

Úton az elemi részecskék felé

Atommag és részecskefizika

2. előadás

2011. február 22.

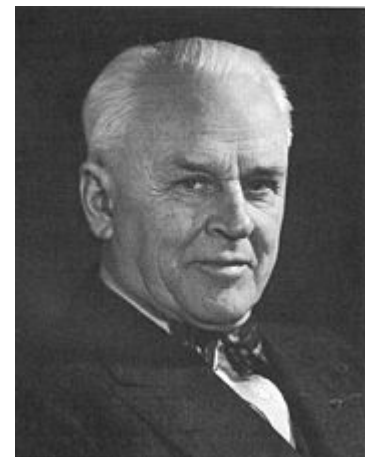
A radioaktivitásról

- *Tévedések*, téves következtetések is voltak....:
- Curie házaspár: felfedezi, hogy a rádiumsók állandóan és sok hőt fejlesztenek!
- A hőtermelés „időben nem változik” (ma már tudjuk: $T_{1/2}=1600$ év)
- A radioaktivitás „atomi tulajdonság”.
- Viszont atomi változásoknál kémiai változást is várunk, de a Ra színe hónapok alatt sem változott...! Semmi nyoma kémiai reakcióknak.
- A radioaktív atomok energia-átalakítók, külső, ismeretlen energiaforrást használnak (hibás)
- Az elemátalakulás szóba sem került...
- DE: gyanú: polónium mintha nem lenne állandó (ma tudjuk: $T_{1/2}=3$ perc)

Elemátalakulás?

- Rutherford, Owens: a Th radioaktivitása akkor is megváltozik, ha *kinyitjuk az ablakot!*
- A Th fölötti levegő radioaktivitása rövid életű!
- Időbeli lefolyás: exponenciális törvény (ld később)
- Rutherford, Soddy: kémiai úton követve a bomlástermékeket → elemátalakulás
- Ekkor (1902) még az atommagról NEM tudtak!
- Kémiailag azonos, de mégis más radioaktív tulajdonságú „elemeket” hogyan lehet berakni a periódusos rendszerbe? Nem lehet...
- Soddy-Fajans eltolódási trv.: alfa bomlásnál a periódusos rendszerben a termék kettővel balra tolódik, atomsúlya négyvel csökken. Béta-bomlásnál eggyel jobbra, atomsúly marad.
- Soddy: izotópok fogalma

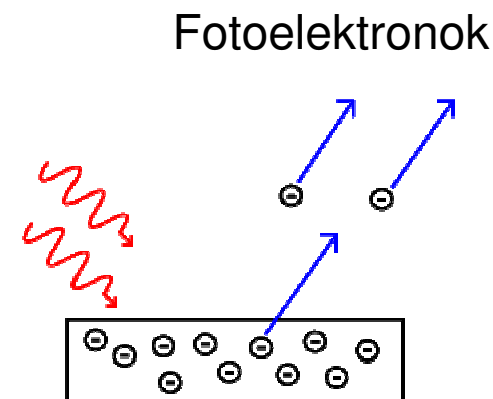
Az elektron töltése (1913)



- Robert A. Millikan (Nobel-díj: 1923)
- Kis olajcseppek levegőben, elektromos térben,
 - gravitáció és elektromos tér hatására mozognak
 - Levegő viszkozitása miatt egyenletes sebességre állnak be
 - sebességüket mérte
- Világossá vált, hogy a töltés kvantált, nem folytonos
- Millikan nem hitte el Einstein foton-elméletét (tehát hogy a foton = részecske), a saját kísérleti bizonyítékai láttára sem.
- Híres kijelentése, hogy „az atom energiája soha nem lesz felhasználható (ha kifogyunk a szénből), ..., a Természet bolondbiztos teremtményeinek nincs semmilyen, a szétesésükkel felszabadítható energiája.”

Fotoelektromos jelenség

- Ultraibolya (vagy még kisebb hullámhosszú) fény hatására elektronok lépnek ki az anyagból



- Hertz (1887): UV fény hatására nagyfesz. Elektródák jobban szikráznak. Később: Lénárd.
- Elektronok energiája a fotonok hullámhosszától függ. Fényintenzitástól nem! $K_{\max} = hf - \varphi$
- Elektronok száma a fény intenzitásától függ, hullámhosszától nem!

Fotoelektromos jelenség magyarázata

- Einstein, 1901: A fény diszkrét kvantumokból áll, részecske jellegű
- A fénykvantum energiája a frekvenciája szorozva egy állandóval
- Ez az állandó ugyanaz, mint Planck feketetest-sugárzás elméletében
- Egy bizonyos energia felett a fénykvantum ki tud lökni egy kötött elektront
- Részecske-hullám kettősség
- Nobel-díj: 1921. Kvantum-forradalom kezdete
- Óriási ellenállás a fizikusok között: ellentmondott a Maxwell-féle hullámelméletnek, sőt, az energia végtelen feloszthatóságának is.
- Millikan mutatta meg (1915) hogy a lineáris reláció korrekt a frekvencia és az elektron energiája között.



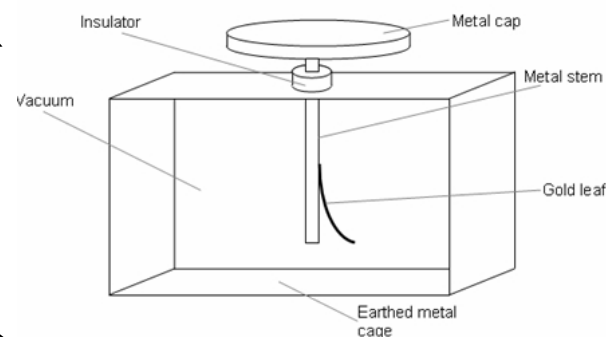
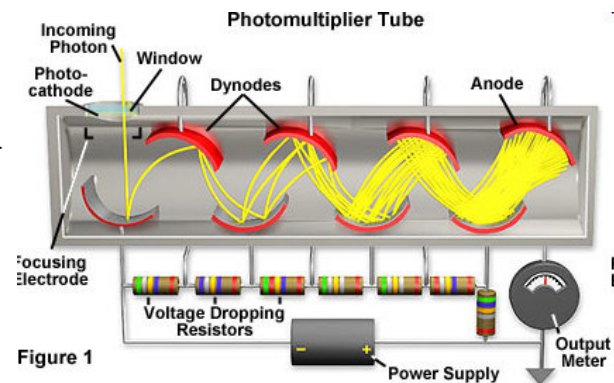
Albert Einstein

$$\sigma = \text{constant} \cdot \frac{Z^n}{E^3}$$

Ólom-árnyékolás

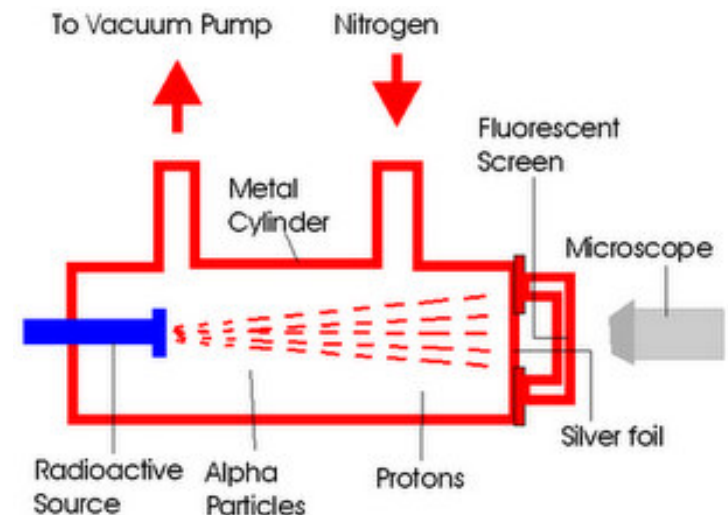
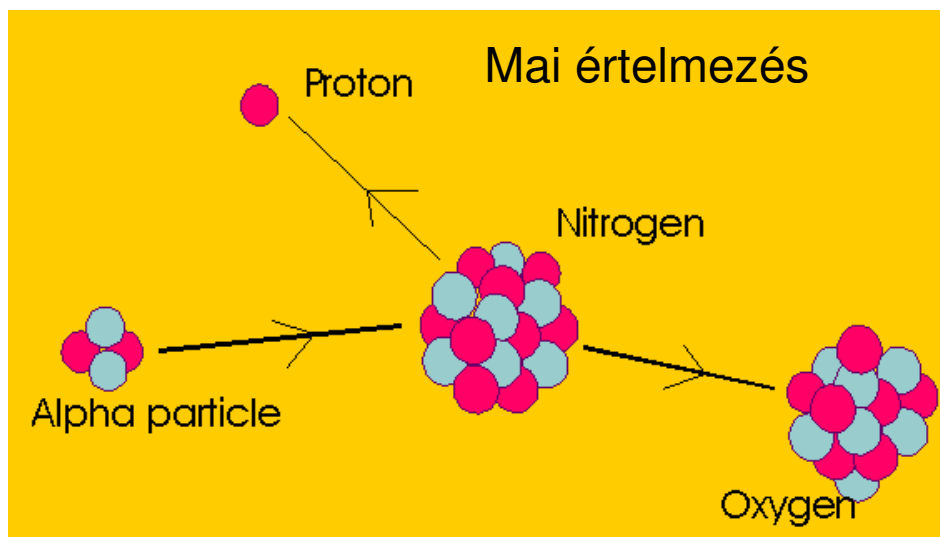
Fotoelektromos jelenség a gyakorlatban

- Fotoelektron-sokszorozók.
Alacsony kilépési munka.
- Demonstrációja: elektroszkóp.
Elveszíti a töltését UV fény hatására.
- Űrhajók pozitív töltése
- Holdpor elektrosztatikus levitációja
- Éjellátó készülékek



A proton felfedezése: 1919

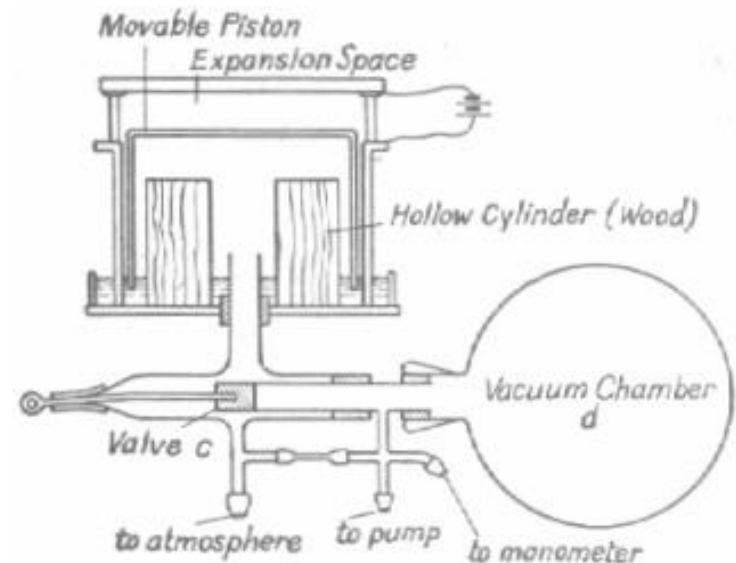
- **Rutherford:** természetes eredetű alfa-részecskékkel bombázott nitrogént, és a szcintillációs detektorán hidrogén-ionokra jellemző jeleket figyelt meg!
- Oxigén, szén-dioxid nem produkálta ezt, csak a nitrogén.
- A hidrogén atommagok tehát benne voltak a nitrogén atommagban, csak onnan jöhettek...!
- Valójában Rutherford ezzel elvégezte a világ első magátalakítását:
$$^{14}\text{N} + \alpha \rightarrow ^{17}\text{O} + \text{p}.$$
- A proton energiája nagyobb volt, mint az alfáé! Energia szabadult fel!



Ködkamra

- Charles T. R. Wilson (Nobel-díj: 1927)
 - skót fizikus, optikai jelenségeket vizsgált ködben
- Túltelített víz- vagy alkoholgőz
- Expanziós kamra: térfogat növelhető, adiabatikus hűtés. Periodikusan.
- Ionizáló részecskék ionokat hoznak létre
- Az ionok jó kondenzációs magvak
- A ködképződés rajtuk indul el
- Az ionizáló részecske (pl. alfa, béta sugárzás) szemmel látható nyomot hagy
- Oldalról megvilágítás szükséges
- Fényképen rögzíthetők a részecskenyomok

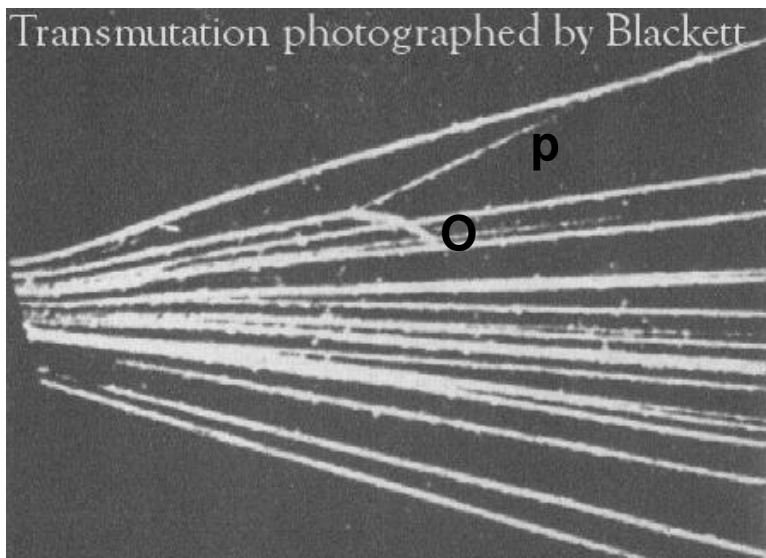
- Másik változata: diffúziós ködkamra, hűtéssel (szárászég, folyékony N), állandóan működőképes



Mi van az atommagban?

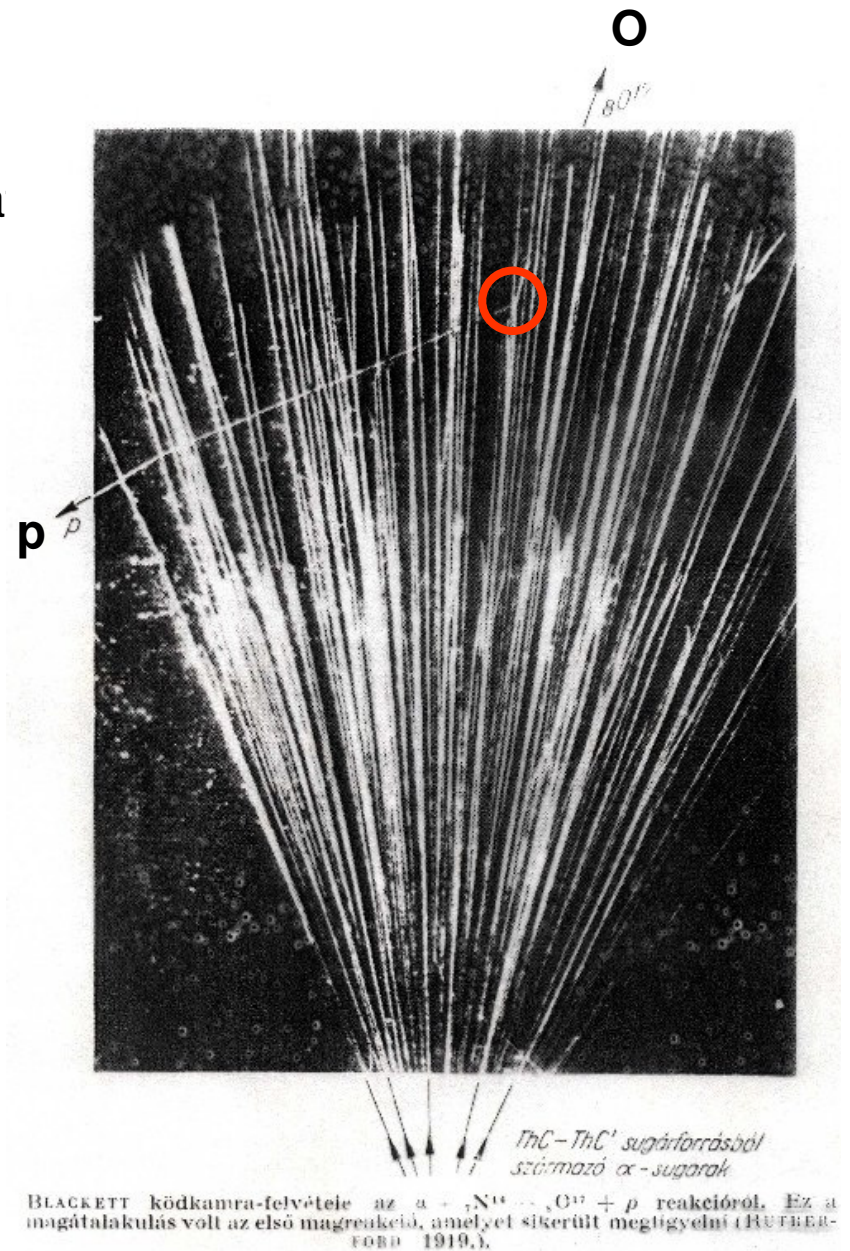
Blackett ködkamrafelvételei a híres magátalakításról, 1923.

1924-ig 415000 töltött részecskéből 8 ilyen villá talált a képeken!!



A bombázó alfa tehát benne marad az atommagban!

A hidrogén-ion („proton”) az atommag része!!



Atommag modell 1.

- **Proton az egyik alkotórész!**
 - Az atomok tömegét Aston a tömegspektroszkópiai mérésekkel meghatározta. Majdnem „egész számok.”
 - Rutherford-kísérlet → a tömeg az atommagban van
 - ^{14}N tömege $14x$ a H tömegének → 14 proton van az atommagban, de csak 7 elektron van az atomhéjon: ezért az atommag töltése $7+$, kell bele még 7 negatív töltés: 7 db e^- !
- **Atommag: A db proton, A-Z db elektron**

(Nem mazsolás kalács! Az atommodell volt, és abban folytonos pozitív töltésű anyag volt feltételezve)
- **Ez sem jó!**
 - ^{14}N spinje ebben páratlan: $14+7$ db $\frac{1}{2}$ de valójában 1-es spinű.
 - miért nem esik szét a sok proton (elektromos taszítás)?
 - A kvantummechanika a magokra is igaz? Akkor nem lehet ilyen kis helyre bezárva az elektron (túl nagy impulzusa lenne, kiszabadulhatna!)

Mi van még az atommagban?

- Nem elég a proton?
- 1921: Rutherford: *lehet*, hogy van még egy semleges alkotórész, amely segít összetartani az atommagot!
- 1931: Bothe, Becker: *újfajta*, minden eddiginél nagyobb áthatólképességű *sugárzás*: polónium alfa-forrással besugárzott könnyű elemek (berillium, bór, lítium) esetén keletkezik.
- Először persze gamma-sugárzásnak gondolták.
- 1932: Irene Joliot-Curie: ha ez a sugárzás paraffinra esik, akkor nagy energiájú protonok lépnek ki!
 - Hogyan löki meg a protont? Talán Compton-effektussal.
 - De: 50 MeV energiája kellett volna legyen ha Compton effektussal löki meg a protont... ez lehetetlenül sok.
 - a Klein-Nishina formula is jóval kisebb hatáskeresztmetszetet adott...
- 1932: James Chadwick (1935: Nobel-díj): neutron felfedezése.
- Transzurán elemek gyártása lehetővé válik



A Curie tudós-család

1911, Nobel-díj (kémia)

Ra és Po
felfedezése

1903, Nobel-díj (fizika)

A spontán radioaktivitás
vizsgálatáért

Marie Curie

Pierre Curie

1935, Nobel-díj
(kémia)

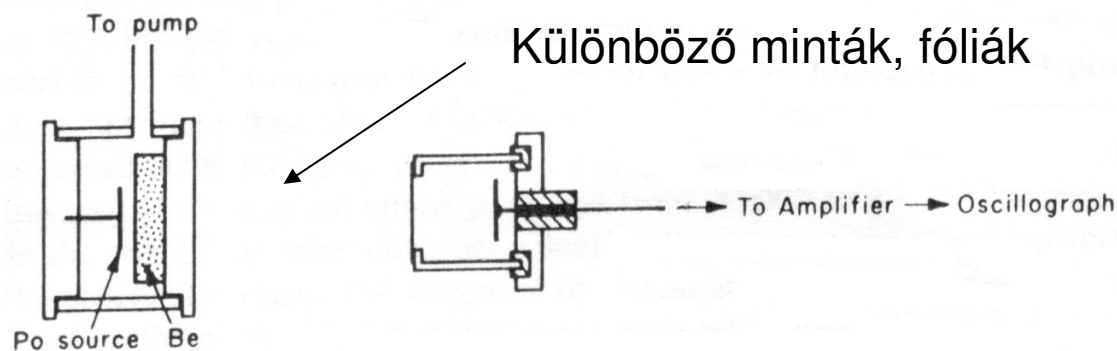
A mesterségesen
előállított
radioaktív izotópokért

Irene Joliot-Curie

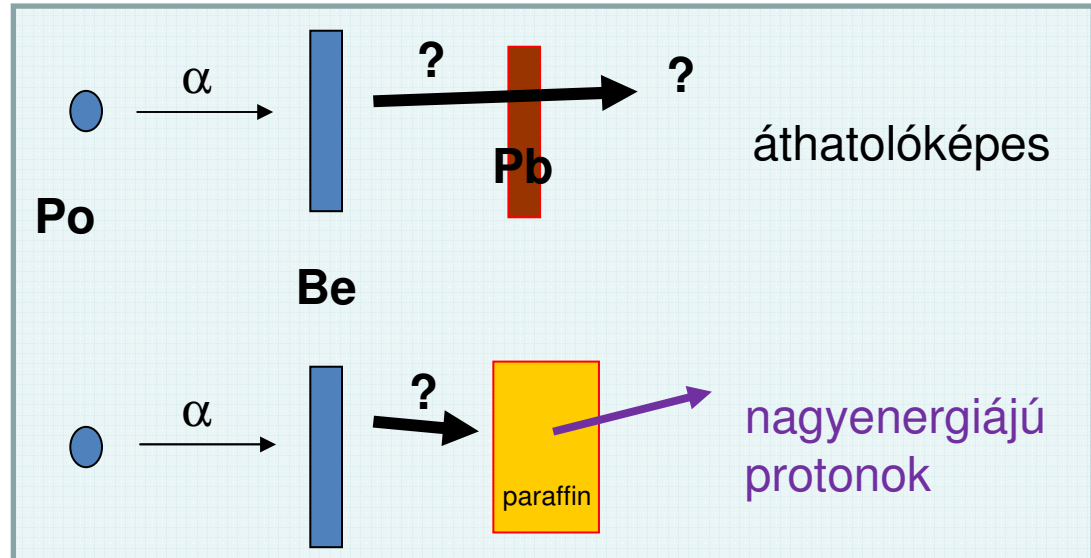
Frederic Joliot-Curie

Chadwick érvelése a neutron mellett

- A „Be-sugárzás” nem lehet gamma-sugárzás, a meglökött protonok nem lehetnek *Compton-szórt* protonok, mert ehhez irreálisan nagy gamma-energia kellene, ami magreakciókból a *tömegdefektusok* ismeretében nem származhat.
- A „Be-sugárzás” útjába tett különböző anyagok atommagjai is meglökődnek, energiájuk a *range* (hatótávolság) alapján mérhető. Minél nehezebb atommagot veszünk, annál nagyobb energiájú kellene hogy legyen a gamma-sugárzás, ami a Be-ból jön, hogy ezt okozza.
- Viszont, egy feltételezett, protonnal azonos tömegű de semleges részecske (neutron) rugalmas szórásával minden kísérleti eredmény egyezést mutat.



Neutron tömege



Új részecske – **neutron**

Chadwick megmérte a tömegét! $m_n c^2 = 939 \text{ MeV} \cong m_p c^2 = 938 \text{ MeV}$

Új kölcsönhatás – magerő

Chadwick: a neutron tömege

H-nel és N-nal való ütközések összehasonlítása:

Nitrogénatomokra: range: 3,5 mm. Ebből a sebesség: $4,7e6$ m/s.

H-re ugyanez $3,3e7$ m/s.

Ha a neutron tömege és sebessége: M , V , a meglökött hidrogén mag maximális sebessége:

$$u_p = (2M / (M + 1)) \cdot V$$

és a nitrogén mag maximális sebessége:

$$u_n = (2M / (M + 14)) \cdot V$$

Tehát:

$$(M + 14) / (M + 1) = u_p / u_n = 3,3e7 / 4,7e6 ,$$

És ebből

$$M = 1,15.$$

Tehát a neutron kb 15%-kal nehezebb a protonnál.
(ma már tudjuk hogy a különbség sokkal *kisebb*).

A proton többszörös szerepe

- A hidrogénatom magja: H^+
- Minden atommag alkotórésze
- Az atommag töltése = protonszám * e
- Az elemek periódusos rendszerben elfoglalt sorszáma = protonszám
- Kémiai tulajdonságok meghatározója (izotópok közös jellemzője) – hiszen egyben az atomhéjban található elektronok számát is megadja.

Tehát, mostmár tudjuk hogy az atommag miből áll... **be is fejezhetjük itt?**

A neutron létének következményei I.

1. Az atommag alkotórészei – Z db proton + N db neutron,
 $A=N+Z$ az atommag tömege
(újdonság: **nincs elektron az atommagban**)
2. A protonokat egy új erő tartja össze, ami erősebb az elektromágneses taszításnál:

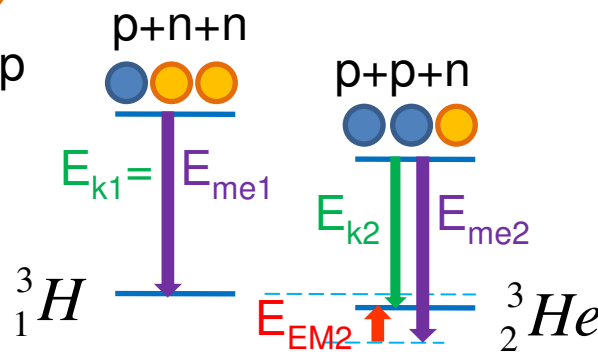
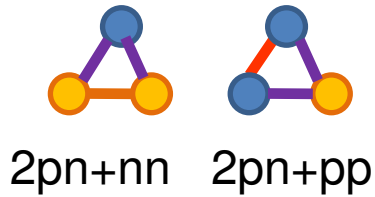
MAGERŐ: protonok és neutronok között ható erő

$$\text{Kötési energia: } E_{\text{köt}} = (m - Zm_p - Nm_n)c^2$$

Az atommag kötési energiája két részből áll $E_{\text{köt}} = E_{EM} + E_{\text{magerő}}$

3. ${}^3\text{H}$ és ${}^3\text{He}$ összehasonlítása (legegyszerűbb atommagok) elárulhat valamit a magerőről...

Magerők tulajdonságai I.



$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

$$Q_{\beta n} = 780 \text{ keV} + 511 \text{ keV}$$

$${}^3_1H \rightarrow {}^3_2He + e^- + \bar{\nu}_e$$

$$Q_{\beta 3H} = 18,6 \text{ keV} + 511 \text{ keV}$$

$$E_{k1} - E_{k2} = 780 \text{ keV} - 18,6 \text{ keV} = 761,4 \text{ keV}$$

$$E_{EM2} \approx (3/5) \text{ ke}^2 / R = 0,6 \cdot 1,44 \text{ MeVfm} / 1,15 \text{ fm} = 750 \text{ keV}$$

$$E_{me1} - E_{me2} = E_{k1} - E_{k2} - E_{EM2} = 760 \text{ keV} - 750 \text{ keV} \approx 0 \text{ keV}$$

$$E_{nn} = E_{pp}$$

Magerők tulajdonságai II.

Tömegek: ${}^3\text{He}$: 3.01603 u – 2x511 keV

${}^3\text{H}$: 3.01605 u – 511 keV

p: 1.00728 u

n: 1.00867 u

n+p+p: 3.02323 u

p+n+n: 3.02462 u

$-E_{\text{köt}}$: ${}^3\text{He}$: $7.20\text{e-}3$ u + 2x511 keV = 7730 keV

${}^3\text{H}$: $8.57\text{e-}3$ u + 511 keV = 8500 keV

Korrektció a Coulomb-taszításra: 750 keV (${}^3\text{He}$).

Magerők: ${}^3\text{He}$: 7730+750 = **8480 keV**

${}^3\text{H}$: **8500 keV**

NAGY PONTOSÁGGAL EGYEZNEK!!!

A magerő NEM függ attól, hogy p-p, vagy n-n között hat

$1\text{u}=931,5$ MeV/c², a szén-12 atom tömegének 12-ed része.

A neutron és következményei II.

4. A magerők függetlenek attól hogy proton vagy neutron vesz részt benne
Ezt a pp, pn és pn szórás kísérletek is alátámasztják

→ neutron, proton a magerők szempontjából **azonos**

5. A tömegük is majdnem azonos, $m_n c^2 = 939 \text{ MeV}$, $m_p c^2 = 938 \text{ MeV}$
 $(m_n - m_p) c^2 = 1,29 \text{ MeV} = 0,13\%$ nagyon kicsi

6. Két majdnem azonos tömegű részecske,
melyek a magerő szempontjából azonosak,
egy részecske, amelynek p és n a két állapota: N=nukleon.
magerő → nukleáris kölcsönhatás

nukleonok=proton+neutron, közöttük hat a magerő:
ezeket a magerő töltéseinek is lehet nevezni: **nukleáris töltések**

4. → **a magerő nukleáris-töltés-szimmetrikus, és nukleáris-töltés-független**
egyébként bonyolult és nem teljesen általános potenciállal megadható
(lásd. III. év Csótó Attila előadása)

Spin (kitérő...)



- A spin a részecske hullámfüggvényének térbeli forgatásokkal szembeni transzformációs tulajdonsága. Nulla spinű részecske: invariáns a forgatásra.
- Nem magyarázható alkotórészekkel: pontszerű részecskéknek is lehet spinje. Relativitáselmélettel is gond lenne.
- A részecskék spinje nem változik vagy változtatható meg.
- Összetett részecskék alkotórészeinek relatív mozgásából is származhat spin, de csak egész.
- Egész spinűek: bozonok. Több is lehet egy kvantumállapotban. (fotonok, mezonok). Ezek közvetítik a kölcsönhatásokat is.
- Feles spin: fermionok. Pauli-elv. e, n, p, leptonok, kvarkok.
- 2-es spin: graviton (hipotetikus). 0 spin: Higgs (hipotetikus).
- A redukált Planck-állandó egységeiben adják meg: \hbar
- Összetett részecskék: nemtriviális spin összeadás.
- z-komponens: $-s, -s+1, \dots, s-1, s$ lehet. Összesen $2s+1$ lehetőség.
- Kísérleti bizonyíték: Stern-Gerlach kísérlet, 1922.
- Elméleti magyarázat: Pauli, 1927.
- Alkalmazás: nuclear magnetic resonance (NMR, MRI): III. BSc labor



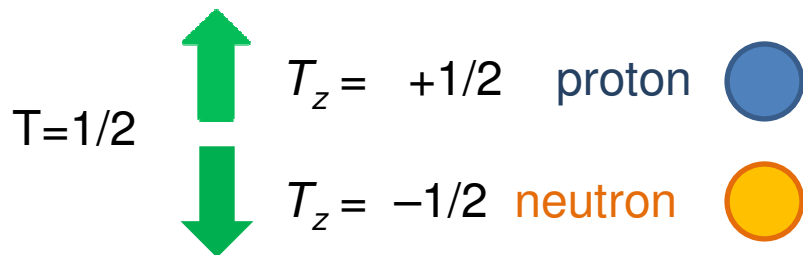
Az elemi részecskéknek tehát van saját perdületük, ezek két irányba állhatnak, neve: ($1/2$ -es vagy egész) **spin**.

Az energiájuk általában (B tér nélkül) nem függ a spin beállításától.

Az izospin

Heisenberg (1932): A nukleonoknak van nukleáris töltése, ez két állapot lehet (proton, neutron). Formálisan teljesen analóg a spinnel: neve **”izospin”** (Wigner). A két állapot energiája a magerők szempontjából nem függ az izospin beállításától (tehát, hogy *proton* vagy *neutron* a részecske.)

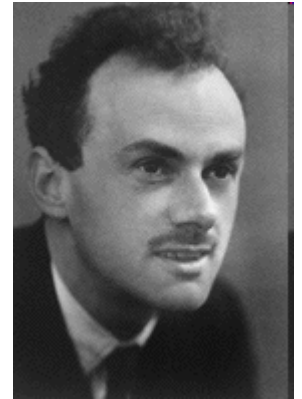
A *nukleon* izospinje: $T = 1/2$. Az izospin *harmadik komponense* mutatja meg a „beállási irányt” az izospin térben: $-1/2$ vagy $+1/2$ lehet az értéke. Ebben a paraméterben különbözik a proton a neutrontól.



Miért fontos? A kvark-ötlet (60-as évek) és a Yang-Mills elmélet megalkotásához vezetett

Antirészecskék

- P. A. M. Dirac (1933 Nobel-díj)
- Dirac-egyenlet (1928): az elektron hullámfgv-ének relativisztikus mozgásegyenlete
- Megjósolta az antirészecskék létezését elméleti (matematikai) alapokon
- Megalkotta a modern kvantummechanikát
- A kvantum-elektrodinamika (QED) atyja
- Mágneses monopólus és elektromos töltés kvantumának kapcsolata (jóslat)
- Wigner Jenő sógora volt



Dirac-egyenlet

- **Dirac-egyenlet** (1928): az első elméleti eredmény amely a kvantummechanikával és a speciális relativitáselmélettel is összhangban volt.

- A H színeképvonalainak teljes és pontos értelmezését adta.

- Probléma: a Schrödinger-egyenlet NINCS összhangban a speciális relativitáselmélettel.

„ $E=p^2/2m$ ”

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2\phi = i\hbar\frac{\partial}{\partial t}\phi.$$

- Relativisztikus sebességeknél a teljes energia így adható meg:

$$m^2c^4 + p^2c^2 = E^2$$

Beírva az operátorokat: $\mathbf{p} = \frac{\hbar}{i}\nabla = -i\hbar\nabla$

$$\left(\nabla^2 - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}\right)\phi = \frac{m^2c^2}{\hbar^2}\phi$$

$$E = i\hbar\frac{\partial}{\partial t}$$

Így legalább azonos fokú deriváltak jelennek meg a térben és időben.

Nem jó... elsőfokú egyenlet kellett, a kezdőfeltétel nem lehetett túlságosan tetszőleges, hiszen a hullámfv valószínűségi sűrűséget kell hogy jelentsen. A pozitív definitesség nem biztosítható (kvantumtérelméletben rendben lesz).

Dirac-egyenlet

$$\left(\nabla^2 - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) \phi = \frac{m^2 c^2}{\hbar^2} \phi$$

Jó lenne a hullámoperátor „gyökét” venni, hogy elsőfokú lehessen az egyenlet...

$$\nabla^2 - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} = (A\partial_x + B\partial_y + C\partial_z + \frac{i}{c}D\partial_t)(A\partial_x + B\partial_y + C\partial_z + \frac{i}{c}D\partial_t).$$

A kereszttagoknak el kell tűnni, ha beszorzunk... vagyis ez kell:

$$AB + BA = 0, \dots; \quad A^2 = B^2 = \dots = 1.$$

Ekkor viszont a fenti hullámegyenlet „négyzetgyöke”:

$$(A\partial_x + B\partial_y + C\partial_z + \frac{i}{c}D\partial_t)\psi = \kappa\psi$$

Beszorozva az () operátorral az egyenletet, ezt kapjuk: $(\nabla^2 - \frac{1}{c^2}\partial_t^2)\psi = \kappa^2\psi$.

Tehát: $\kappa = mc/\hbar$

Ekkor tehát a **Dirac-egyenlet:**

$$(A\partial_x + B\partial_y + C\partial_z + \frac{i}{c}D\partial_t - \frac{mc}{\hbar})\psi = 0.$$

Dirac-egyenlet

- Tehát 4 komponensre van szükség!!! Hullámfgv. 4 komponensű...
- Spin leírásához csak 2 komponens kell!
- Itt mind a 4 komponens kielégíti a relativisztikus energia-impulzus relációt.
- Négy komponens, **két** feles spinű részecskét ír le (elektron és... antielektron!)
- α, β : 4x4-es önadjungált mátrixok, átírható a **Dirac-egyenlet** ilyen formába: $D = \beta \quad (A, B, C) = i\beta\alpha_k$

$$\left(\beta mc^2 + \sum_{k=1}^3 \alpha_k p_k c \right) \psi(\mathbf{x}, t) = i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t}(\mathbf{x}, t) \quad \alpha_i^2 = \beta^2 = I_4$$

$$\alpha_i \alpha_j + \alpha_j \alpha_i = 0$$

Ugyanez más formában:

$$\begin{pmatrix} mc^2 & c\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{p} \\ c\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{p} & -mc^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \phi_+ \\ \phi_- \end{pmatrix} = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} \phi_+ \\ \phi_- \end{pmatrix} \quad \beta = \begin{pmatrix} 1_2 & 0 \\ 0 & -1_2 \end{pmatrix}$$

Elsőfokú egyenlet!

Jelentősége: megjósolja a pozitron (antielektron) létezését, egy évvel a felfedezése előtt!

Dirac-egyenlet kovariáns formája

Vezessünk be új mátrixokat: $\gamma^0 = \beta$ $\gamma^k = \gamma^0 \alpha^k$.

Ekkor az eredeti Dirac-egyenlet
$$\left(\beta mc^2 + \sum_{k=1}^3 \alpha_k p_k c \right) \psi(\mathbf{x}, t) = i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t}(\mathbf{x}, t)$$

Átírható így:

$$\boxed{-i\hbar \gamma^\mu \partial_\mu \psi + mc\psi = 0.}$$

Ez a kovariáns alak, látszik hogy az idő és térkoordináták teljesen egyenrangúak.
A mátrixok pedig:

$$\gamma^0 = \begin{pmatrix} I_2 & 0 \\ 0 & -I_2 \end{pmatrix}, \gamma^1 = \begin{pmatrix} 0 & \sigma_x \\ -\sigma_x & 0 \end{pmatrix}, \gamma^2 = \begin{pmatrix} 0 & \sigma_y \\ -\sigma_y & 0 \end{pmatrix}, \gamma^3 = \begin{pmatrix} 0 & \sigma_z \\ -\sigma_z & 0 \end{pmatrix}.$$

Antikommutálnak: $\{\gamma^\mu, \gamma^\nu\} = 2g^{\mu\nu}$

(Házi feladat ellenőrizni!)

σ_i pedig a Pauli-mátrixok:

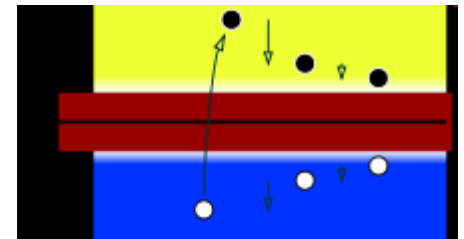
$$\sigma_1 = \sigma_x = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad \sigma_2 = \sigma_y = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix} \quad \sigma_3 = \sigma_z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

A Dirac-tenger

- A vákuum elméleti modellje, negatív energiájú részecskékkel van tele
- A pozitron a Dirac-tengerben egy lyuknak tekinthető. Olyan, mintha pozitív töltése lenne.
- Egy lyuk és egy elektron megsemmisítheti egymást. Annihiláció.
- A részecskeszám nem marad meg.
- Később, a kvantumtérelmélet (QFT) már nem teszi szükségessé a tenger feltételezését, a pozitron is valódi részecske
- Dirac szerint a lyuk = proton
- Oppenheimer: nem lehet, ui. a H-atom túl gyorsan megsemmisülne
- **1931**: Dirac: *léteznie kell* egy pozitív töltésű, de az elektronnal egyező tömegű részecskének

$$m^2 c^4 + p^2 c^2 = E^2$$

$$E = \pm mc^2.$$



Pozitron felfedezése, 1932

Carl David Anderson (Nobel-díj: 1936):

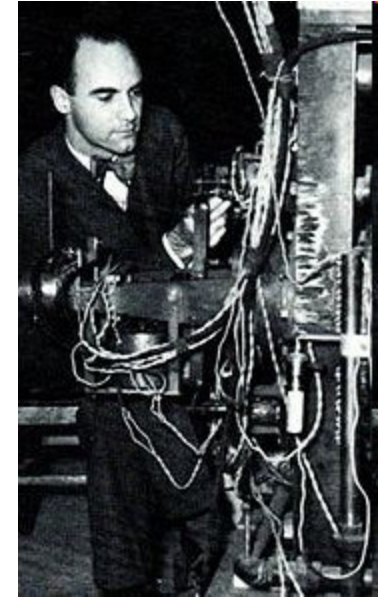
ködkamra

ólomlemezen áthaladó kozmikus sugárzás

1300 db fénykép, 15 pozitív track

mágneses tér

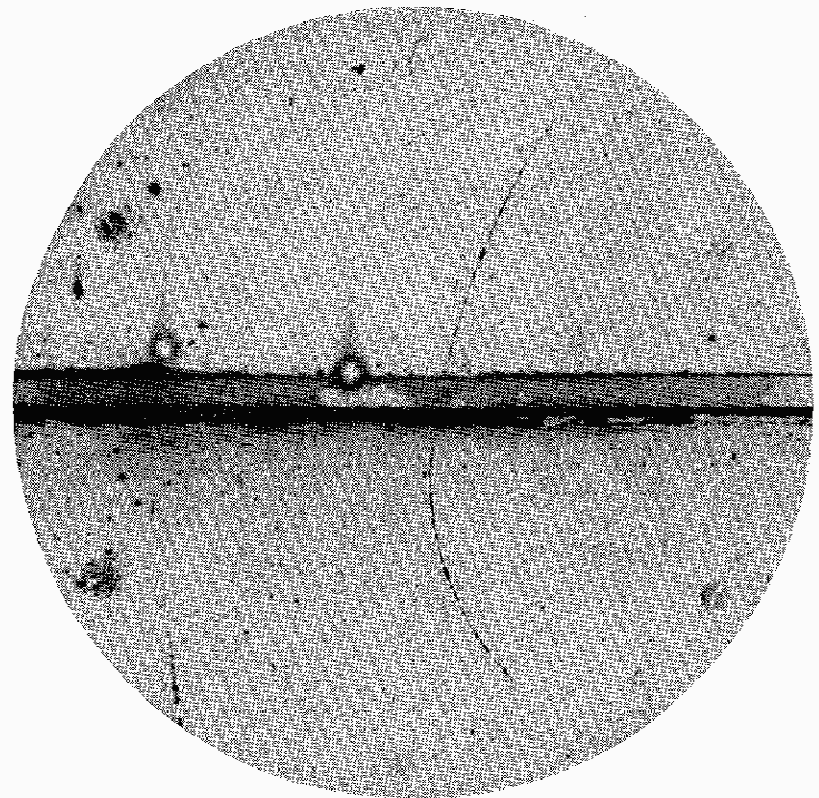
proton kizárható (Pb lemez)



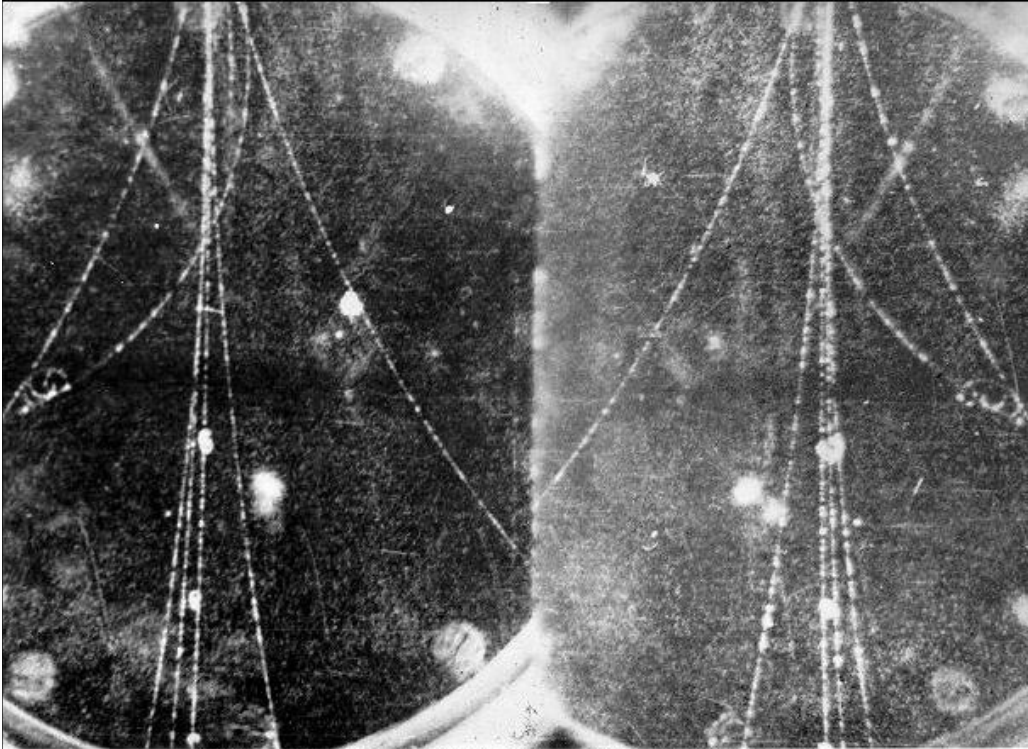
Energiavesztés, ionizáció: a töltés kb. egységnyi (proton töltés), de biztosan kevesebb mint 2 egységnyi

Görbület és ionizáció: a tömeg kisebb mint az elektrontömeg 20-szorosa!
Mindig más részecskékkel együtt látható.
Előtte már a Joliot-Curie házaspár és Chung-Yao Chao is megfigyelte, de nem ismerte fel...

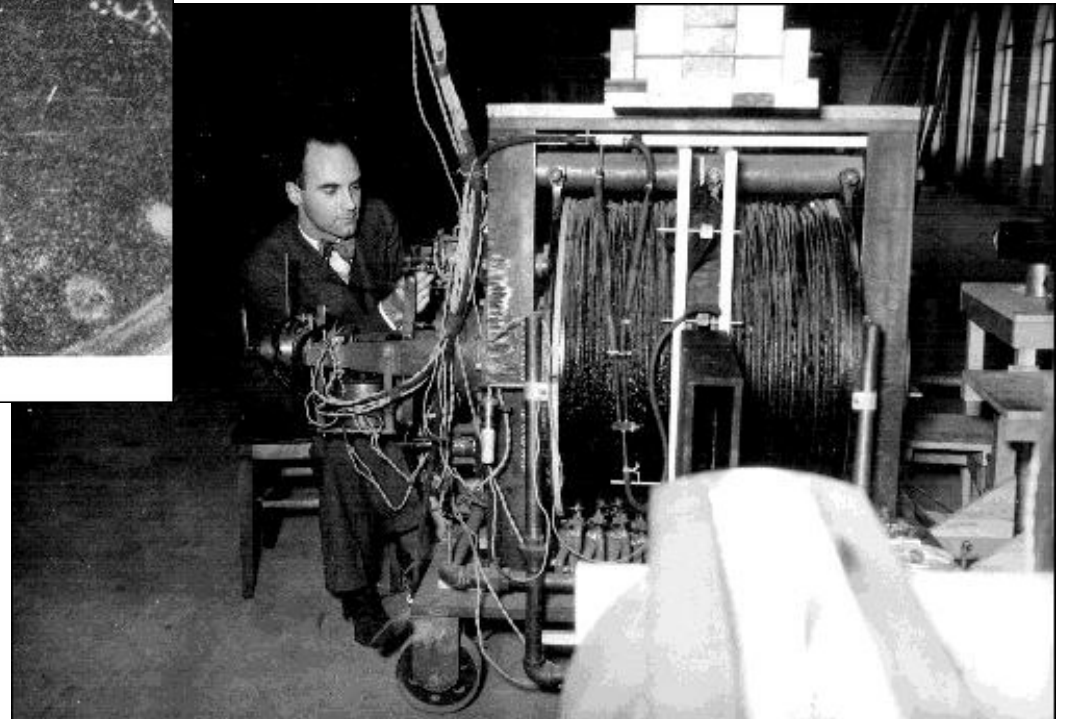
Az első ANTIANYAG –részecske!



elektron-pozitron párkeltés



© Copyright California Institute of Technology. All rights reserved.
Commercial use or modification of this material is prohibited.



© Copyright California Institute of Technology. All rights reserved.
Commercial use or modification of this material is prohibited.

Pozitron alkalmazásai

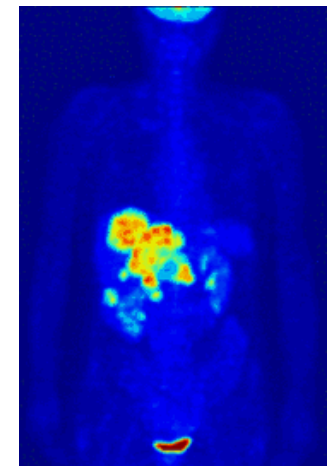
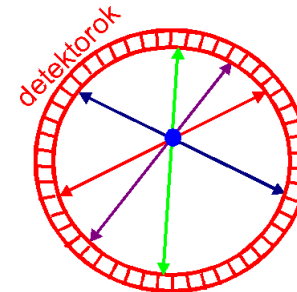
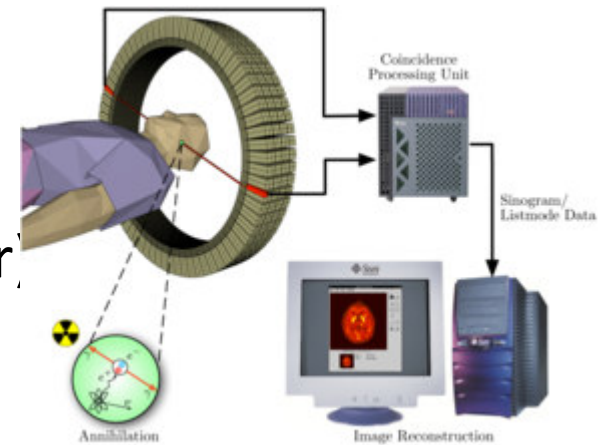
pozitronium

PET: pozitron-emissziós tomográfia
(ELTE Atomfiz. Tsz. magfizikai labor)

Antihidrogén

Kozmikus sugárzás

antirészecske:
tömeg azonos, töltés ellentétes



Pozitron annihiláció

- Szétsugárzás, elektron + pozitron
 - pozitron lelassul: ionizálja a környezetét
 - befogódik egy elektronnal egy pozitronium atomba
 - pozitronium atomban a két részecske hullámfüggvénye átfed
 - megsemmisülnek, nyugalmi tömeg eltűnik
 - az energia sugárzás formájába alakul át
 - lendületmegmaradás: két db 511 keV-es foton
 - (néha három foton, de négy, vagy öt is lehet - QED)
 - Egyfotonos annihilációhoz pl. közeli atommag kell
 - Szilárdtestfizikai vizsgálatok: az elektronok sebességeloszlása miatt a két foton nem pontosan 180 fokban repül ki, 1-2 fok eltérés mérhető