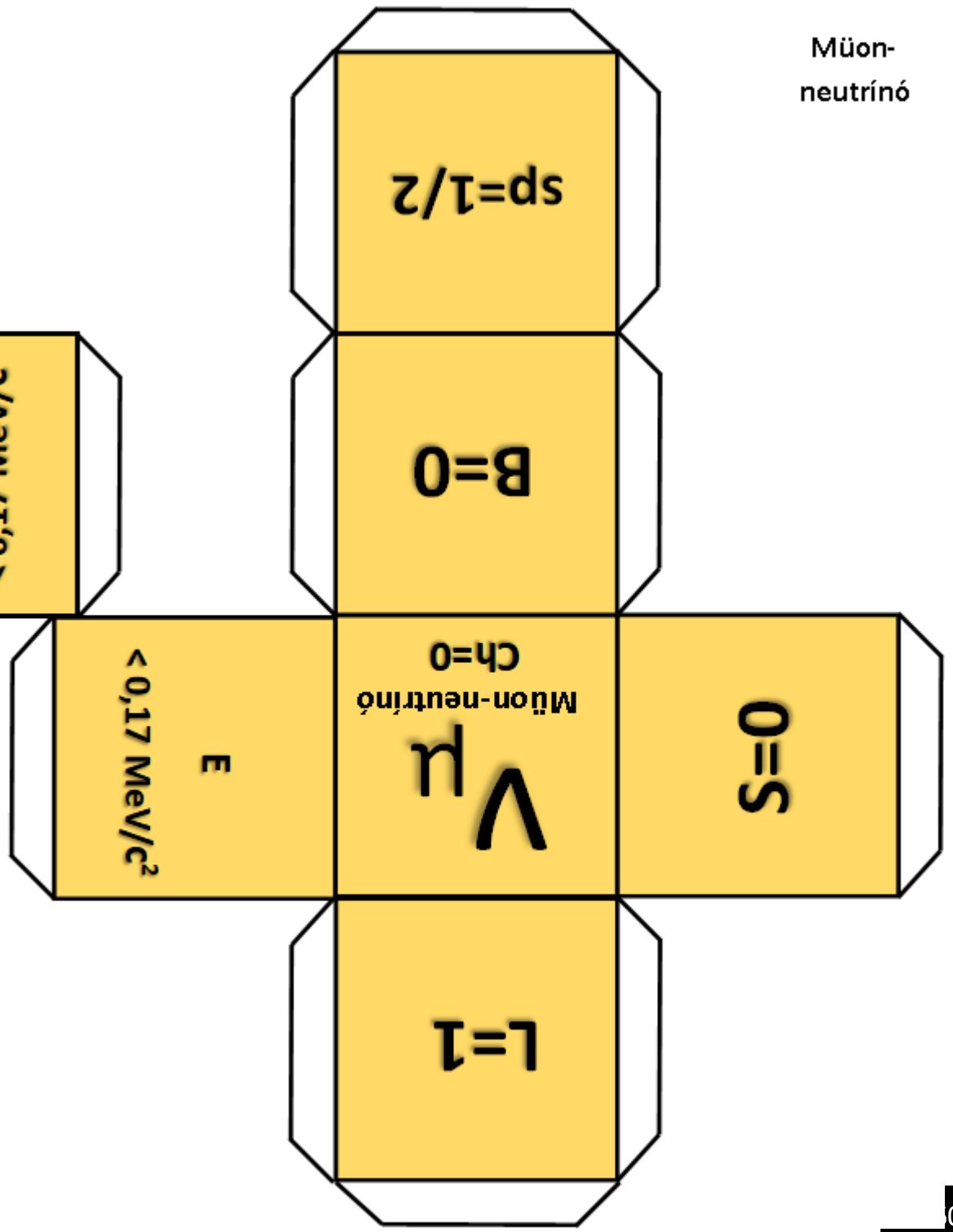
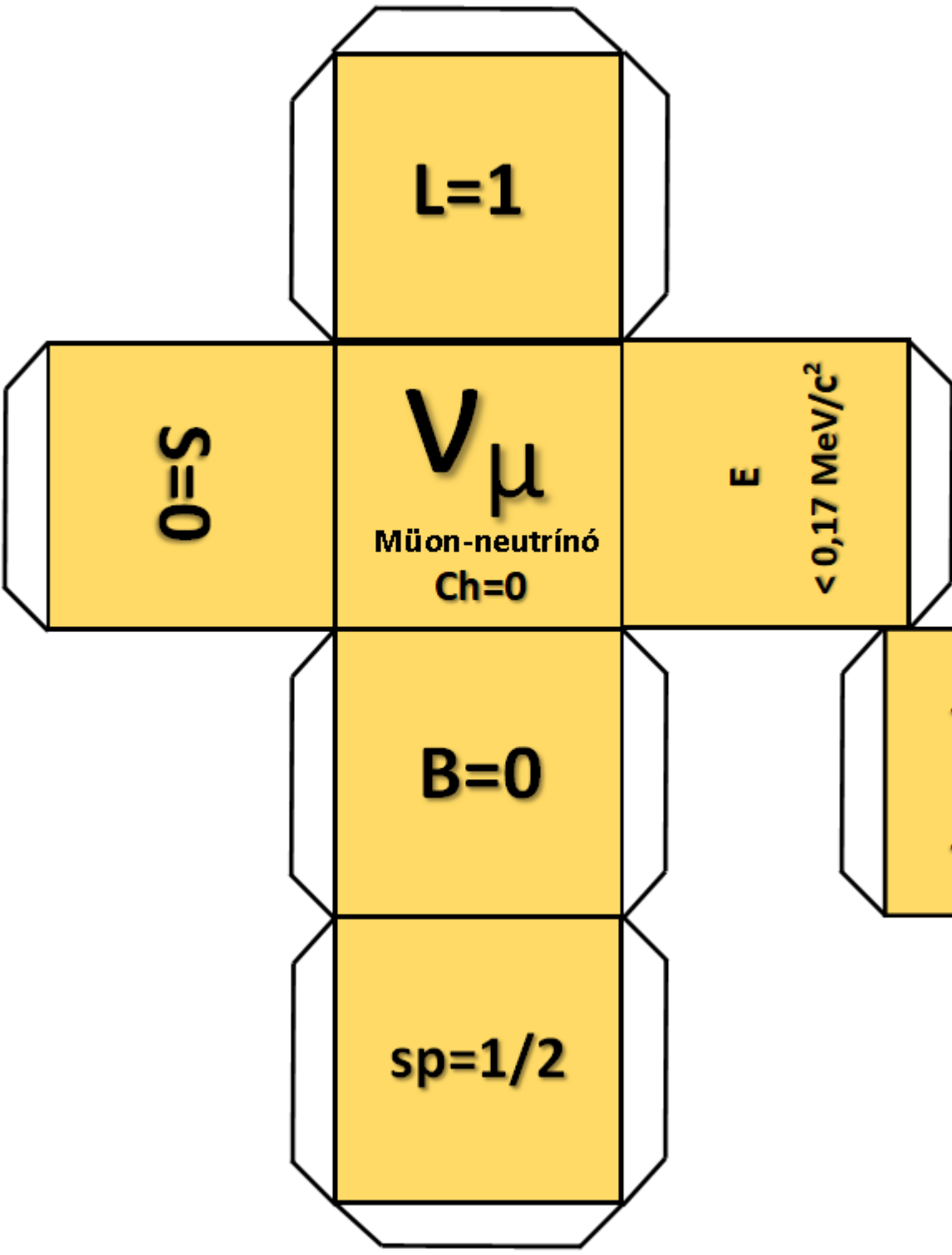




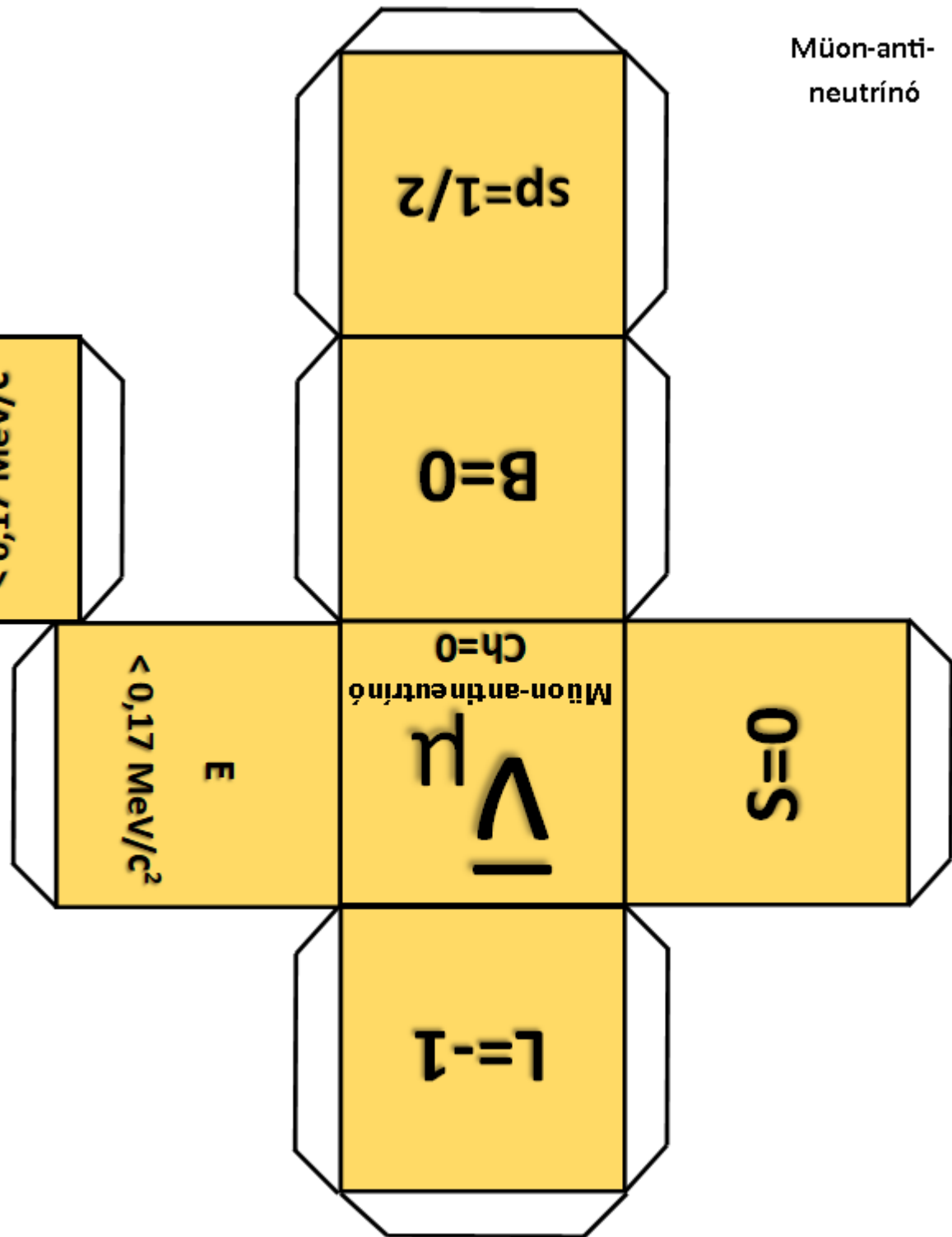
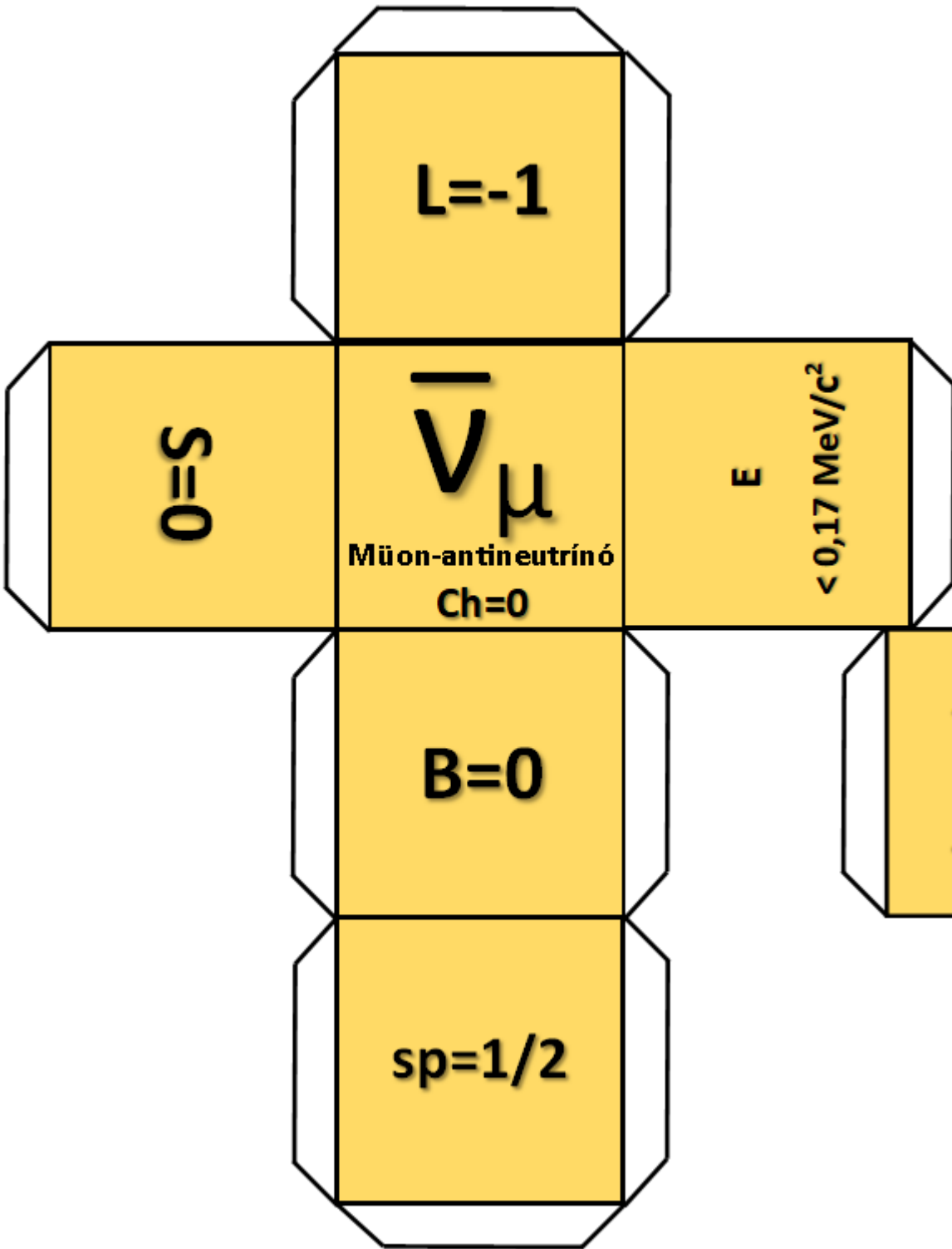


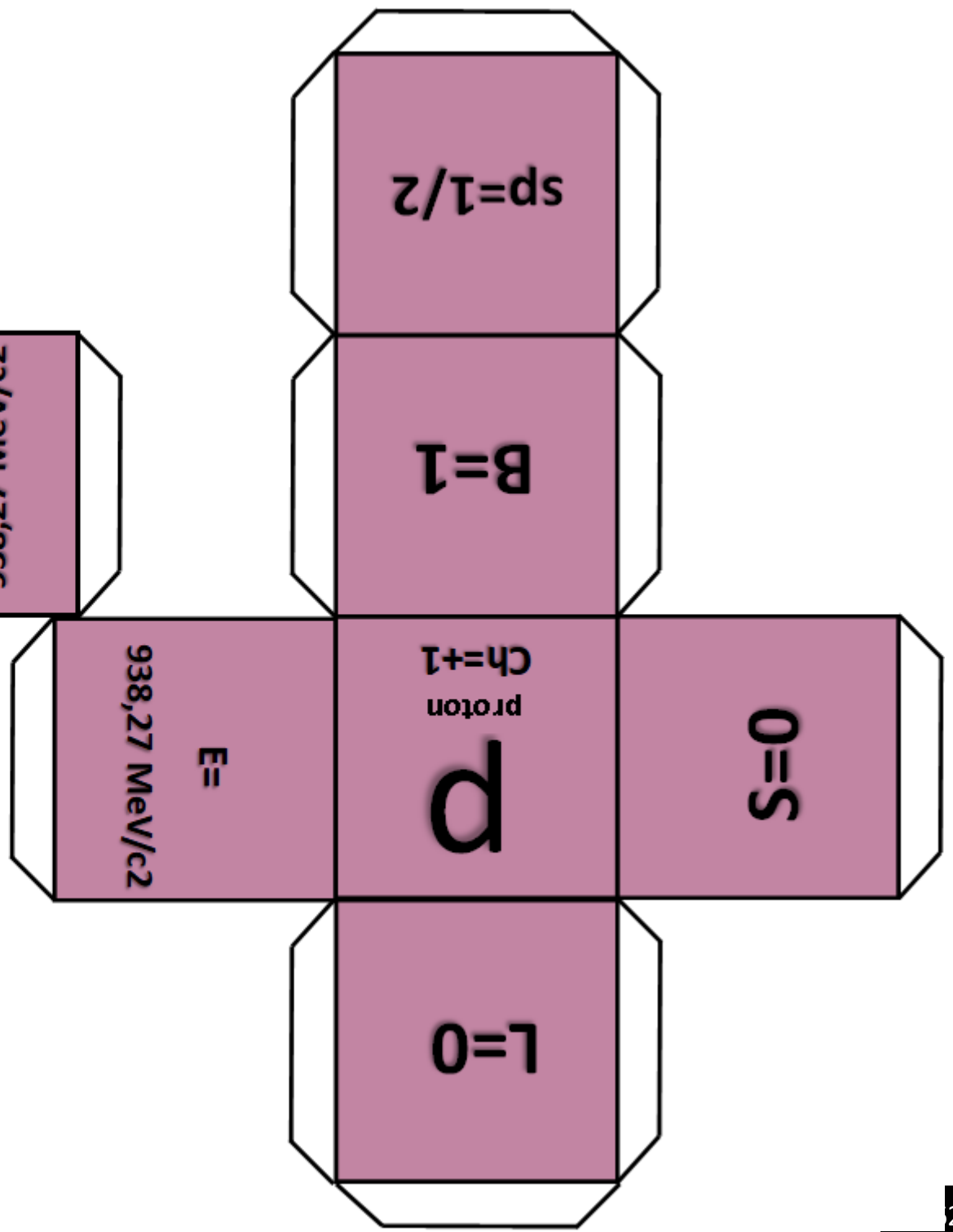
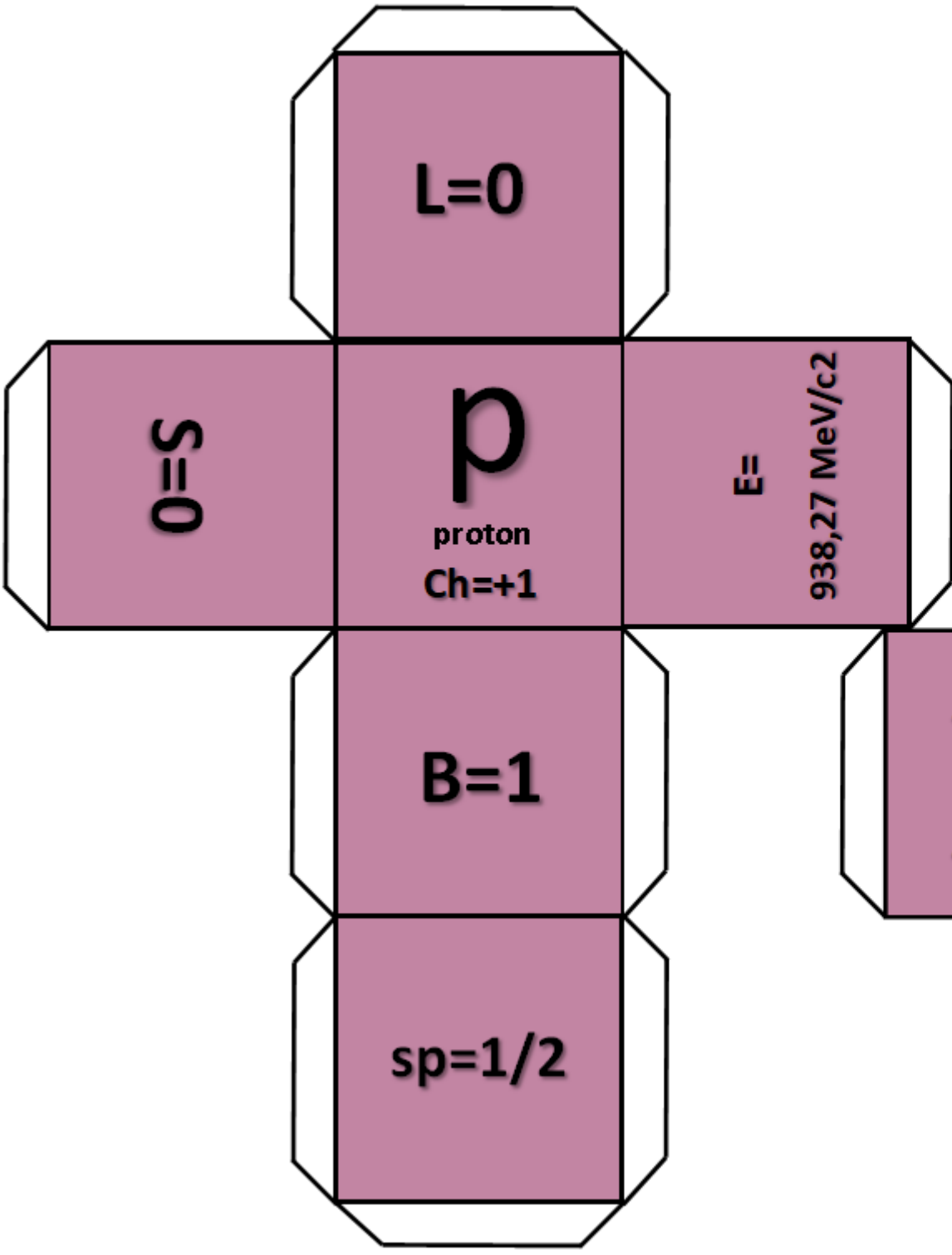


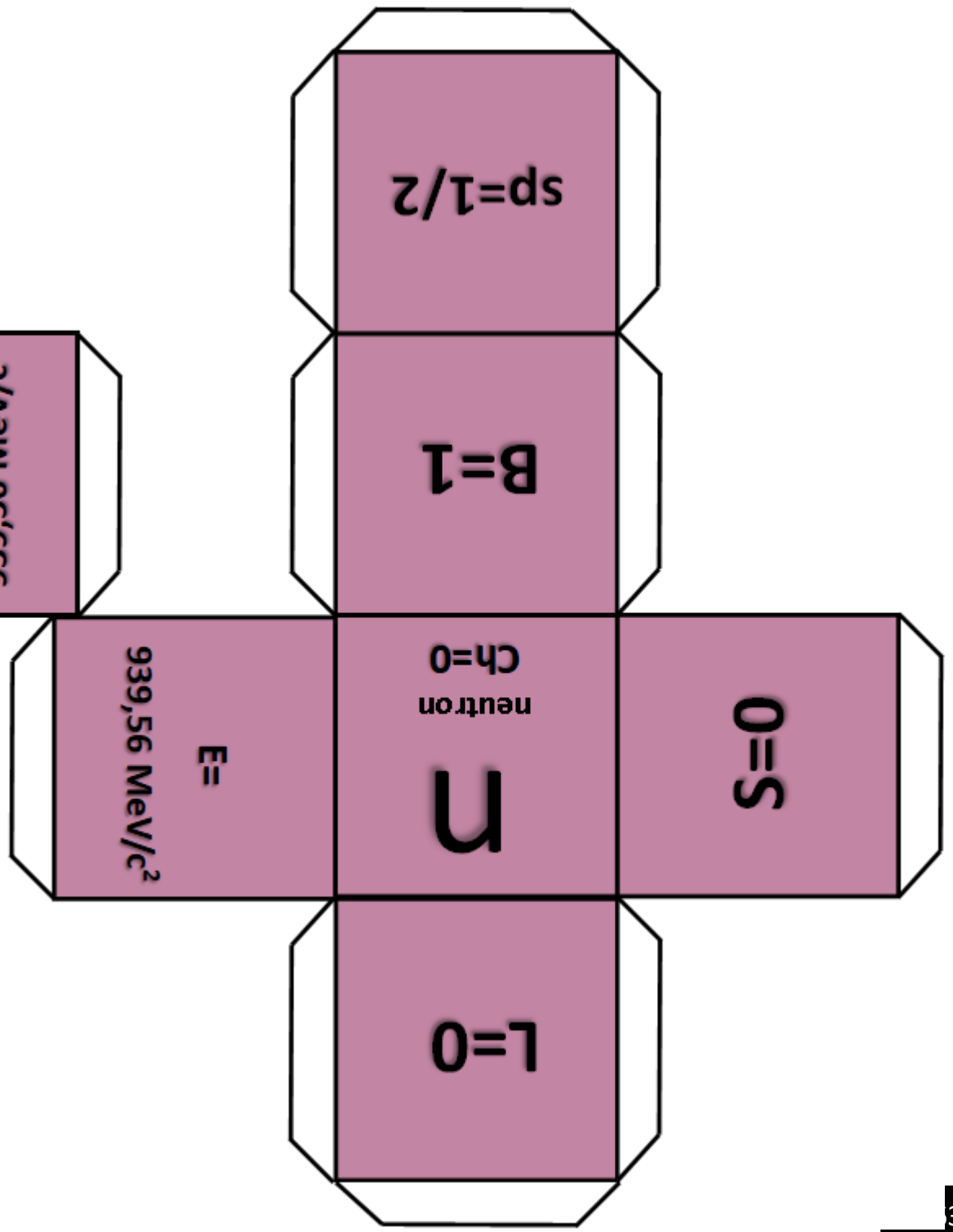
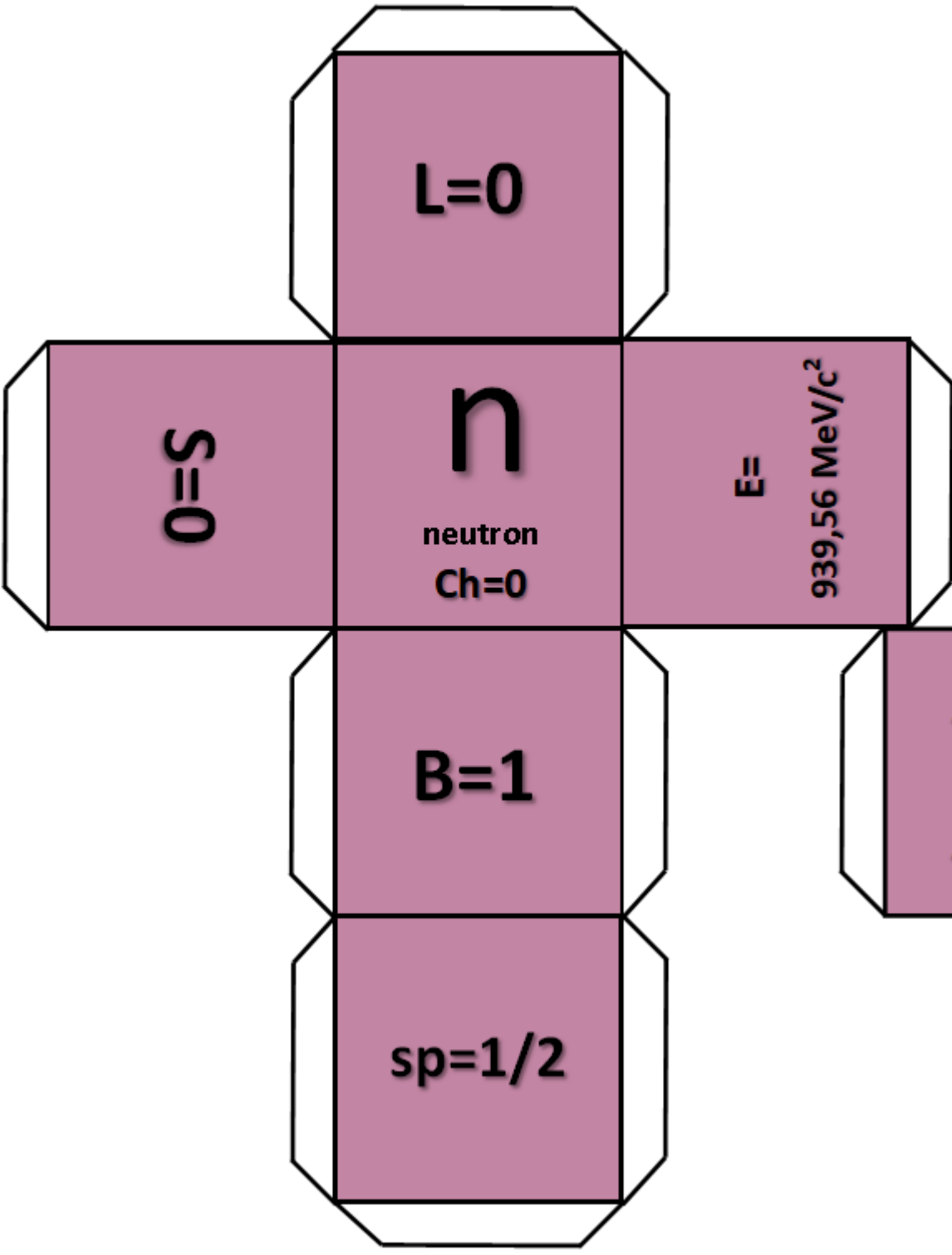
Müon-
neutrínó

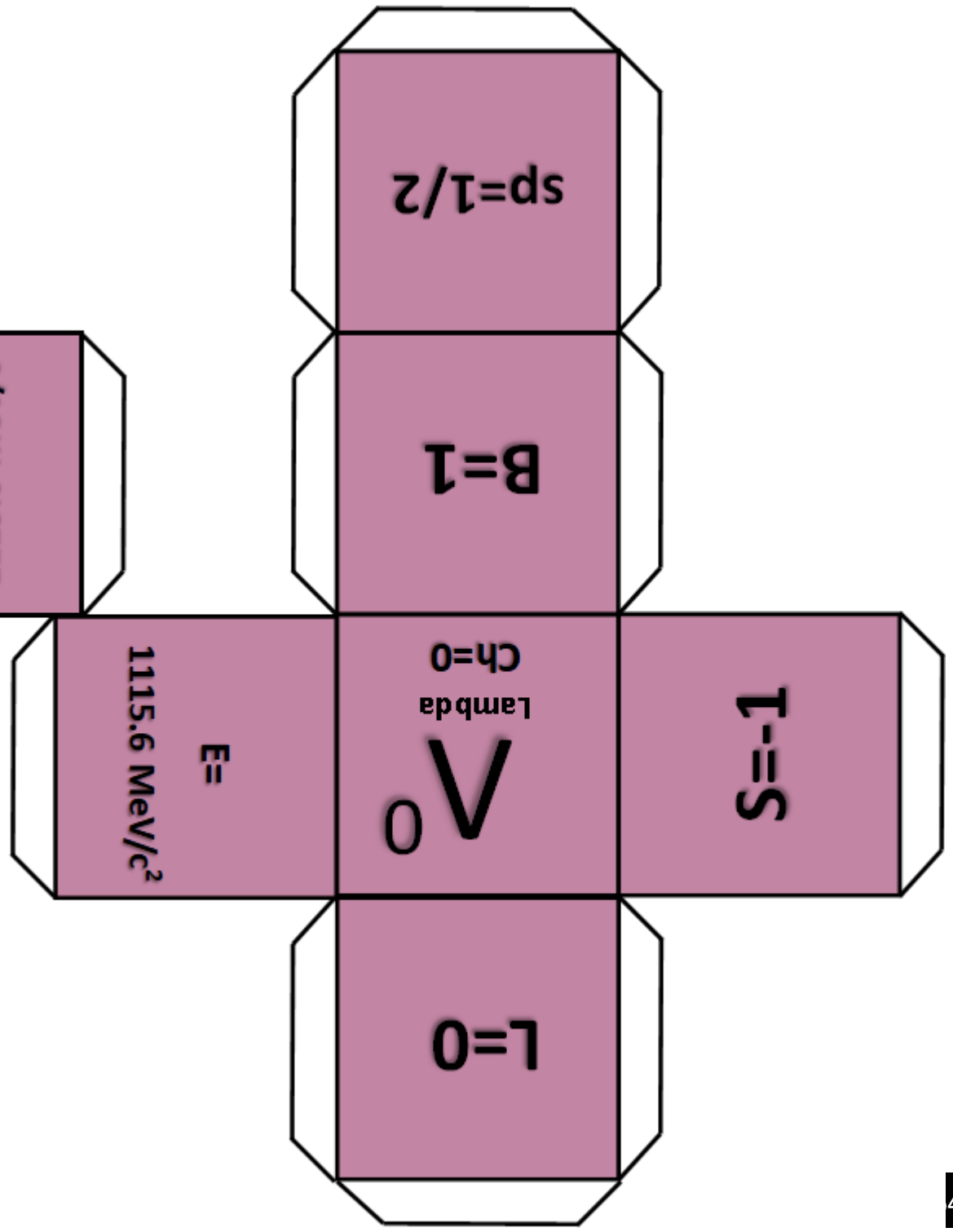
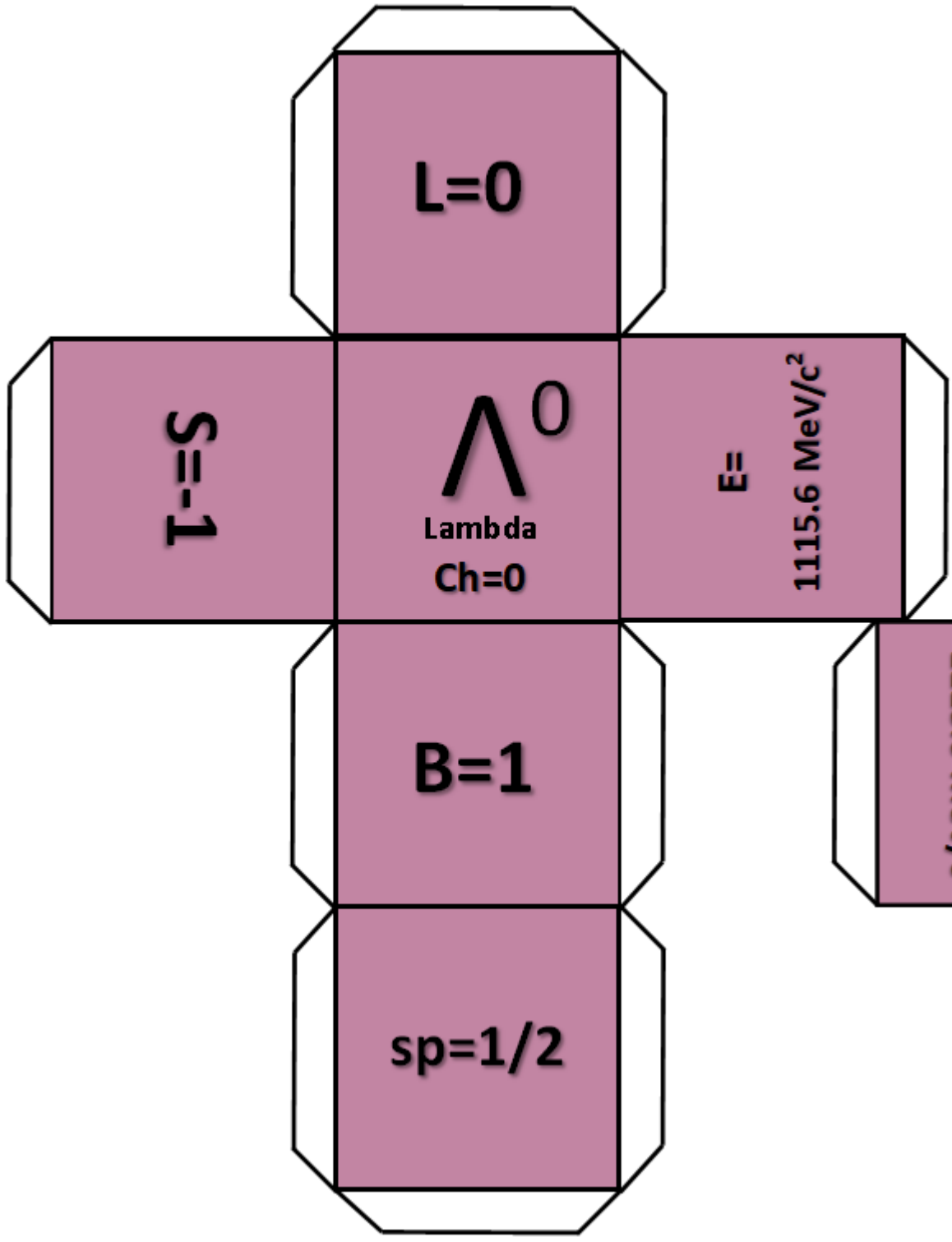


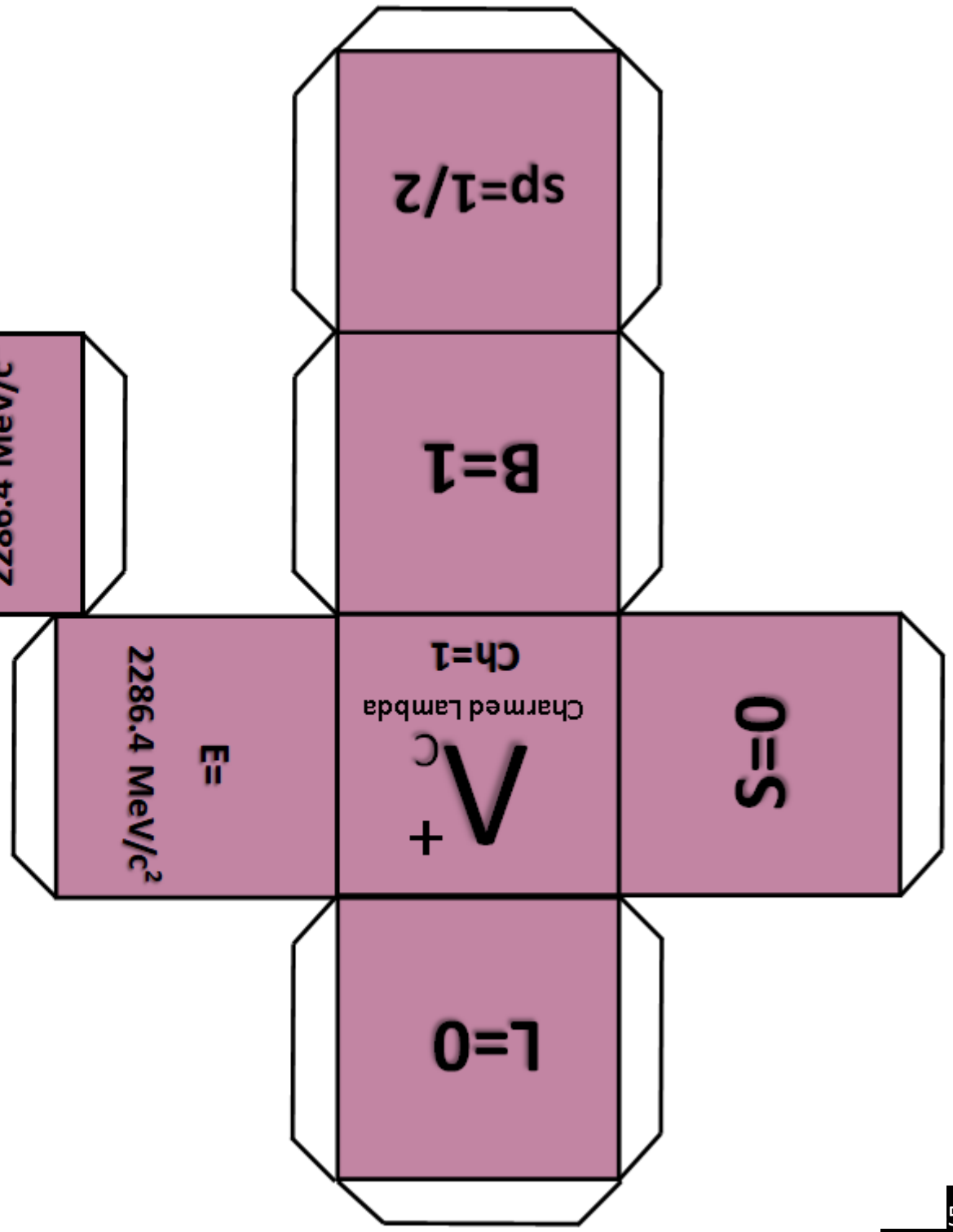
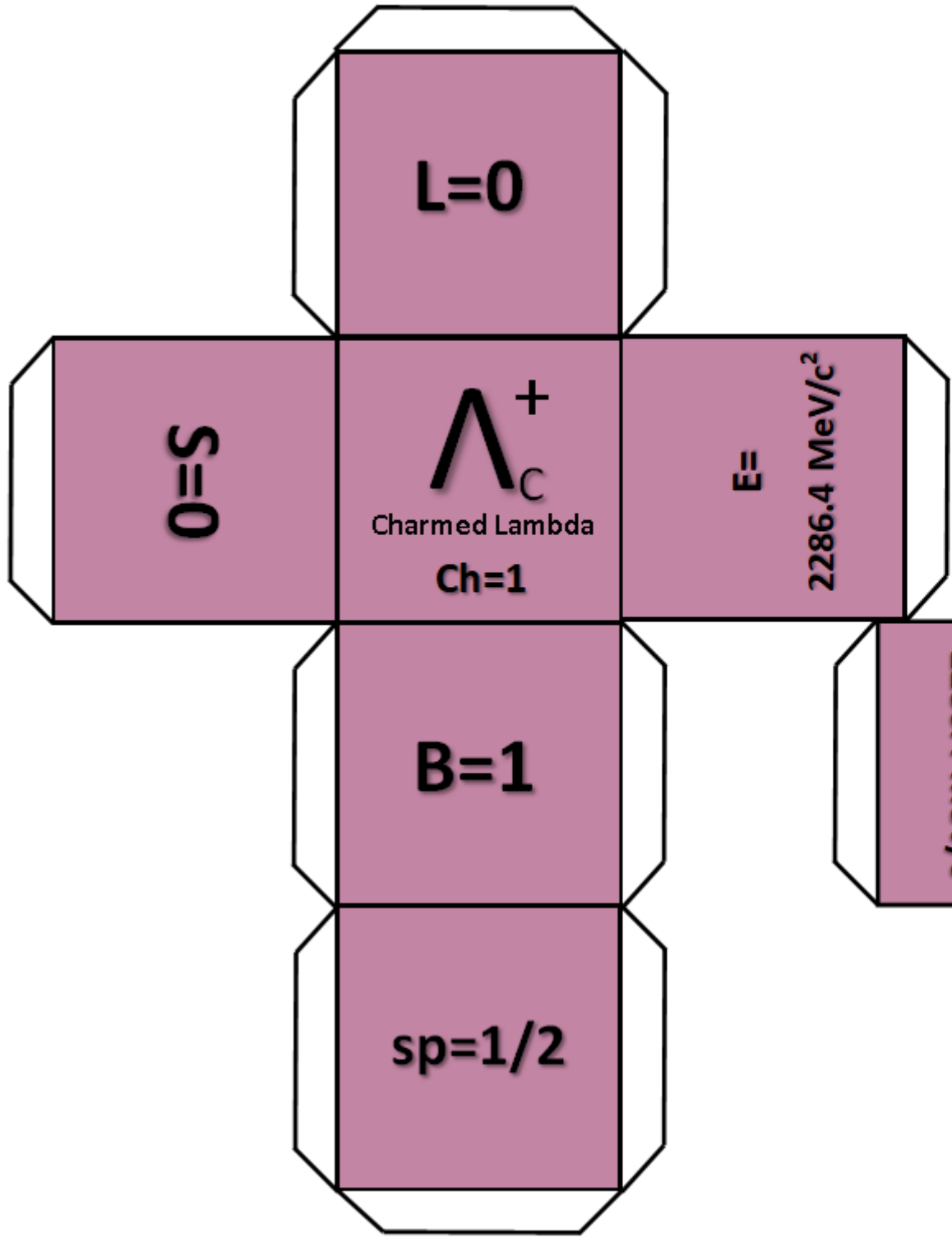
Müon-anti-
neutrínó

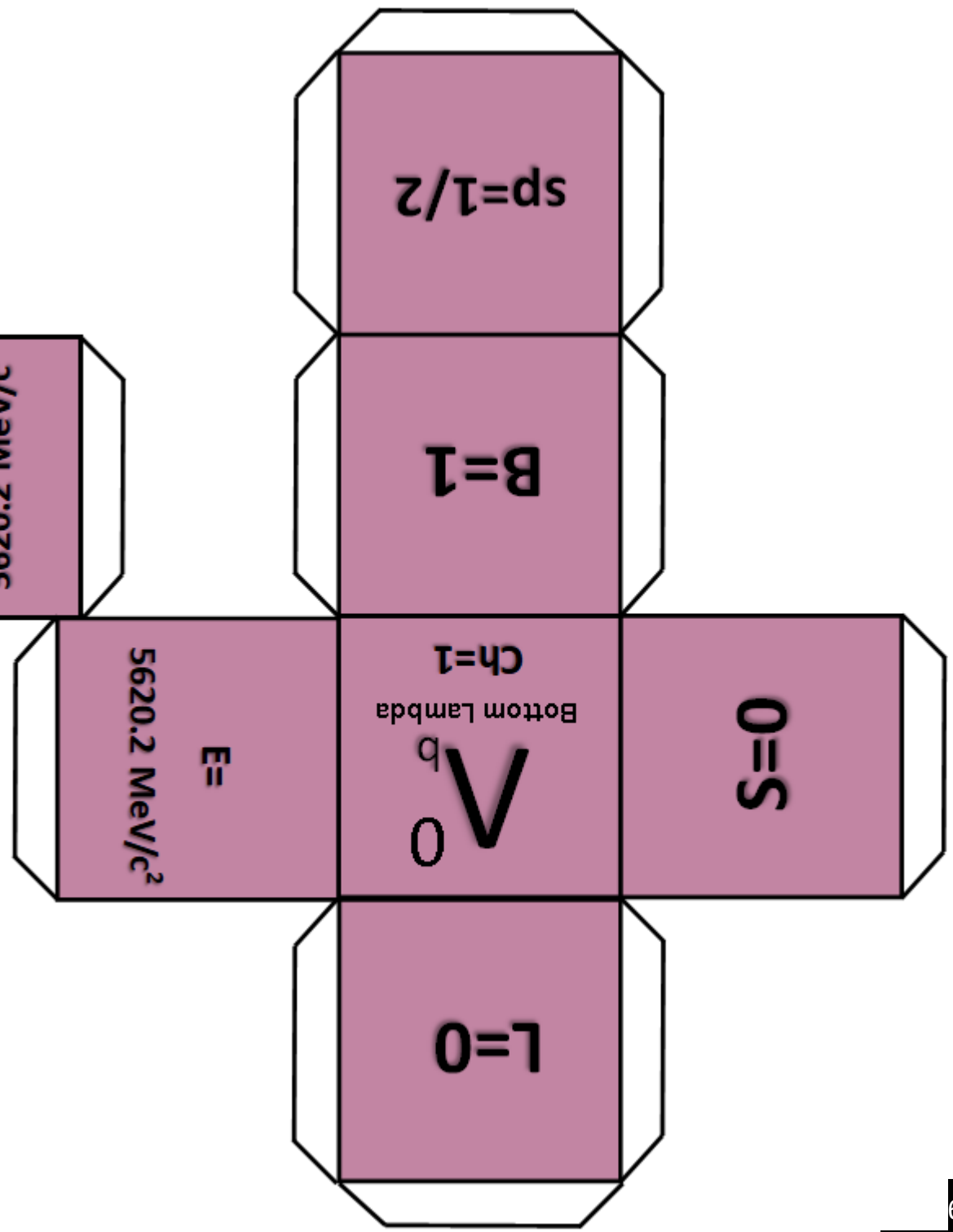
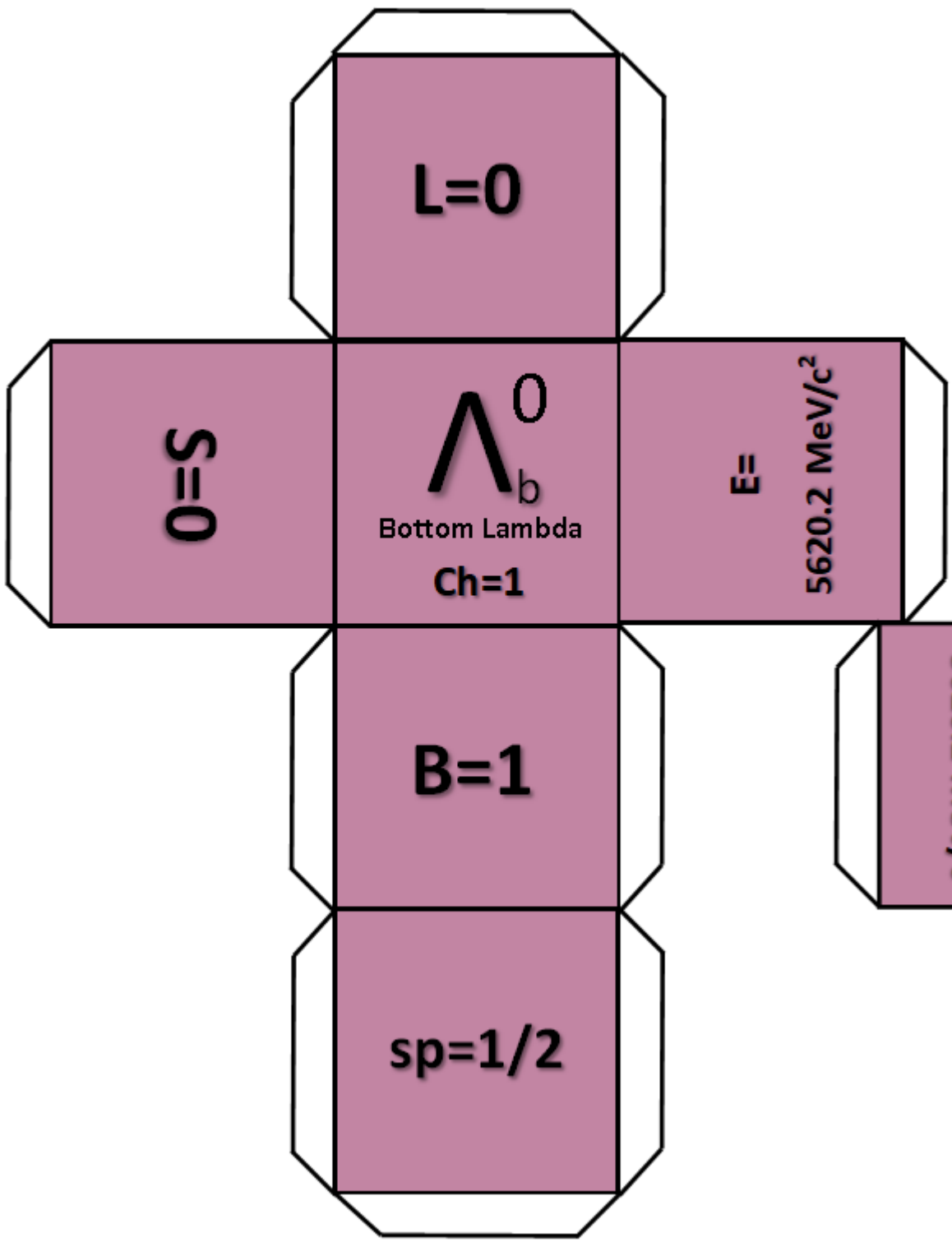


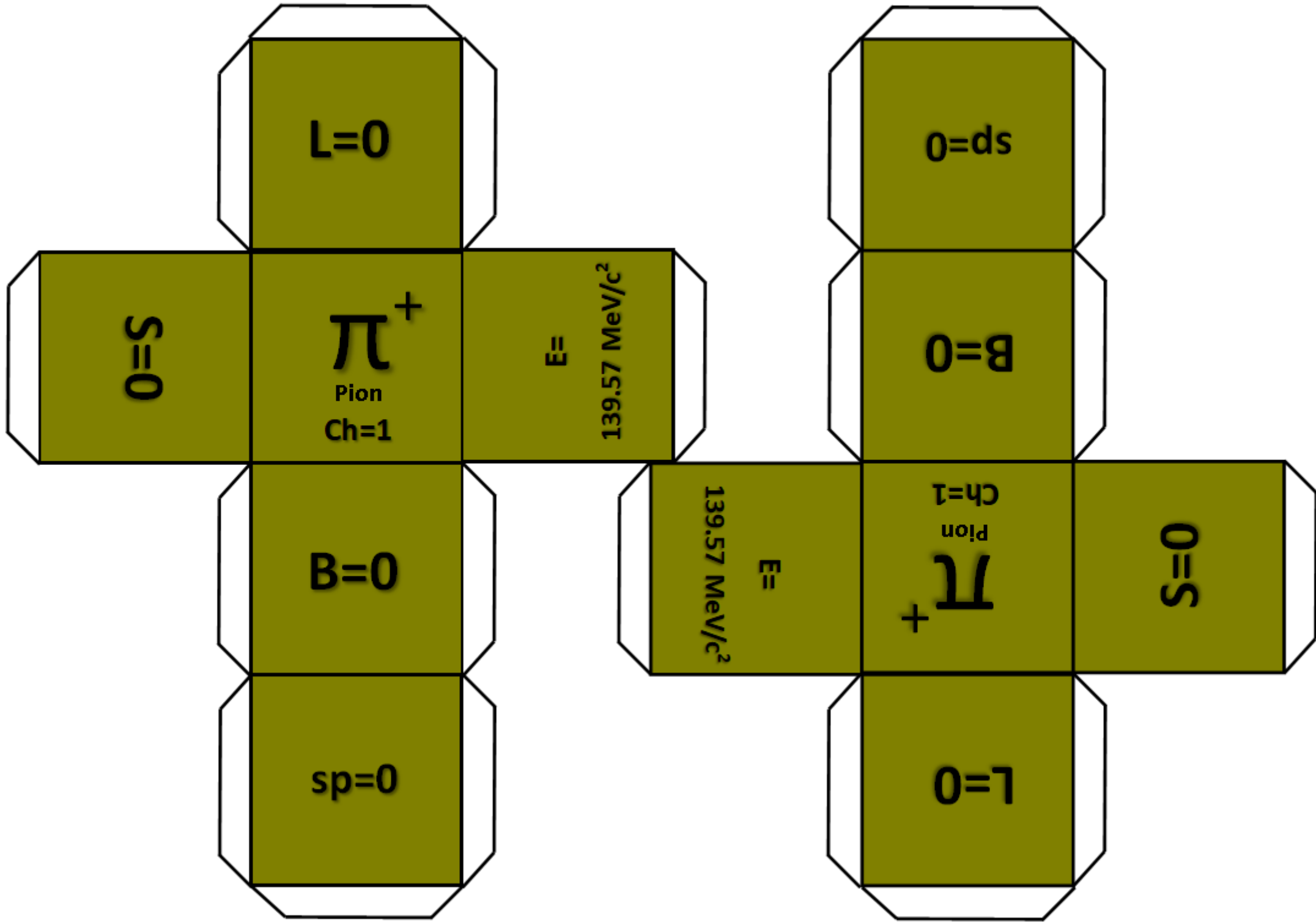


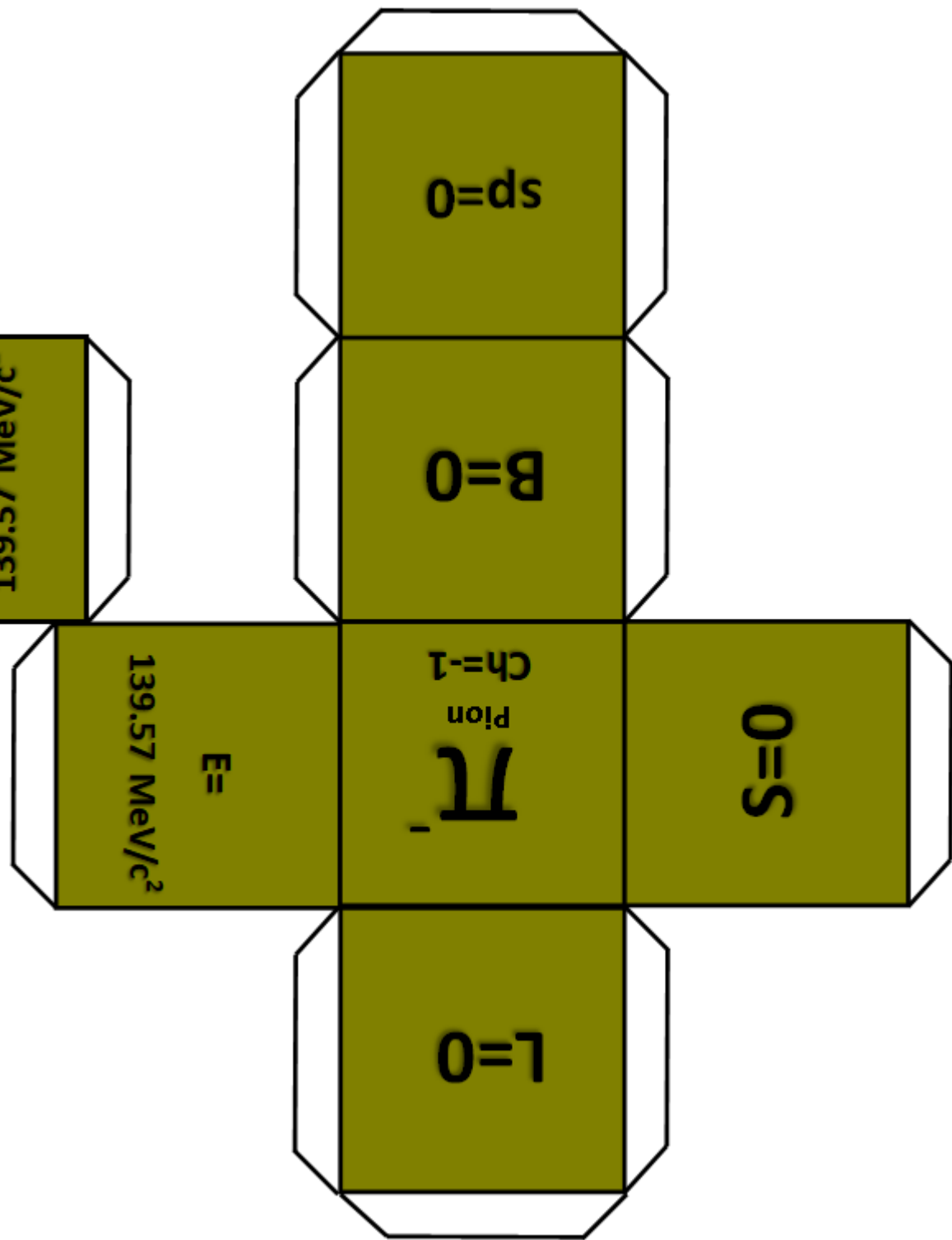
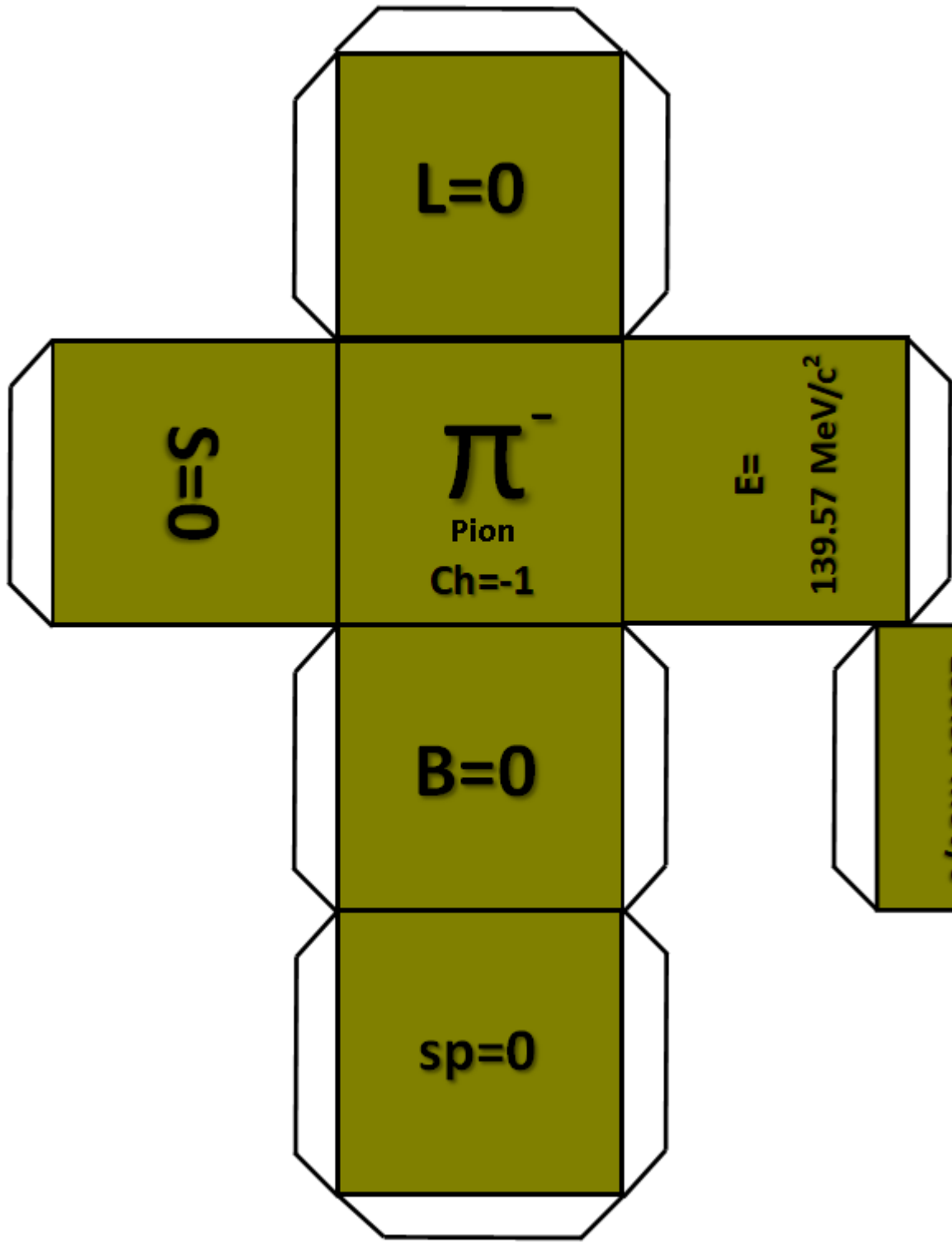


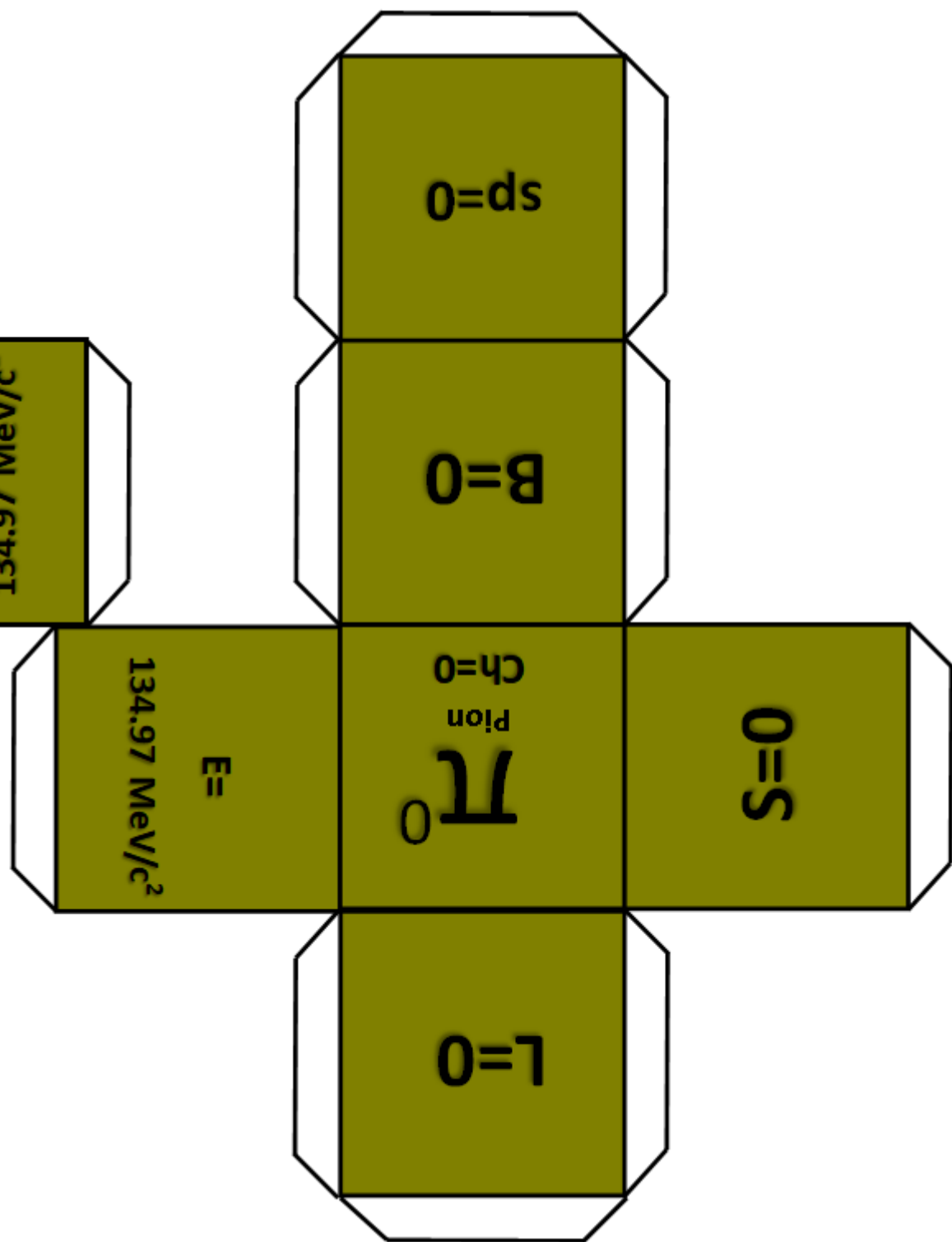
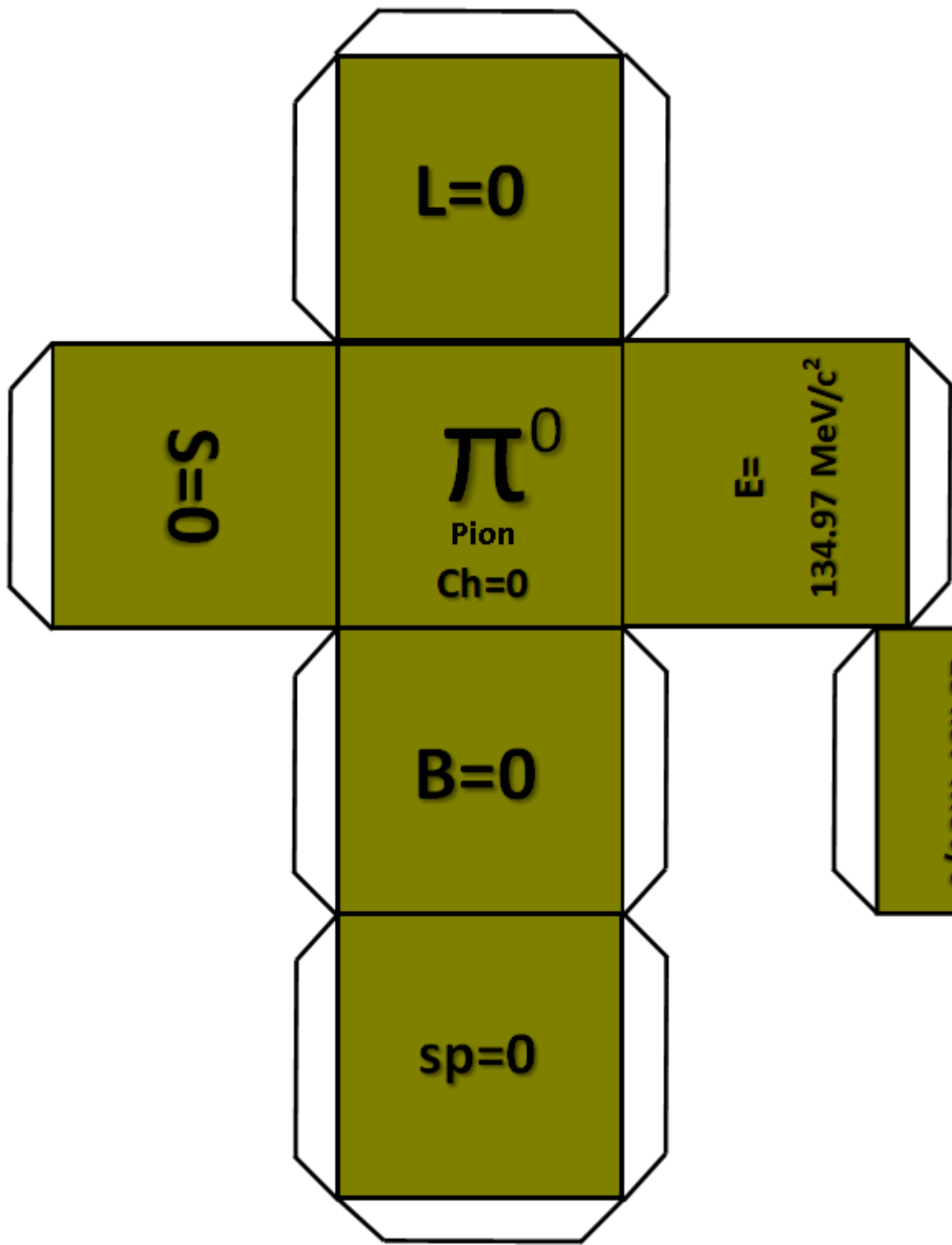


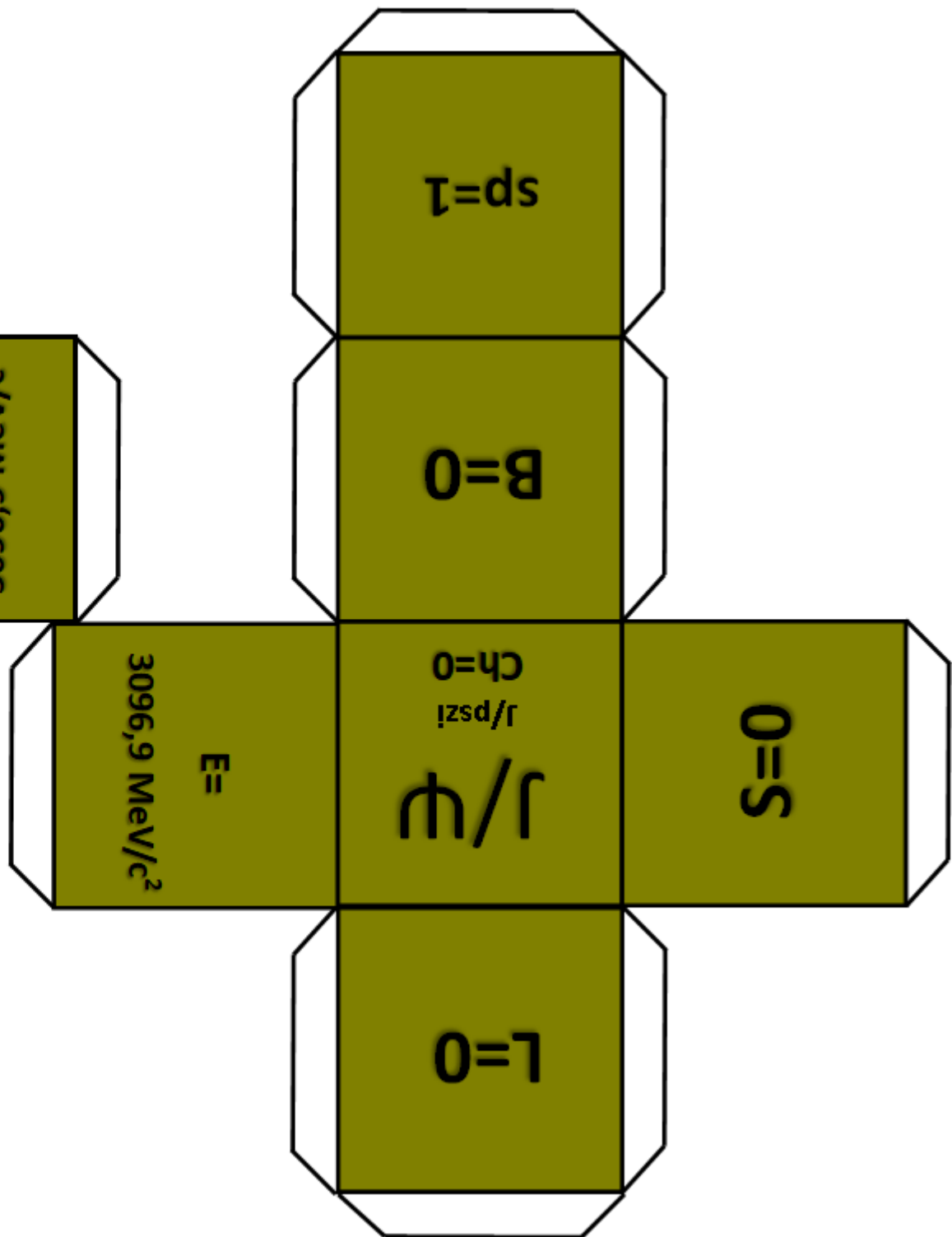
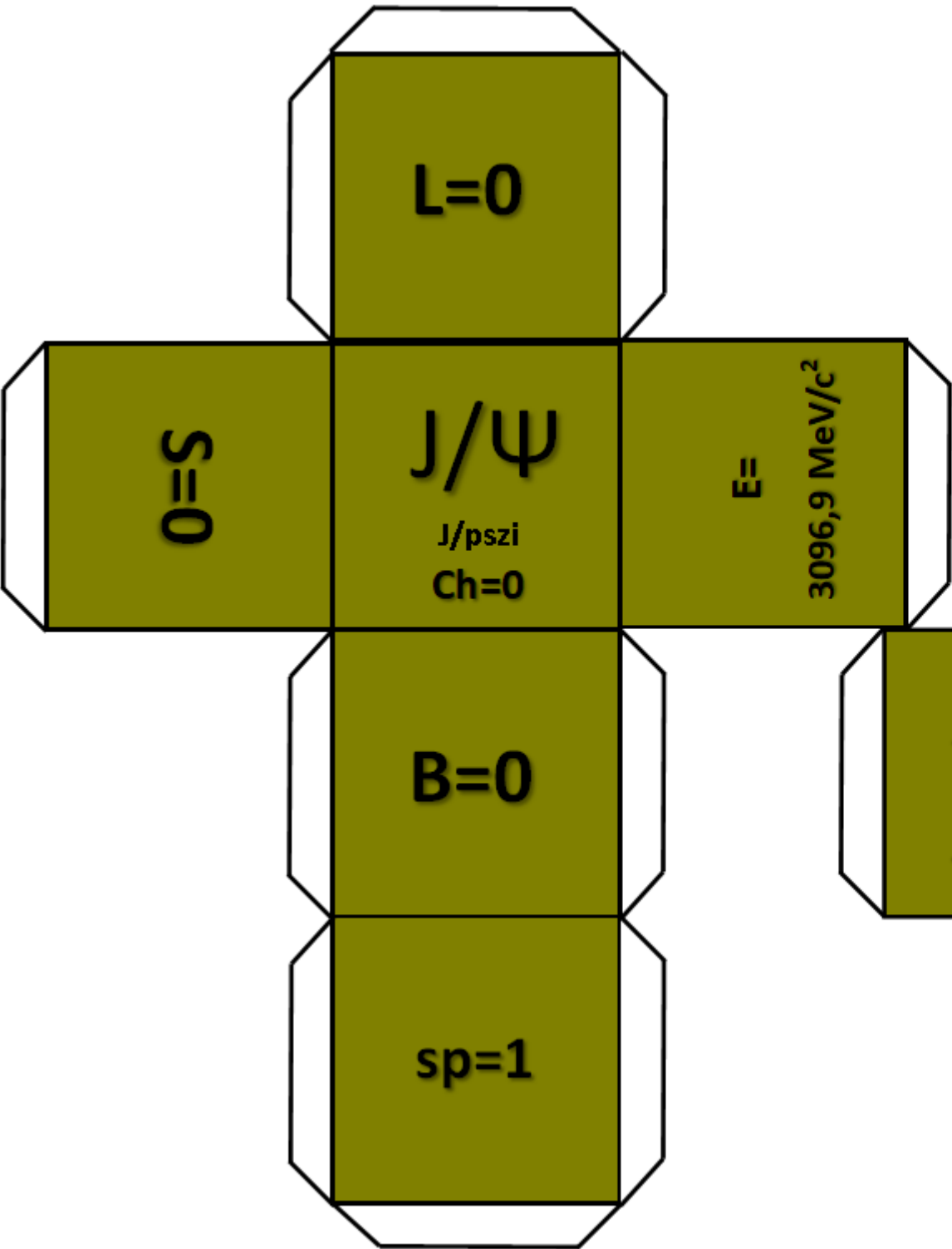












Ellenőrző kérdések

1. Csoportosítsd az elemi részecskéket aszerint, hogy fermionok, vagy bozonok
2. Csoportosítsd a kvarkokat családok szerint
3. Csoportosítsd a leptonokat családok szerint
4. Milyen elemi részecskékből áll egy hidrogén atom. Ügyelj a színsemlegességre!
5. Milyen részecskékből áll egy proton?
6. Milyen részecskékből áll egy neutron?
7. Hogy épül fel egy deutérium atom elemi részecskékből?
8. Mi a különbség a fermionok és a bozonok között?
9. Csoportosítsd az elemi részecskéket aszerint, hogy részt vesznek-e erős kölcsönhatásban!
10. Melyek azok az elemi részecskék, amelyek fénysebességgel mozognak?
11. Gyűjtsd össze az erő-közvetítő elemi részecskéket
12. Gyűjtsd össze a három legnehezebb elemi részecskét!
13. Gyűjtsd össze a három legkönnyebb részecskét!
14. Melyek azok a részecskék, amelyeknek nincs nyugalmi tömege?
15. Melyik az az erőhatás, amelynek nincs, vagy még nem fedezték fel a közvetítő részecskéjét.
16. Mi az elektromágneses kölcsönhatás közvetítő részecskéje?
17. Mi az erős kölcsönhatás közvetítő részecskéje?
18. Melyek a gyenge kölcsönhatás közvetítő részecskéi?
19. Hányféle alapvető kölcsönhatásban vesznek részt a leptonok?
20. Állíts össze elemi részecskékből egy, a valóságban is létező mezont.
21. Egy proton elektromágneses töltése +1. Miért ennyi?
22. Egy neutron elektromágneses töltése 0. Miért ennyi?
23. Mondj példát egy hadron részecskére!
24. Mondj példát egy mezon részecskére!
25. Miben különbözik egy elemi részecske és a neki megfelelő antirészecske?
26. Milyen színtöltése lehet egy kvarknak?
27. Milyen színtöltése lehet egy antikvarknak?
28. Milyen színtöltése lehet egy gluonnak?
29. Mit jelent, hogy egy hadron vagy mezon színsemleges?
30. Mit jelent a kvark-bezárás?
31. Mit jelent a lepton-megmaradás?
32. Mit jelent az elektromágneses töltés megmaradás?
33. Milyen elemi részecskékből áll az anti proton?
34. Melyik az az elemi bozon részecske, amely nem erő-közvetítő?
35. Melyik az az elemi részecske, amelynek kétféle elektromágneses töltése is lehet?

Trükkös kérdések:

1. Mit értünk párkeltés alatt?
2. Milyen színtöltése van a tau részecskének?
3. Hogyan hat az erős kölcsönhatás a leptonokra?
4. Melyiknek nagyobb a tömege: a top kvarknak vagy az anti-top kvarknak?
5. Melyik az a hadron, amelynek nem fehér a színtöltése?
6. Hogy hívják a foton antirészecske párját?
7. Milyen megvilágításra lenne szükségünk, hogy a piros színtöltésű kvarkokat inkább barnának lássuk?

Pedagógiai összefoglaló

A projekt a fizika tantárgyon belül, a részecskefizika fejezetéhez lett tervezve, de természetesen több tantárggyal is szoros kapcsolatban áll. Kémia órákon a diákok tanulnak az atom belső felépítéséről, bár csak a nukleonok szintjéig. Azt gondolom, hogy a XXI. században már kémiából is kötelező arról beszélni, hogy a proton nem elemi részecske, hiszen van belső szerkezete. Sok kémiászakos tanár is részt vett már előadásaimon és sikeresen alkalmazta az ott tanultakat tanítása során.

A kockák készítése közben fejlődik a gyerekek kez ügyessége, akár technika órán is előfordulhatna hasonló feladat. A kvantum-színdinamika törvényeit az additív színkeverés analógiájával mutatom be, amelyre a rajzórán is szükség van rajzolás, festés során. Ugyan egyszerűnek tűnik, mégis azt tapasztaltam, hogy nem tudnak a tanulók (sőt, a tanárok sem) kockát készíteni papírból, ezért jó gyakorlati lehetőség akár a matematika tantárgyban szereplő téreometria témakörhöz tartozó testek hálójának bemutatásához is.

A részecskefizika szemléletes oktatását szolgáló kocka modellel a diákok motiváltabbakká válnak a fizika tanulás terén. Mint minden modell, ez is szemléltet, a megértést segíti, de megfelelő szakmai háttérrel rendelkező ember irányítása nélkül a segédanyag használata tévképzetekhez is vezethet. Sem a modellrészecskék mérete, sem a száma nem felel meg a valóságnak, a színük is csak egy analógia, de ezeken kívül is még számos probléma merülhet fel a projekt során. Külön öröm, ha ezeket a kérdéseket diákjaink teszik fel számunkra, és közös gondolkodás során nyernek értelmet a részecskefizika törvényei. A felmerült eseteket mindenképp tisztázni kell a munka során és hangsúlyozni kell a készlet használhatósági köreit.

A készlet elkészítését követően a diákok lépésről lépésre sajátítják el a fogalmakat és a mikrovilágban érvényes összefüggéseket. Egy modulon belül minimum 6 órát érdemes szánni erre a témakörre, majd egy későbbi alkalommal visszatérni rá a tudás jobb elmélyítésének az érdekében.

Köszönetnyilvánítás

Köszönetemet szeretném kifejezni *Dr. Horváth Dezsőnek* és *Dr. Varga Dezsőnek*, akik tudásukkal, hasznos tanácsaikkal hosszú évek óta segítik munkámat.

A tanulmány elkészítését a Magyar Tudományos Akadémia Tantárgy-pedagógiai Kutatási Programja támogatta.

Felhasznált irodalom

- [1] <http://www.rmki.kfki.hu/kutatas/CERN.html>
- [2] <http://www.termeszetvilaga.hu/szamok/tv2010/tv1005/lhc.html>
- [3] Katona Zoltán, *Elemi részek*, Gondolat Kiadó (1978), Budapest, ISBN: 9632806646
- [4] https://hu.wikipedia.org/wiki/Proporcionalis_szamlalo (2018. 05.05.)
- [5] Raics Péter, *Mag- és részecskefizika*, Egyetemi jegyzet, Debrecen, <https://www.kfki.hu/~csorgo/szeged/magfiz/12/00-AJANLOTT-IRODALOM-Raics-Peter-Debrecen>
- [6] <http://fizika.mechatronika.hu/fizika/fizikalecok/%C3%9Aj%20mappa/afitort.pdf>
- [7] <http://www.termeszetvilaga.hu/szamok/kulonszamok/k0003/modell.html>
- [8] [Lepton – Wikipédia \(wikipedia.org\)](http://hu.wikipedia.org/wiki/Lepton)
- [9] <https://hu.wikipedia.org/wiki/Neutr%C3%ADn%C3%B3>
- [10] <https://hu.wikipedia.org/wiki/Neutr%C3%ADn%C3%B3szcill%C3%A1ci%C3%B3>
- [11] https://hu.wikipedia.org/wiki/Alapvet%C5%91_k%C3%B6lcs%C3%B6nhat%C3%A1sok
- [12] [Pauli-elv – Wikipédia \(wikipedia.org\)](http://hu.wikipedia.org/wiki/Pauli-elv)
- [13] Horváth Dezső: A Standard Modell: mi az, és mire jó? <http://www.termeszetvilaga.hu/kulonsz/k003/modell.html>
- [14] http://uni-obuda.hu/users/racz.ervin/Radioaktivitas_Fuzio_Reszecskefizika.pdf
- [15] Oláh Éva Mária, *Részecskefizika tanítása középiskolában*, Doktori értekezés 2018. [olah_eva.pdf](http://csodafizika.hu/olah_eva.pdf) (csodafizika.hu)