

Kvarkok

Mag és részecskefizika

2. előadás

2018. Február 23.

A pozitron felfedezése

- A12
- 1932 Anderson (Cal Tech)

ködkamra

kozmosz sugárzás

1300 db fénykép

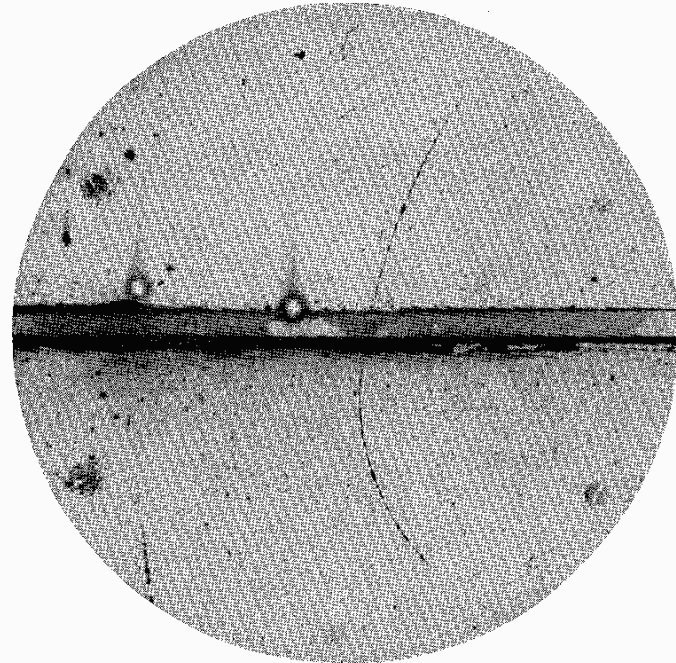
pozitronium

PET

Antihidrogén

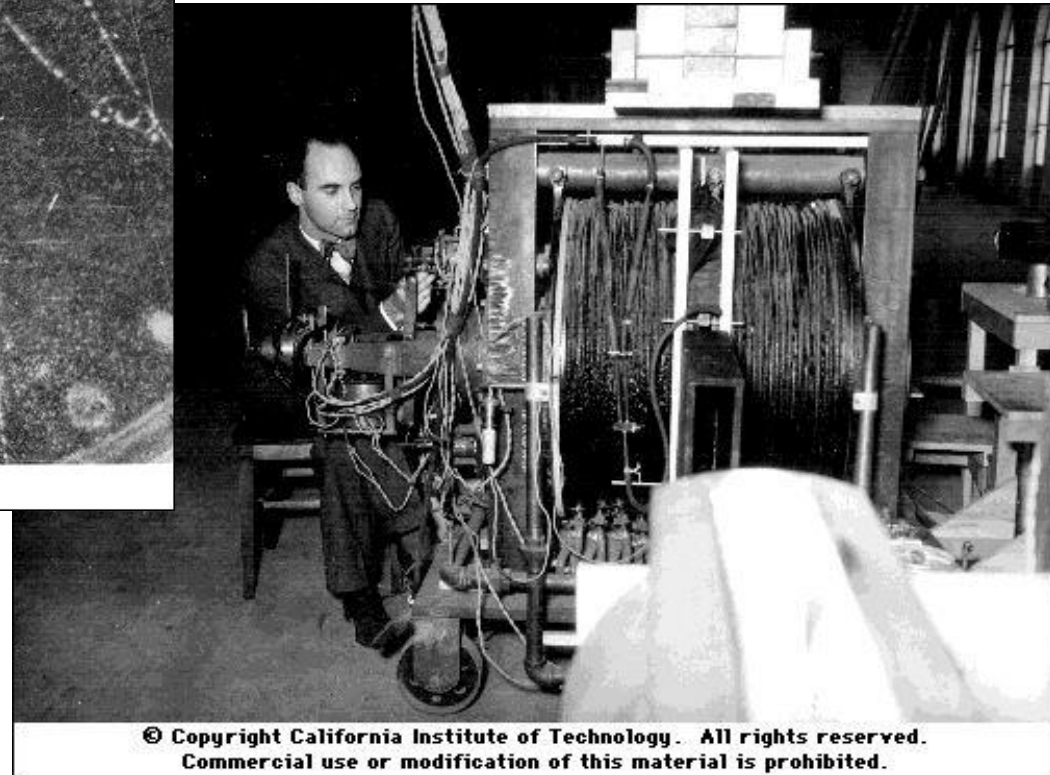
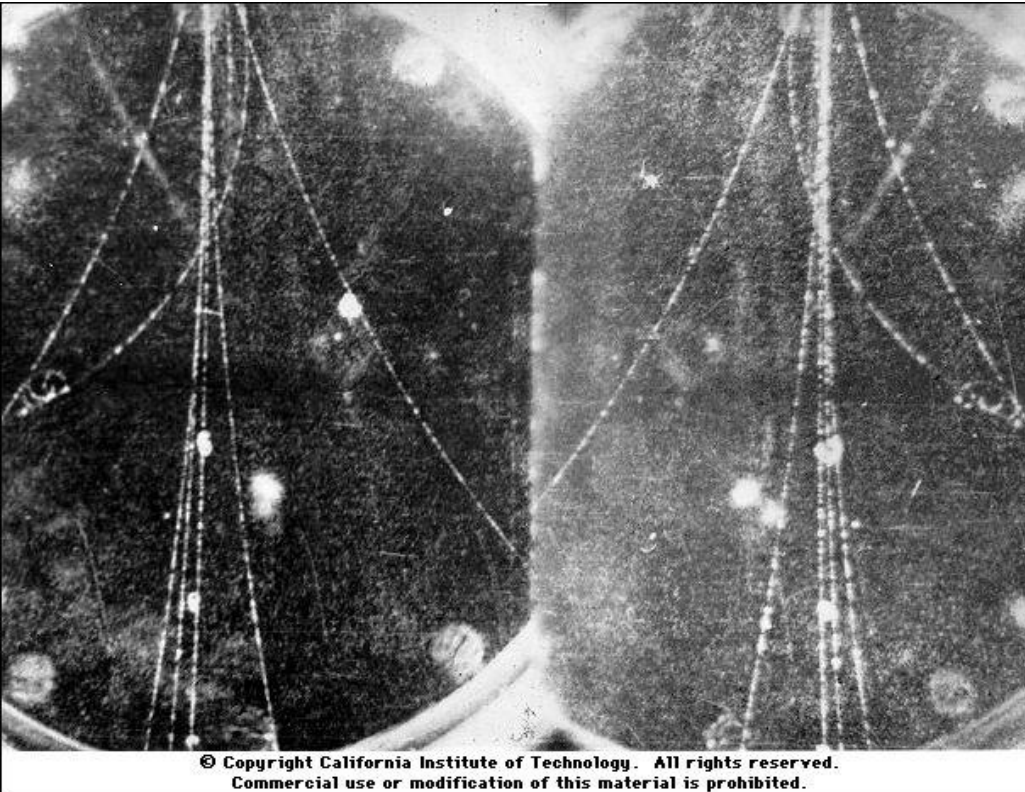
Kozmosz sugárzás

antirészecske: tömeg azonos, töltés ellentétes



Elektron-pozitron párkeltés

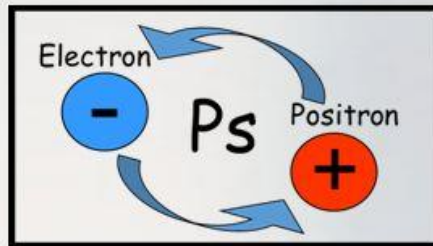
- Párkeltés -
annihiláció



Pozitron-annihiláció

Positronium atom

Purely leptonic atom



Ps n-level energy

$$E_{Ps_n} = \frac{E_{H_n}}{2}$$

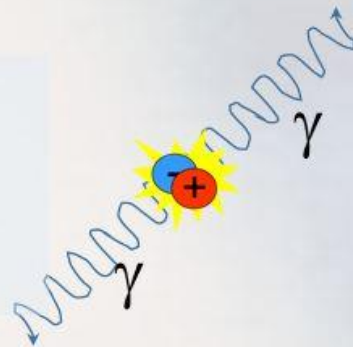
para-Ps

Singlet state

Mean lifetime

0,125ns

2 γ annihilation



γ Energies = 511keV

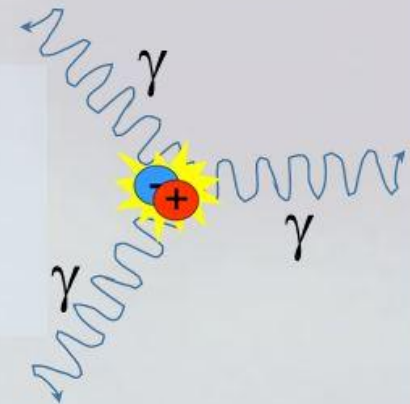
orto-Ps

Triplet state

Mean lifetime

142ns

3 γ annihilation



γ Energies < 511keV

Müon felfedezése

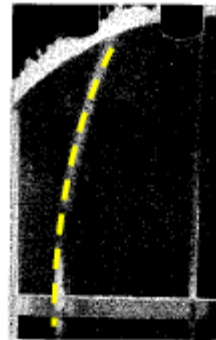
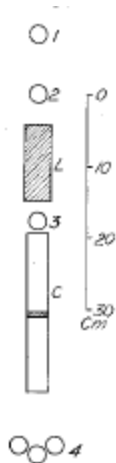
A13

- Anderson és Neddermayer 1936
- Street és Stevenson 1937

$$r = \frac{\sqrt{2mE}}{qB}$$

$$R > 5\text{cm}$$

$$R(\text{proton}, 1\text{MeV}) \approx 2\text{ cm}$$



Phys. Rev. 50 (1936) 263

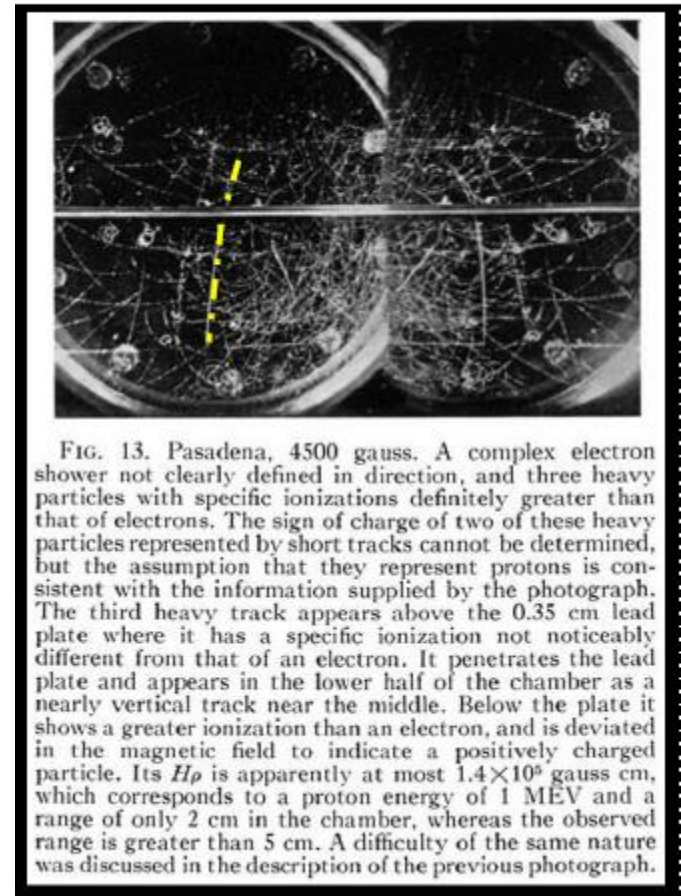


FIG. 13. Pasadena, 4500 gauss. A complex electron shower not clearly defined in direction, and three heavy particles with specific ionizations definitely greater than that of electrons. The sign of charge of two of these heavy particles represented by short tracks cannot be determined, but the assumption that they represent protons is consistent with the information supplied by the photograph. The third heavy track appears above the 0.35 cm lead plate where it has a specific ionization not noticeably different from that of an electron. It penetrates the lead plate and appears in the lower half of the chamber as a nearly vertical track near the middle. Below the plate it shows a greater ionization than an electron, and is deviated in the magnetic field to indicate a positively charged particle. Its $H\rho$ is apparently at most 1.4×10^6 gauss cm, which corresponds to a proton energy of 1 MEV and a range of only 2 cm in the chamber, whereas the observed range is greater than 5 cm. A difficulty of the same nature was discussed in the description of the previous photograph.

Müon tulajdonságai

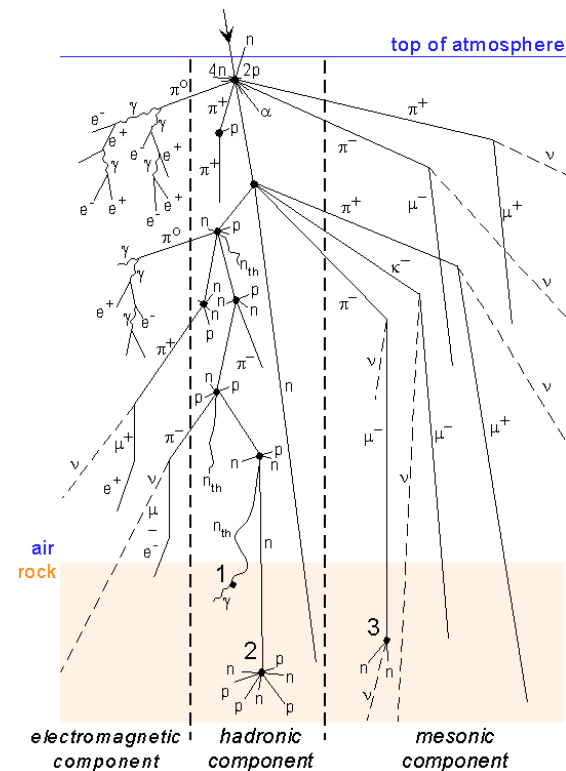
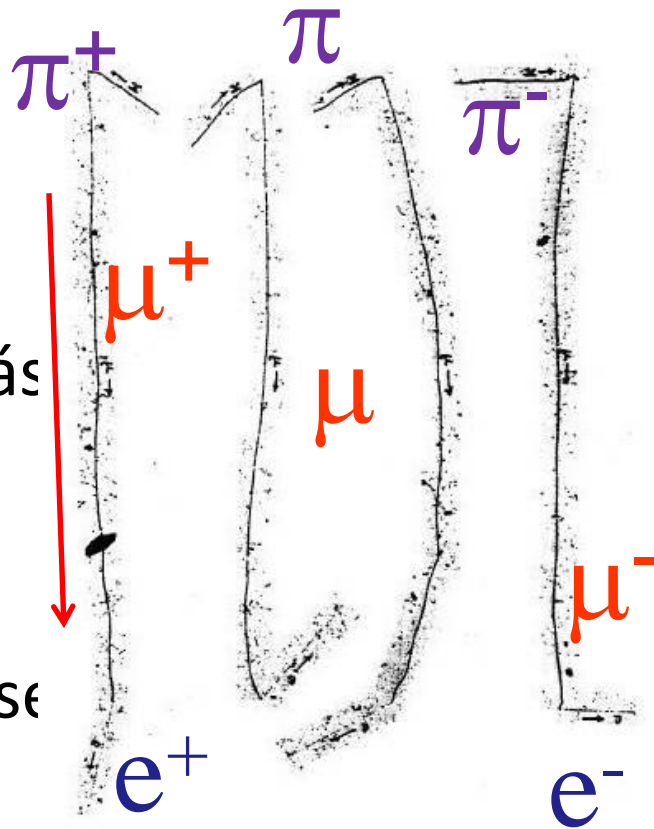
- Elektronnál 210-szer nagyobb a tömege
- Erősen ionizálja a közeget
- Vastag nyomokat hagy a ködkamrában
- Felezési ideje $2,2 \mu\text{s}$
- Forrás a kozmikus sugárzás
- Kicsi a fékezési sugárzása
- A Föld felszín alá le tud jutni több száz méterre

Pi-mezonok felfedezése

A14

1947 Powell,
Lattes
fotoemulzió (Ag)
hegytető
 kozmikus sugárzás
 $mc^2 \approx 150 \text{ MeV}$

keletkezés:
protonok ütközése
atommagokkal.
hamar elbomlik müonra,
a pálya megtörik: láthatatlan részecskék



V-részecskék 1.

A15

felfedezés 1946, Rochester, Butler

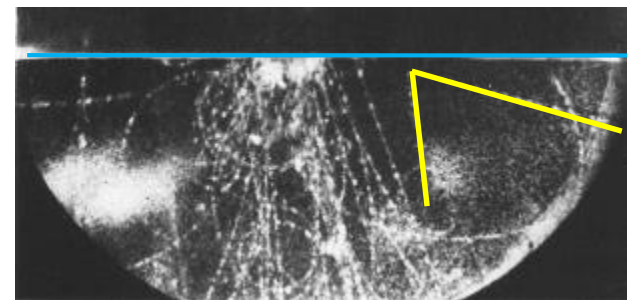
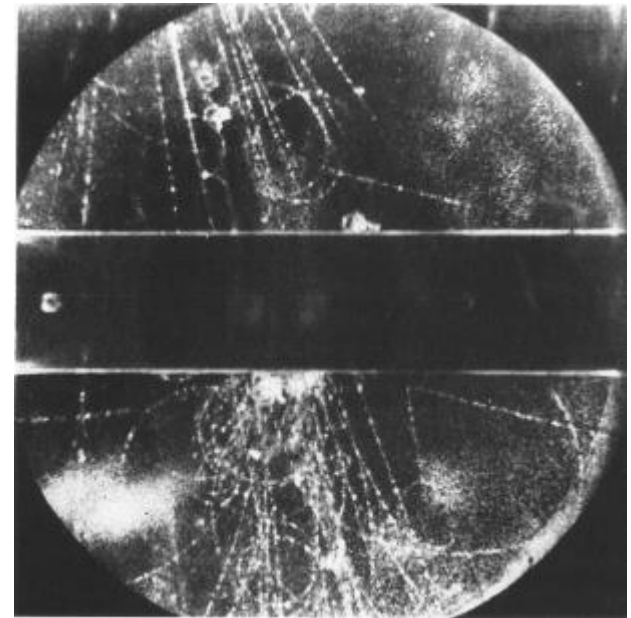
ezen a képen egy semleges részecske bomlásakor két töltött részecske (pionok) nyoma villa alakot (sárgával színezve) rajzol ki

a semleges részecske a kozmikus sugárzás hatására az elnyelő ólomban keletkezett ezt hívjuk V-részecskének

gondos vizsgálat kimutatta, hogy nem lehet e^-e^+ pár, nem lehet pion- vagy müonbomlás, hanem egy új semleges részecske, tömege a pionénál nagyobb, neve kaon lett.

2x2 hasonló tömegű részecskét fedeztek fel.

forrás: <http://hep.uchicago.edu/workshops/kaon99/>



Ködkamra képek értékelése

Mekkora tömegű részecske volt a „villa nyele”?

$r=mv/qB$ alapján a töltött részecskék p -a meghatározható (p_1, p_2)
A laborrendszerben az energia és az impulzus megmarad:

$$\sqrt{p^2 c^2 + m_V^2 c^4} = \sqrt{p_1^2 c^2 + m_1^2 c^4} + \sqrt{p_2^2 c^2 + m_2^2 c^4} = E_1 + E_2$$

$$\underline{p} = \underline{p}_1 + \underline{p}_2$$

ebből m_V -t ki lehet számolni. $m_V c^2 = \sqrt{(E_1 + E_2)^2 - p^2 c^2}$

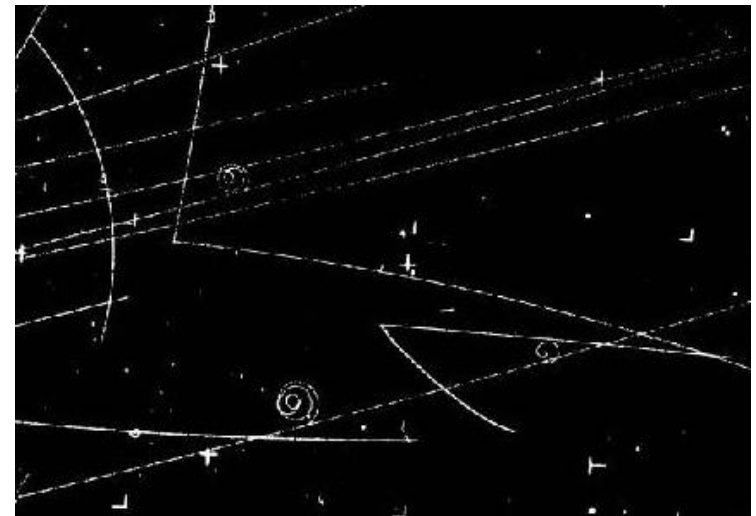
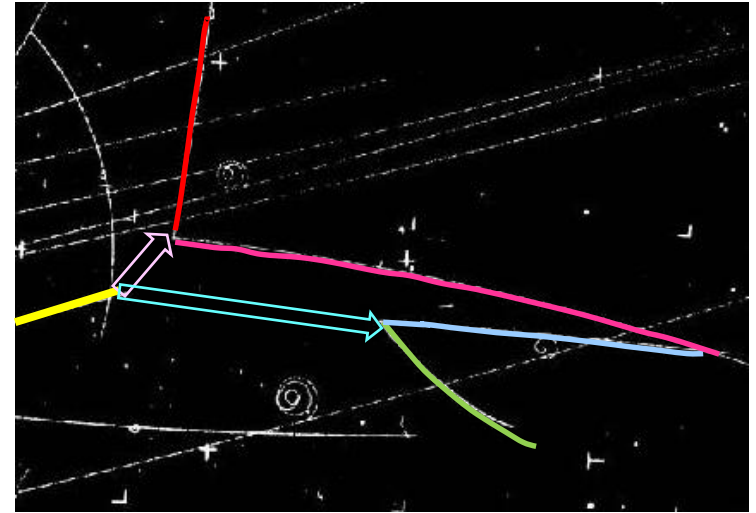
$m_V c^2 \cong 500$ MeV. A protonnál könnyebb új semleges részecske.
(K^0 lesz a neve)

bomlása: $K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$

V-részecskék (1)

- Kaon (500 MeV)
 - Semleges
 - Két pionra bomlik ($\pi^+\pi^-$)
 - Élettartama 10^{-14} s
 - Nukleáris időegységben ez „300 év”
 - Nukleáris időegység 3×10^{-24} s
 - A fénynek a protonon történő áthaladásához szükséges idő
 - Magreakciók, részecske keltések ennél gyorsabban nem tudnak lejátszódni

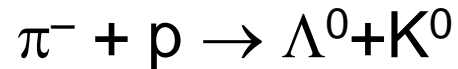
- Másodlagos nyaláb π^-
- Buborékkamra
- Két semleges V keletkezik
 - Egyik $\pi^+\pi^-$ -ra bomlik (K^0)
 - Másik aszimmetrikusan
 - Lendület nagy részét egy proton viszi el
- Alsó V: új részecske



forrás: <http://dorigo.wordpress.com/2008/11/08/some-notes-on-the-multi-muon-analysis-part-ii/>

V-részecskék (2)

- Magyarázat:



- protonnál nehezebb semleges részecske keletkezik, ami protonra bomlik
- Tömege 1115.7 MeV
- Neve: Λ^0
- Azok a részecskék, amik protonra bomlanak = barionok

- Töltött V-részecske kép tapasztalatai:
 - Oldalirányú impulzusból vesszük észre
 - Ez a villa középpontja
 - Nyomsűrűség megváltozik (erősebb lesz)
 - ionizáció sűrűsége megváltozik
 - Más részecske
 - Másik oldal nem ionizál
 - semleges részecske keletkezett

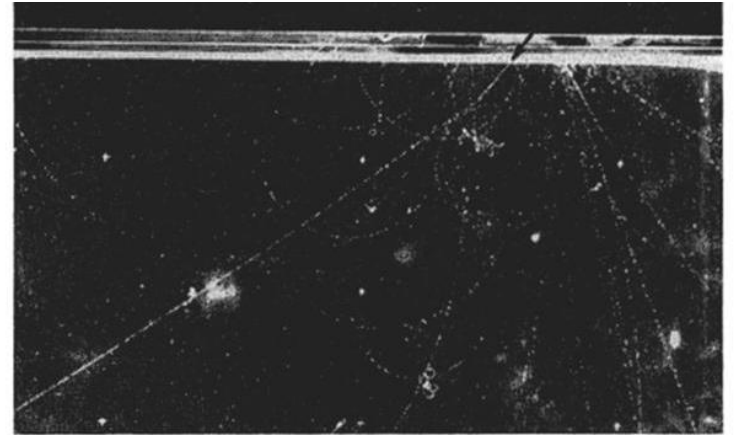
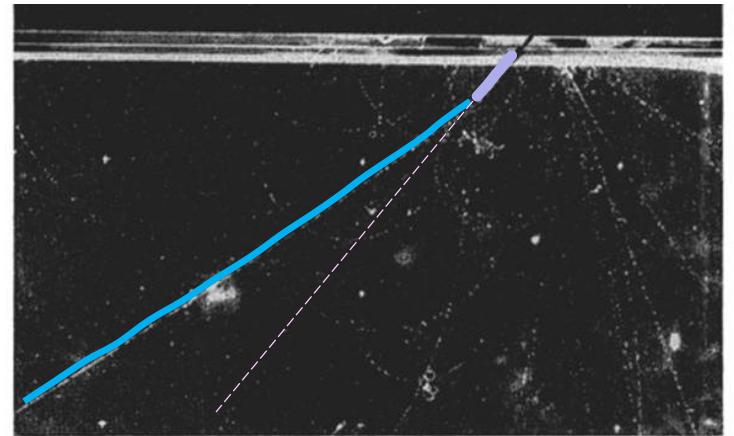


FIG. 1. Cloud-chamber photograph showing a charged V particle originating in an interaction in the lead plate and decaying into a heavy secondary particle. The V particle travels diagonally downward toward the left from the interaction and decays after having traversed only a short distance in the chamber. The heavy secondary particle proceeds almost in the same direction as the V particle. Both the primary and secondary particles are heavily ionizing.



C. M. York, R. B. Leighton, and E. K. Bjornerud **Phys. Rev. 90, 167 (1953)**
Direct Experimental Evidence for the Existence of a Heavy Positive V Particle

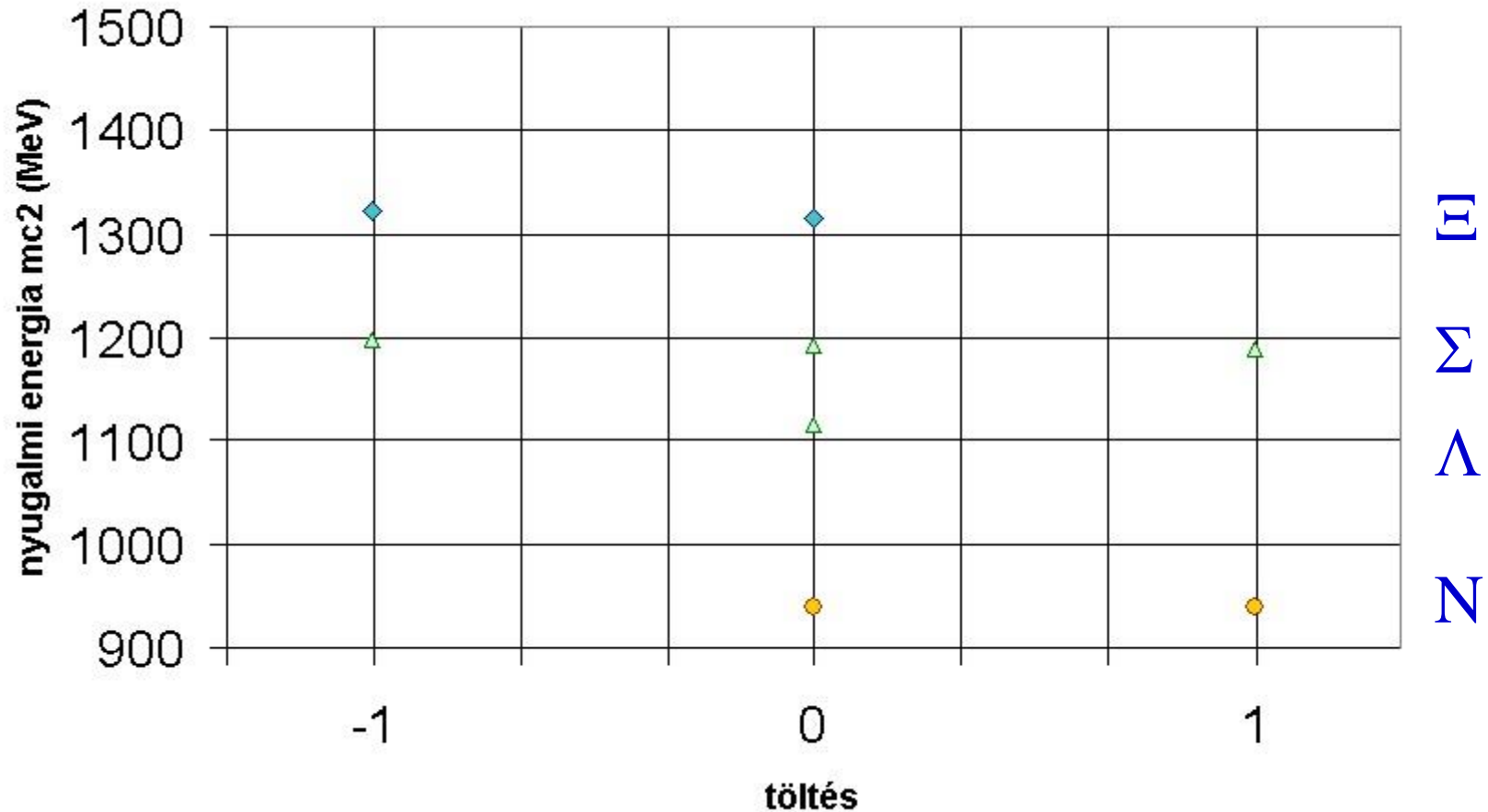
V-részecskék (3)

- Magyarázat:
 - $V^+ \rightarrow p + \pi^0$
 - Tömege 1189.4 MeV
 - Neve Σ^+ , szigma-plusz hiperon
- Hiperonok
 - Nukleonoknál nehezebb, rövid élettartamú részecskék, amik végül protonra bomlanak
- További V-részecskék
 - Találtak két másik nagyon közeli tömegű részecskét is:
 - V^- 1197.4 MeV,
 - semleges 1192.6 MeV

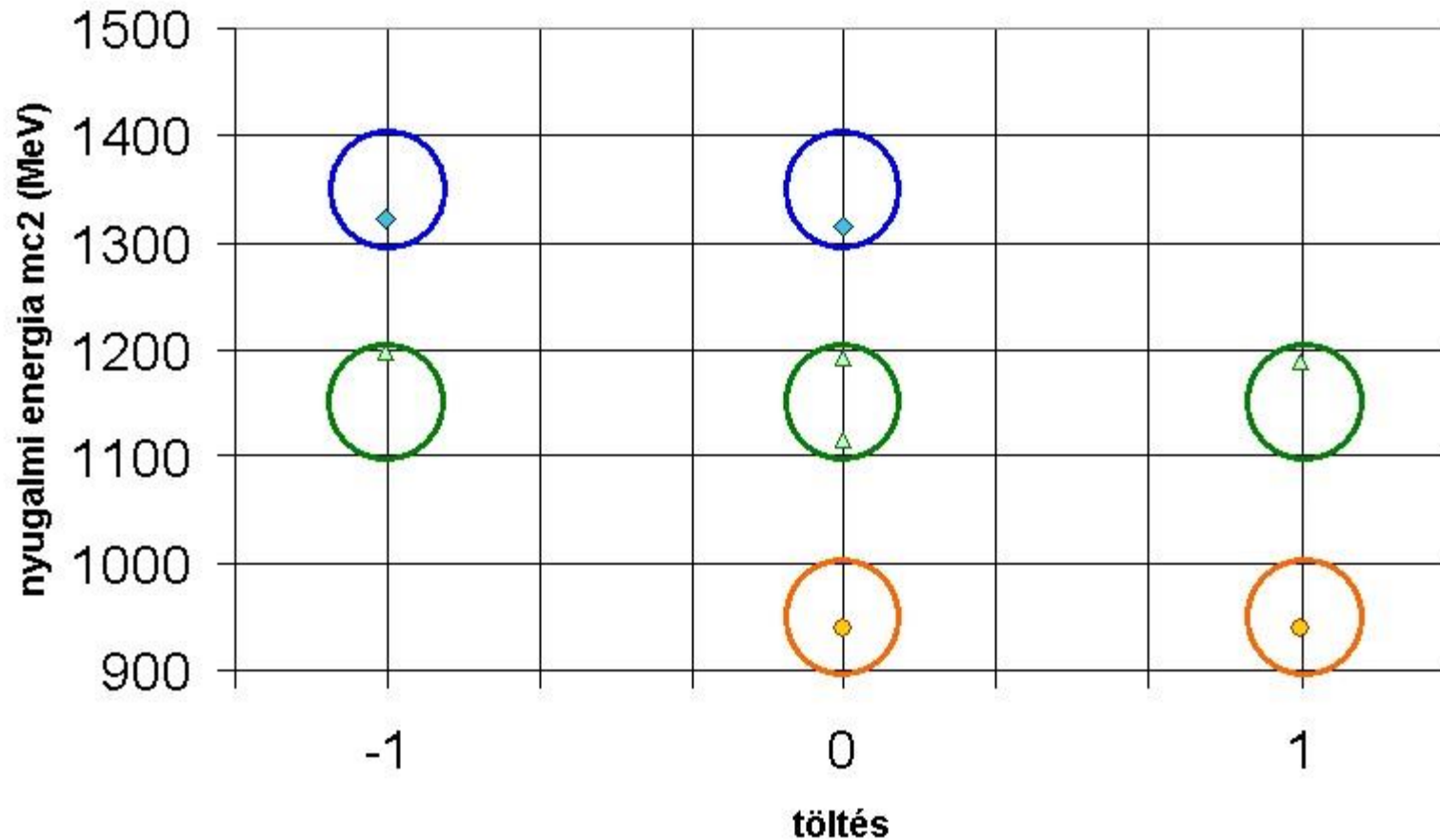
Mit találtunk?

- Vegyük csak azokat, amik protonra tudnak bomlani, látszanak a ködkamrában, és még a protont:
- Proton, neutron 938.3 MeV, 939.6 MeV
 - $(m_n - m_p)c^2 = 1.29 \text{ MeV}$, 0.14% nagyon kicsi!
- V^{+0-} három közeli tömeg: $1193.4 \pm 4 \text{ MeV}$
- Azonos tömegű részecskét azonos betűvel jelöljük, ez adja a nevét
- Ezek multiplettek – kb. azonos energiájú objektumok
- N dublett (p,n), Σ triplett (Σ^+ , Σ^0 , Σ^-),
 Λ^0 szinglett
- Van még két ilyen: Ξ dublett (Ξ^- , Ξ^0) $1320 \pm 4 \text{ MeV}$
- Ezek mind $S=1/2$ spinű részecskék

Rajzoljuk fel ezek tömegét és töltését!



Közelítsünk!

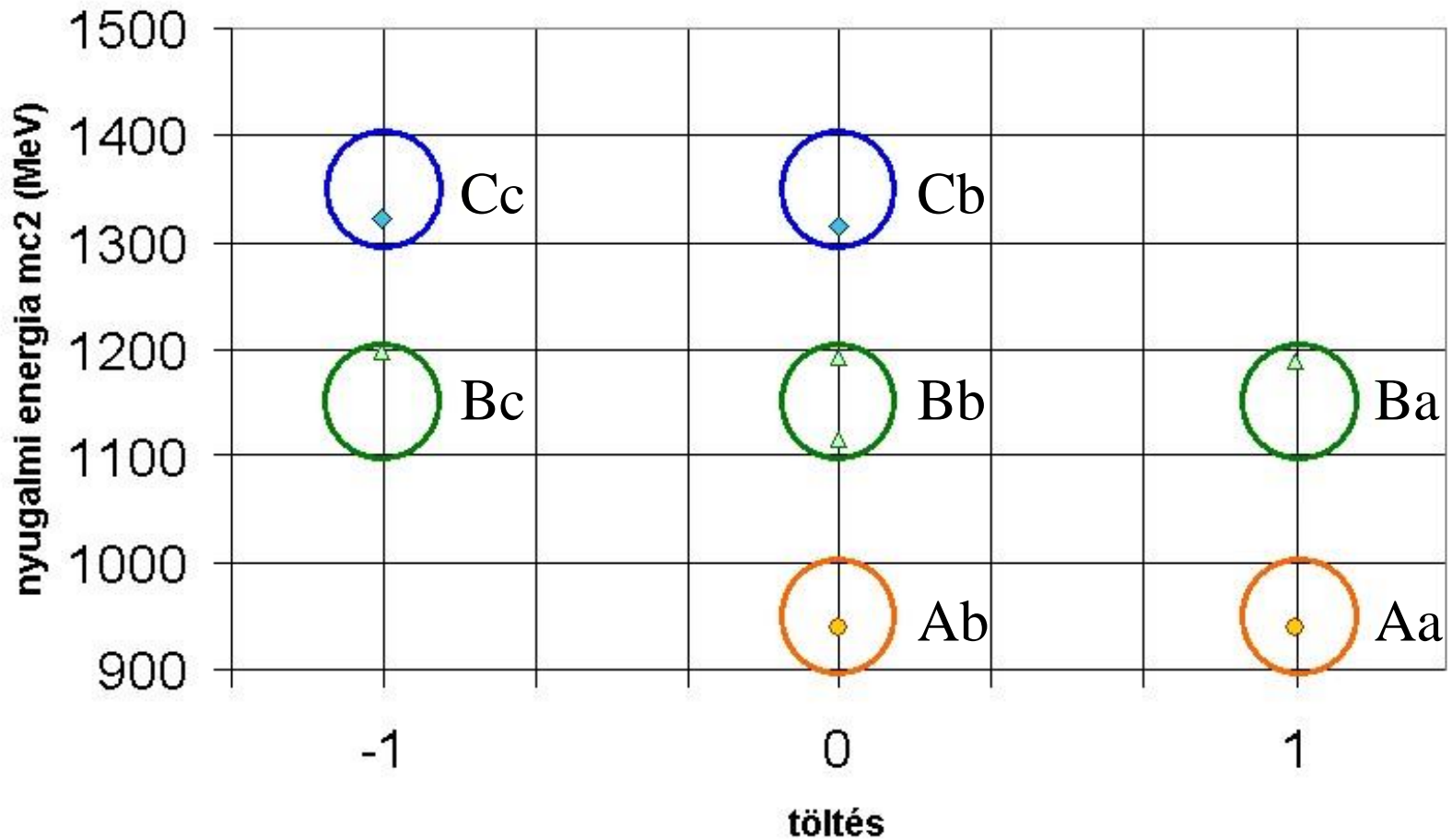


- Szabályosság látszik!

Mitől van szabályosság?

- Látszik, hogy van szabályosság
- Tömeg-különbségek kb. azonosak
- Két négyzet alakú szerkezet
- Minél kevesebb összetevőből rakjuk ki!
 - Nem kell mindent mindig felhasználni
 - Nem kell minden kombinációnak létezni

6 összetevő esete

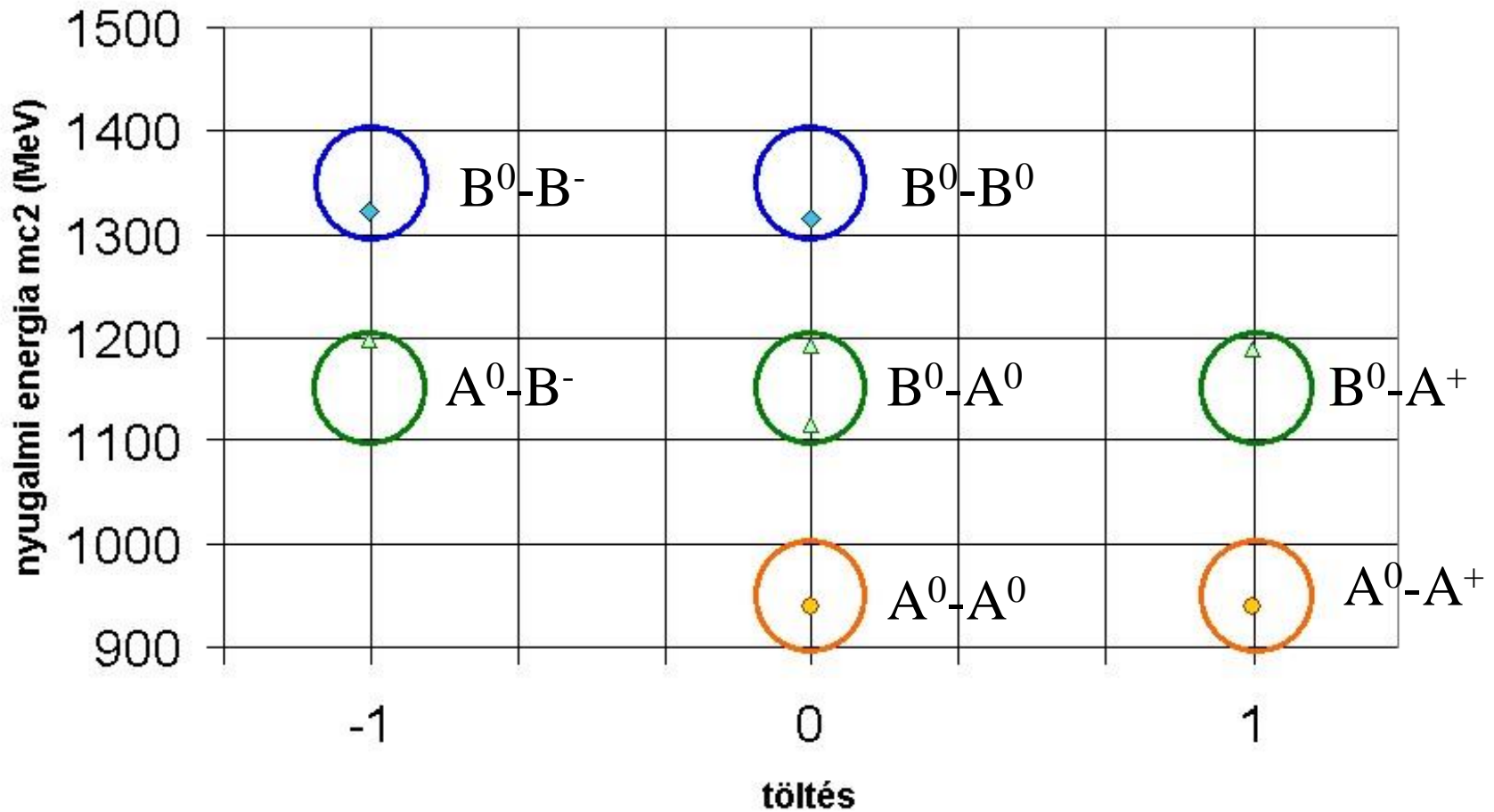


A, B, C, a, b, c 2-3-szor használjuk mindet

6 összetevő esete

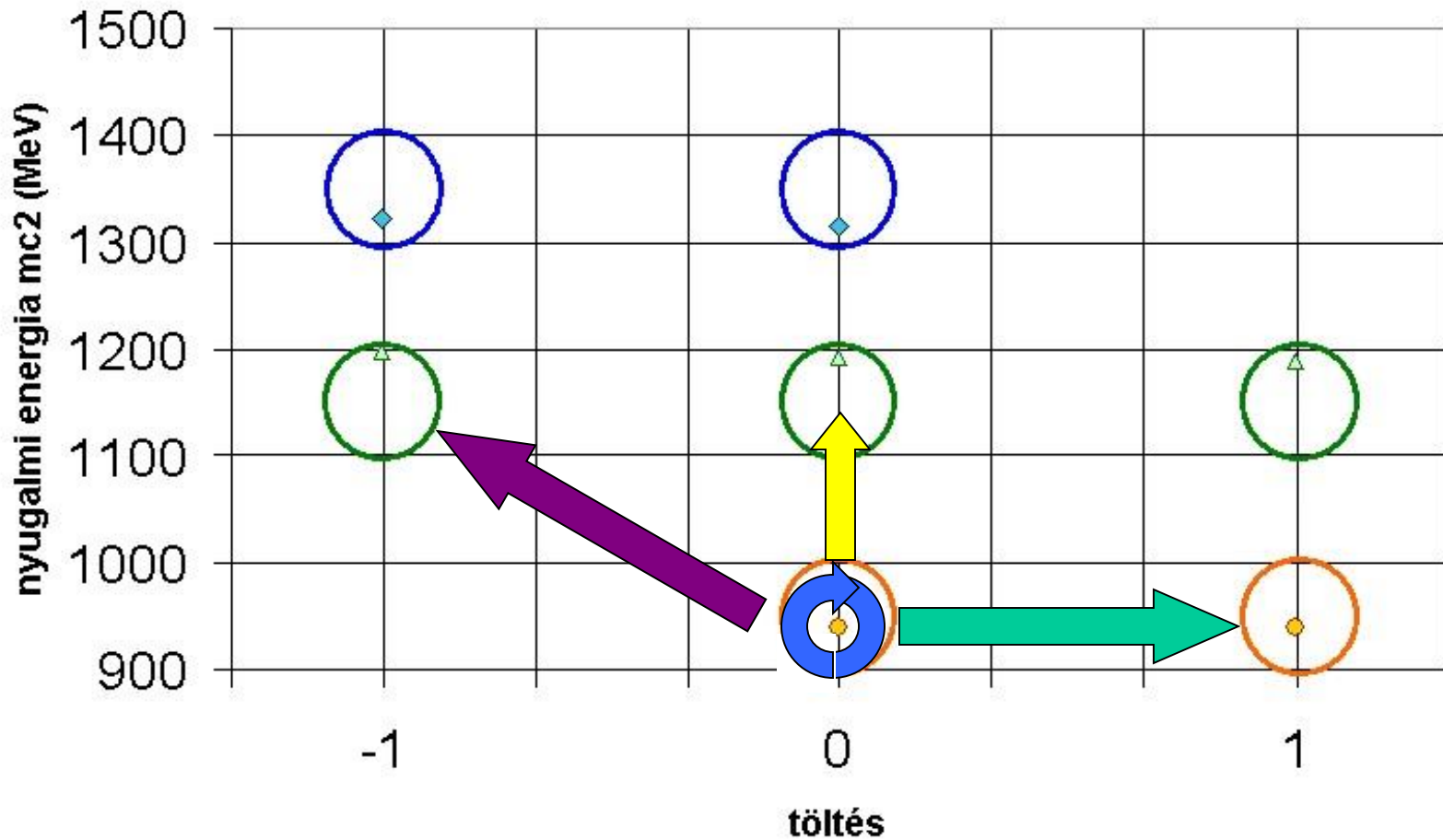
- Van három különböző tömegű semleges nagyobb összetevő
 - A 500 MeV, B 700 MeV, C 900 MeV
- Van három kisebb és azonos tömegű összetevő, melyeknek a töltése különbözik
 - a, b, c és ezek töltése $q(a)=+1$, $q(b)=0$, $q(c)=-1$
 - Tömegük 450 MeV
- Felépítések:
 - n: Ab, p: Aa, Σ : Bc, Bb, Ba, Ξ : Cc, Cb

4 összetevő: A^0 , A^+ , B^0 , B^-



$$m(A^*)=475 \text{ MeV}, m(B^*)=675 \text{ MeV}$$

4 összetevő vektorosan

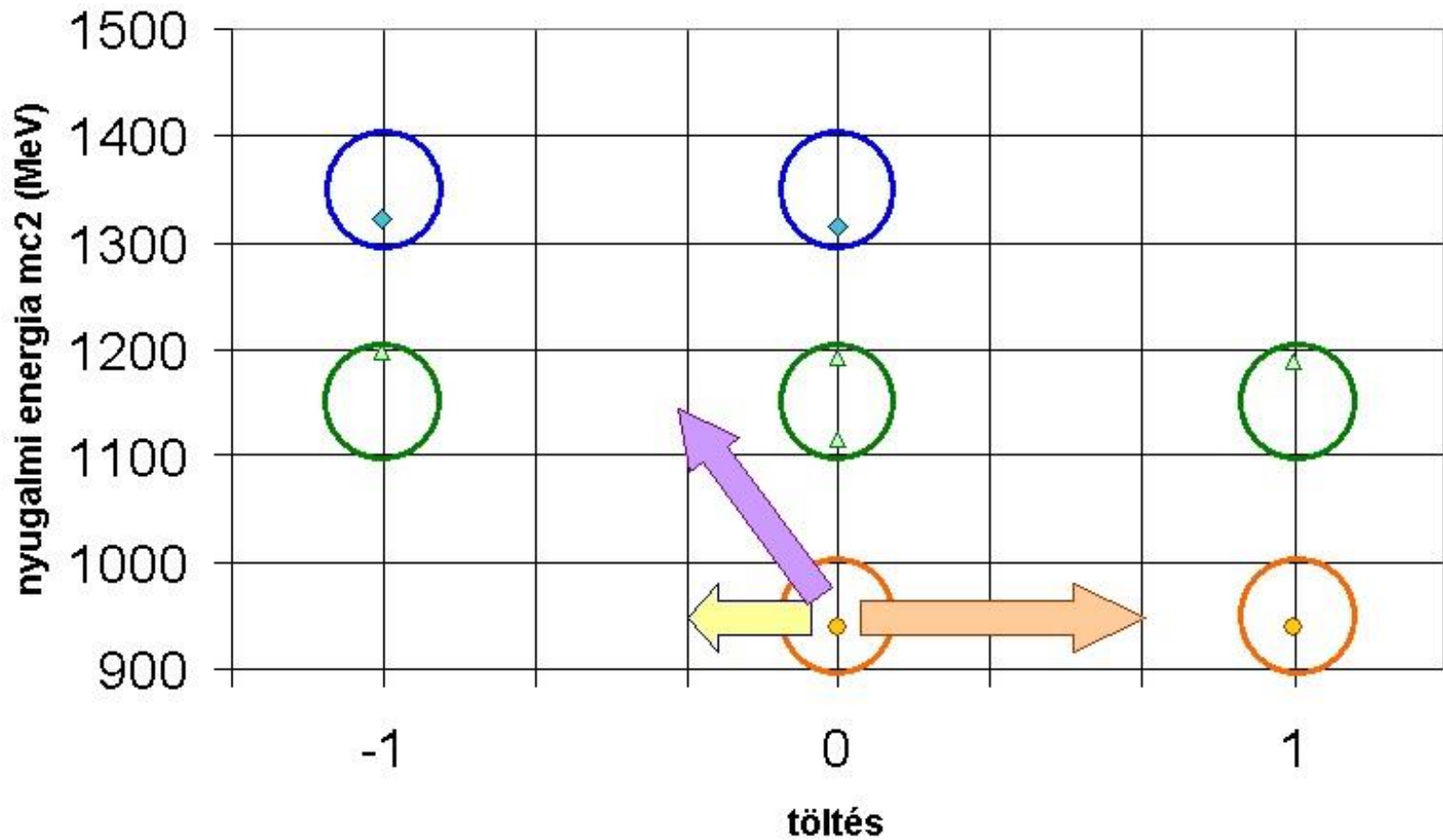


Origó: $(0, 950)$ tömegek \rightarrow $M - 475 \text{ MeV}$ (többlettömeget ábrázoljuk)

3 összetevő

- Rávezető ötlet:
 - Legyen egy alapkö
 - Legyen egy kicsit nehezebb
 - Legyen egy eggyel töltöttebb

Kvarkok



up, down, strange

Kvarkok

- Egyszerűsített, szemléletes konstituens kvark modell, ezek a könnyű kvarkok
- A kvarkok kölcsönhatnak, van kötési energiájuk, nem csak egymás mellé kell őket tenni
- u és d kb. 310 MeV tömegű, az s kb. 200 MeV-vel több
 - Még egy multipllett! (u,d)
 - bonyolultabb modellben: 336 MeV, 340 MeV, 486 MeV
- Töltések: $2q_d + q_u = 0$, $2q_u + q_d = 1 \Rightarrow$
 $q_d = -1/3$, $q_u = 2/3 \Rightarrow q_s = -1/3$
- Kvark nyugalmi tömegek (gyökeresen új dolog):
2.3 MeV, 4.8 MeV, 95 MeV

Multiplettek eredete

- Ha a 3 könnyű kvark mind különböző tömegű lenne, akkor nem lennének multiplettek, és minden részecskét más betűvel jelölnénk
- Multiplettek eredete emiatt az u és d kb. azonos tömege (nyugalmi és konstituens is)

Multiplettek leírása

- Azonos energiájú állapotok
- Töltésben és kvark összetételben különböznek
 - ez tolja el egy kicsit az energiájukat
- Analógia:
 - mágneses tér nélkül azonos energiájú állapotok
 - Mágneses térben felhasadnak, ha van spinjük
- Bevezetünk egy analóg spint, vagy izotóp spint = izospin

Multiplettek leírása

- Egy adott spin energiája $2s+1$ része hasad fel mágneses térben
- Számoljuk meg a multiplettek résztvevőinek számát, ez legyen M
- $(M-1)/2$ lesz a multiplett izospinje: \underline{T} , típusa = t
- \underline{T} hasonlóan kvmi vektoroperátor, ugyanolyan összeadási szabályokkal, mint a spin
 - Spin mögött a perdületmegmaradás, térbeli forgatási szimmetria állt
 - Az izospin mögött a magerők, erős kölcsönhatás szimmetriája áll
- Van \underline{T}_3 komponense az izospinnek
- Ezzel különböztetjük meg a multiplett elemeit

Multiplettek leírása

- $q_0=(u,d)$ multiplett izospinje $1/2$
- nukleon, Ξ izospinje $1/2$
- $t(\Sigma)=1, t(\Lambda)=0$
- Σ és Λ részecskékben $2 q_0$ és $1 s$ van
 - Építsük fel a $2q_0$ rendszer izospinjét:
 - $\underline{T}(2q_0)=\underline{T}(q_0)+\underline{T}(q_0)=1/2\otimes 1/2=1\oplus 0=\underline{T}(\Sigma) \oplus \underline{T}(\Lambda)$
 - Ez van a Σ^0 és a Λ^0 eltérő tömegei mögött:
más az izospin kvantumszámuk
 - t_3 értékük azonban azonos: 0

Multiplettek leírása

- A nukleon három $1/2$ -es izospin összege
- $1/2 \otimes 1/2 \otimes 1/2$,
 - Elvégezzük a második összeget, ez a nukleon esetén 0 , izospin szinglett állapot
 - Spinnél $\uparrow\downarrow-\downarrow\uparrow$ lenne, itt a \uparrow az up kvarkot jelüli, \downarrow a down kvarkot
 - Izospin szinglett = $ud-du$
 - proton = $u(ud-du)$
 - neutron = $d(ud-du)$

A kvarkok spinje

- Mitől lesz a protonnak spinje?
- A kvarkoknak van spinje is!
- $s=1/2$
- A proton hullámfüggvénye a spint is belevéve a Pauli-elv szerint:

$$\begin{aligned} |P^\uparrow\rangle_{spin,flavour} = \frac{1}{\sqrt{18}} & (2 |u^\uparrow u^\uparrow d^\downarrow\rangle - |u^\uparrow u^\downarrow d^\uparrow\rangle - |u^\downarrow u^\uparrow d^\uparrow\rangle \\ & + 2 |u^\uparrow d^\downarrow u^\uparrow\rangle - |u^\uparrow d^\uparrow u^\downarrow\rangle - |u^\downarrow d^\uparrow u^\uparrow\rangle \\ & + 2 |d^\downarrow u^\uparrow u^\uparrow\rangle - |d^\uparrow u^\downarrow u^\uparrow\rangle - |d^\uparrow u^\uparrow u^\downarrow\rangle) \end{aligned}$$