

A fizika története

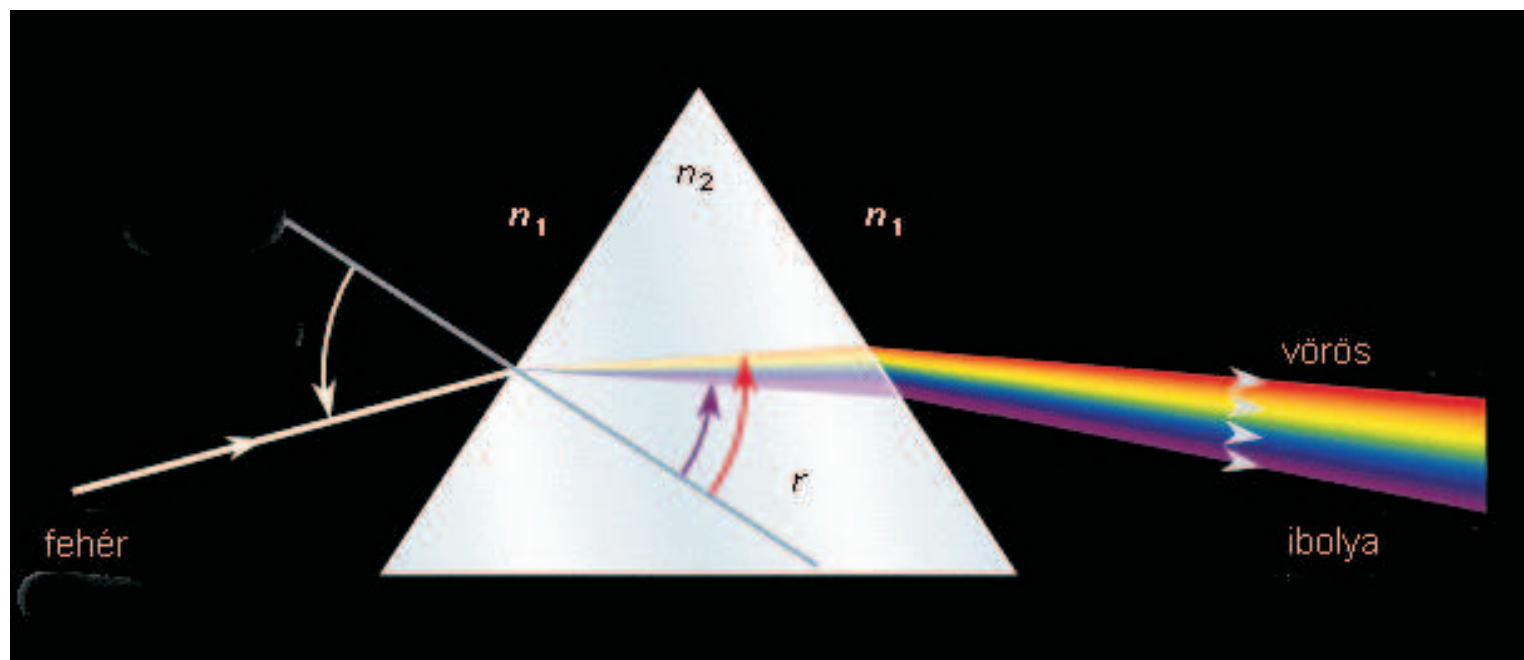
Az anyag természete

A Rutherford-féle atommodell

- az atom teljes pozitív töltése és tömegének túlnyomó része az atom teljes sugarához képest igen kicsiny magban összpontosul
- az elektronok a magtól kb 10^{-8} cm távolságban vannak
- elektronszám = magtöltésszám
- VAN DEN BROEK, 1913: magtöltésszám = rendszám
- az elmélet baja: *elektrodinamikailag nem stabilis*
 - ◆ az elektron nem lehet nyugalomban \Leftarrow belezuhanna a magba
 - ◆ az elektron nem keringhet \Leftarrow a klasszikus elektrodinamika szerint sugározna, veszítené energiájából, végül belezuhanna a magba
 - ◆ az energiavesztés következtében az elektron spirálpályán, gyorsuló frekvenciával közelítené a magot \Rightarrow folytonos színekben sugározna
 \rightarrow megfigyelt spektrumok

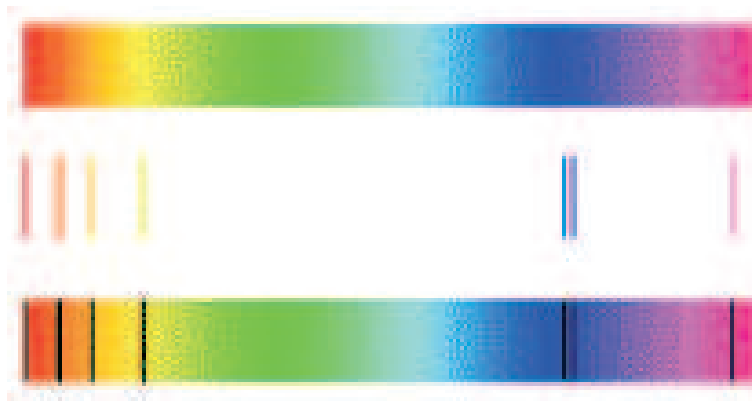
Színképek

A fehér fény színeire bontható – spektrum [*< latin spectrum* „látomás, jelenés”]



Vonalas színeképek

- WILLIAM WOLLASTON (1766–1828): a Nap spektrumában fekete vonalak észlelhetők
- JOSEPH FRAUNHOFER (1787–1826): a fekete vonalak (*Fraunhofer-vonalak*) részletes vizsgálata; a Na színeképében ott jelenik meg a sárga vonal, ahol a Nap spektrumában hiányzik



- FRIEDRICH WILHELM HERTSCHEL (1738–1829): a sók spektrumának vizsgálata alapján az anyagot föl lehet ismerni

Vonalas színeképek

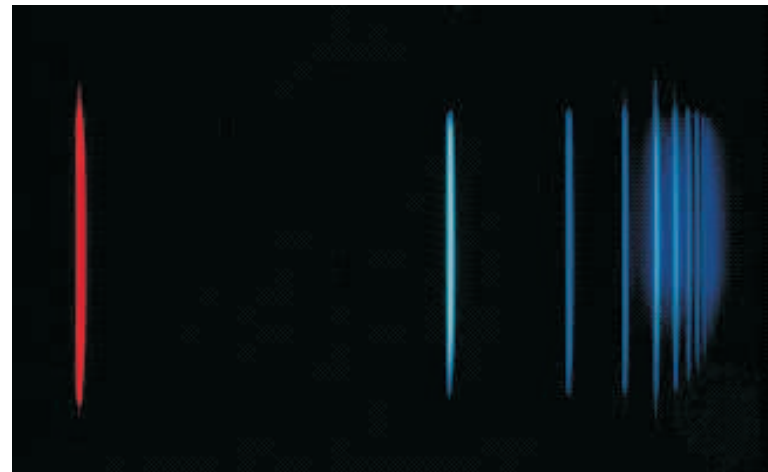
- GUSTAV ROBERT KIRCHHOFF (1824–1887) és ROBERT WILHELM BUNSEN (1811–1899): a spektrum értelmezése
 - ◆ egyes gázok vagy gőzök atomjaival energiát közölve azok a rájuk jellemző vonalas spektrumot bocsátják ki
 - ◆ ugyanezen atomok képesek a kibocsátott rezgés hullámhosszával azonos hullámhosszú fényt abszorbeálni
- 1861: a cézium és a rubídium fölfedezése
- 1866: a hélium fölfedezése
- PIETER ZEEMAN (1865–1943): mágneses térben a spektrumvonalak kiszélesednek, illetve fölhasadnak
- HENDRIK ANTOON LORENTZ (1853–1928): a Zeeman-effektus magyarázata: oszcilláló töltött részecskék által kibocsátott sugárzás; a részecskék fajlagos töltése az elméletből jó egyezést mutat a Thomson-féle e/m -mel

Vonalas színeképek

- JOHANN JACOB BALMER (1825–1898): kvantitatív összefüggések a hidrogén spektrumára

$$\lambda = B \frac{m^2}{m^2 - 4}$$

$$m \in \{3, 4, 5, 6\}$$



- JANNE ROBERT RYDBERG (1854–1919): minden színeképvonal $1/\lambda$ hullámszáma fölírható úgynevezett *termek* különbségeként

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

$$k, n \in \mathbb{N}, \quad n > k$$

Vissza az ürességhez: az éter és a relativitás

- létezik-e abszolút tér, abszolút idő és mozgás?
- az abszolút tér megtestesítője, a hatásokat (pl fény) közvetítő közeg: *éter*
- Galilei-elv: az egymáshoz képest egyenesvonalú, egyenletes mozgást végző koordinátarendszerek a mechanikai törvények szempontjából egyenértékűek
- MICHELSON és MORLEY interferométeres kísérlete: ha létezik is éter, a Föld ahhoz képesti mozgása nem kimutatható
- a fény sebessége független a forrás és a megfigyelő sebességétől
- áthidaló megoldás: a Föld magával sodorja az éter egy részét
- LORENTZ–POINCARÉ–EINSTEIN: speciális relativitáselmélet
→ éter nincs

Illusztráció: Méregövezet

„Tegyük fel – olvastam tovább –, hogy egy hajóról az Atlanti-óceán közepén néhány egymáshoz kötözött parafadugót hajítunk egy lassú áramlatba. A dugók napról napra sodródnak tovább, változatlan körülmények között. Ha a dugók értelmes lények volnának, elképzelhető, hogy öröknek és megbízhatónak vélnék ezeket a körülményeket. De mi, felsőbbrendű ismereteinkkel, tudjuk, hogy számos meglepő dolog érheti a dugókat. Nekik mehet egy hajó, vagy belebonyolódhatnak a tengeri hínárba. Akár így, akár úgy, végül bizonyosan kivetik őket a hullámok Labrador sziklás partjaira. De mit tudhatnának ők minderről addig, amíg békésen lebegnek napról napra egy hitük szerint határtalan és homogén óceánban?

Olvasóink bizonyára felfogják, hogy az Atlanti-óceán ebben a példázatban a hatalmas éteróceán helyett áll, amelyben mi sodródunk, és a dugók füzére a jelentéktelen kis bolygórendszert jelenti, amelyhez tartozunk. Egy harmadrangú nap és pár hitvány, szedettvedett bolygó – együtt úszunk naponta, azonos körülmények között valami ismeretlen vég felé, valami dicstelen katasztrófa felé, amely az űr végső határain vár ránk, ahol lezúdulunk egy éter Niagarán, vagy holmi elképzelhetetlen Labradoron vetődünk partra.”

→

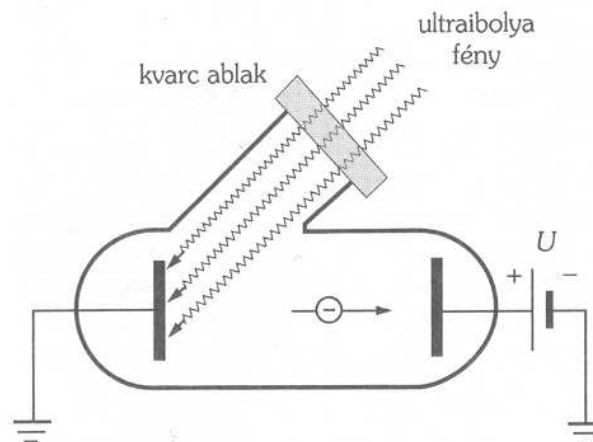
Illusztráció: Méregövezet

„A színek Fraunhofer-vonalainak elmosódása és eltolódása véleményem szerint egy bonyolult és egyedülálló jellegű, ráadásul széles körű kozmikus változásra mutat. Egy bolygó fénye a csillagból magából ered. Jelen esetben azonban mind a bolygók, mind a csillagok fényének a színekében ugyanolyan eltérés mutatkozik. Akkor hát a bolygókban és a csillagokban történt változás? Számomra ez a gondolat elfogadhatatlan. Miféle közös változás következhetne be egyidejűleg mindnyájukban? A mi légkörünk változott talán? Ez lehetséges, de a legnagyobb mértékben valószínűtlen, mivel semmi jelét sem látjuk magunk körül, és vegyelemzéssel sem sikerült ilyesmit kimutatni. Mi tehát a harmadik lehetőség? Hogy a közvetítő közegben történt a változás, abban a végtelenül finom éterben, amely csillagtól csillagig terjed, és áthatja az egész univerzumot. Mi ennek az óceánnak a mélyén sodródunk lebegve, egy lassú áramlatban.”

Sir Arthur Conan Doyle: *Méregövezet*. Tóthfalusi István fordítása

A Bohr-modell megalapozása

- MAX PLANCK (1858–1947): a feketetest-sugárzás anomáliáinak magyarázata – munkahipotézis: az oszcillátorok energiája kvantált, a $h\nu$ kvantum egész számú többszöröse (1900)
- PHILIPP LENARD (1862–1947): fényelektromos jelenség – fény hatására egy fémből kilépő elektronok energiája *nem a fény intenzitásától, hanem hullámhosszától* függ (1902)
- ALBERT EINSTEIN (1879–1955): a fényelektromos jelenség magyarázata – a fény $h\nu$ energiakvantumú *fotonokból* áll, a fémből való kilépéskor az elektron átveszi a foton energiáját (1905)

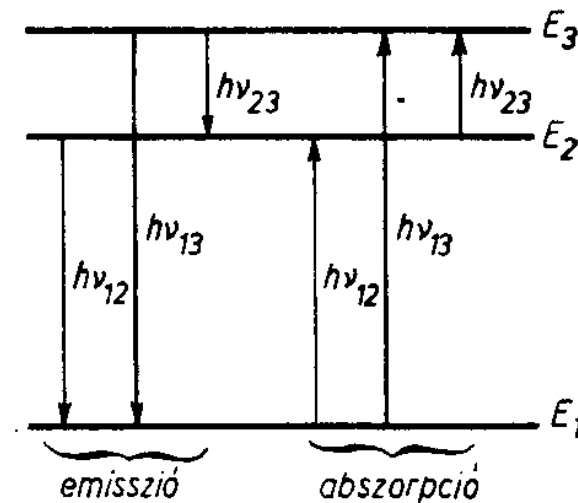


A Bohr-modell

- NIELS BOHR (1885–1962): a Planck-féle kvantumföltétel alkalmazása az elektrópályákra (1913)

- Posztulátumok:

1. Az atomban az elektronok csak meghatározott energiájú stacionárius pályákon keringhetnek. Ekkor az elektronok nem sugároznak.
2. Sugárzás emissziója vagy abszorpciója csak két stacionárius állapot közötti átmenetkor jön létre, amikor is a kibocsátott vagy elnyelt sugárzás (foton) ν frekvenciáját a két stacionárius állapot energiakülönbsége szabja meg: $h\nu = |E_n - E_m|$.



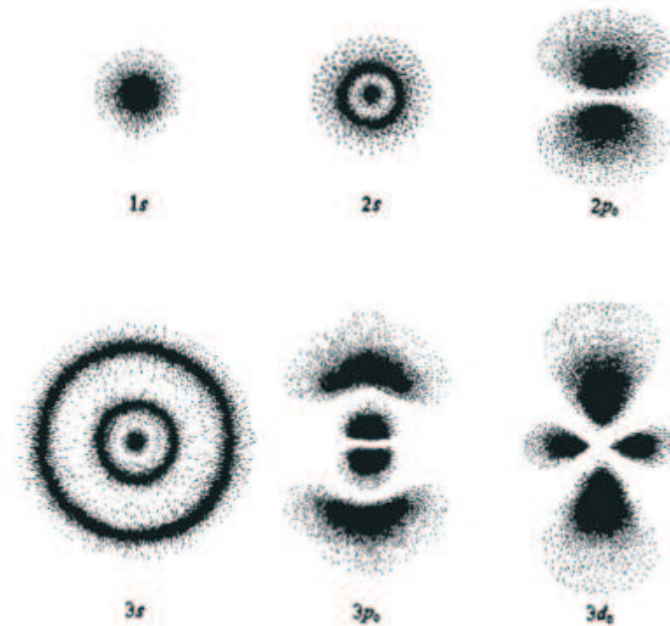
- ARNOLD SOMMERFELD (1868–1951): a Bohr-modell kiterjesztése ellipszispályákra (1915)

A kvantummechanika atomképe

- ERWIN SCHRÖDINGER (1887–1961): a kvantummechanika alapegyenlete (1926)

$$\Delta\psi + \frac{8\pi^2m}{h^2}(E - U)\psi = 0$$

- a részecske ΔV térfogatban tartózkodásának valószínűsége $|\psi|^2 \Delta V$
- elektronpályák a kvantummechanikában: az elektroneloszlás csomófelületei



A radioaktivitás fölfedezése

- WILHELM CONRAD RÖNTGEN (1845–1923): egy új sugárzás fölfedezése (1895)
 - ◆ a katódsugarak közelében a fluoreszkáló só élénken világít, pedig nem érik sugarak
 - ◆ a röntgensugarak nem téríthetők el, nem szenvednek törést, &c
 - ◆ mai magyarázat: nagyfrekvenciás elektromágneses sugárzás – az elektronok valamilyen anyagba (pl. kisülési cső fala) ütközésekor keletkezik
- HENRI BECQUEREL (1852–1908): a radioaktivitás fölfedezője (1896)
 - ◆ röntgensugárzás magyarázata: egyfajta fluoreszcencia
 - ◆ fekete papírba csomagolt fényképezőlemezre uránsó, napra kitette: a lemez elfeketedett
 - ◆ véletlen eredmény: a fiókban, fény nélkül is elfeketedett ⇒ nem fluoreszcencia, hanem az urán tulajdonsága

Radioaktivitás: a Curie-házaspár

MARIE SKŁODOWSKA-CURIE (1867–1934) és PIERRE CURIE
(1859–1906)

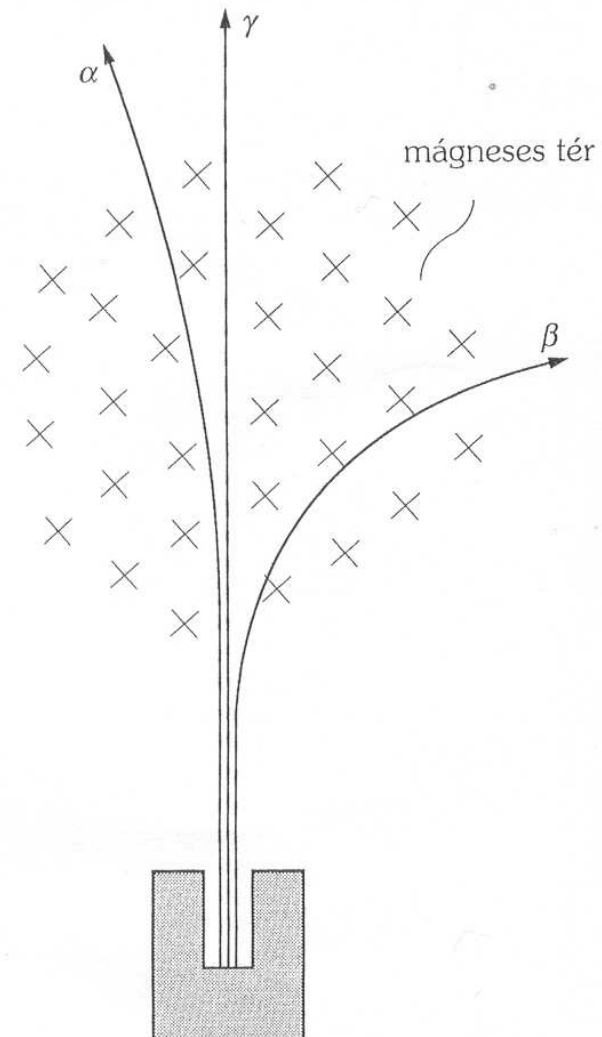
- a radioaktív sugárzás kvantitatív jellemzése ionizáló hatása alapján
- a tórium is radioaktív
- a polónium és a rádium fölfedezése (1898)
- kétféle hipotézis a radioaktivitásra
 1. az atom potenciális energia formájában rendelkezik a kibocsátott energiával →← kémiai változatlanóság
 2. a radioaktív atom a környezet energiáját alakítja át és sugározza ki →← termodinamika II. főtétele

A Curie-házaspár



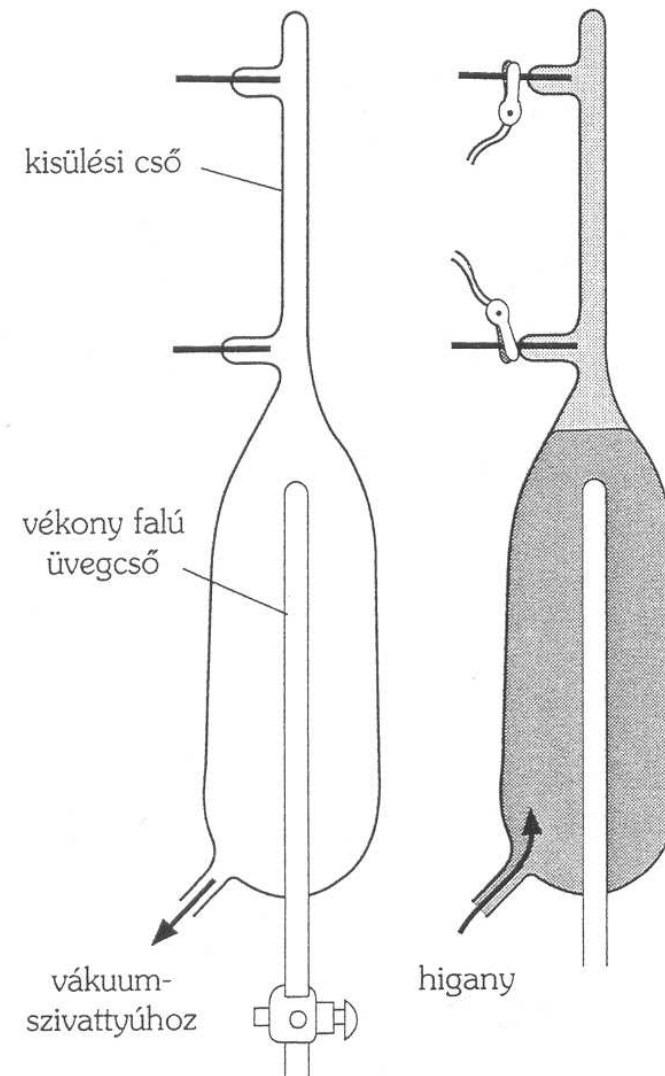
A radioaktív sugárzás alkotóelemei

- RUTHERFORD: a radioaktív sugárzás kétféle összetevője (1898) – erősen ionizáló, kis áthatolóképességű (α -sugárzás), és gyengébben ionizáló, nagyobb áthatolóképességű (β -sugárzás)
- PAUL VILLARD (1860–1934): harmadik fajta, a β -sugárzásnál is nagyobb áthatolóképességű sugárzás – γ -sugarak (1900)
- BECQUEREL: a β -sugárzás a fajlagos töltés alapján elektronokból áll



A radioaktív sugárzás alkotóelemei

- RUTHERFORD: az α -sugárzás részecskéi He-atommagok
- módszer: színeképelemzés
- γ -sugárzás: elektromágneses sugárzás



Radioaktivitás – elemátalakulás

- RUTHERFORD és OWENS: a tórium aktivitása akkor is megváltozik, ha kinyitják a laboratórium ajtaját
- vizsgálták a minta fölötti levegő sugárzását: exponenciálisan lecsengő intenzitás
- RUTHERFORD és SODDY végkövetkeztetése: radioaktív sugárzás kibocsátása során elemátalakulás megy végbe (1902)
- FREDERICK SODDY (1877–1956): az izotópok fogalmának bevezetése; kísérleti kimutatás: THOMSON és ASTON
- SODDY és KAZIMIERZ FAJANS (1887–1975) eltolódási törvénye: ha egy anyag α -bomlást szenved, a bomlástermék rendszáma kettővel, tömegszáma négyvel csökken; β -bomlásnál a rendszám eggyel csökken, a tömegszám nem változik
- RUTHERFORD: az első mesterséges magátalakítás (1919)

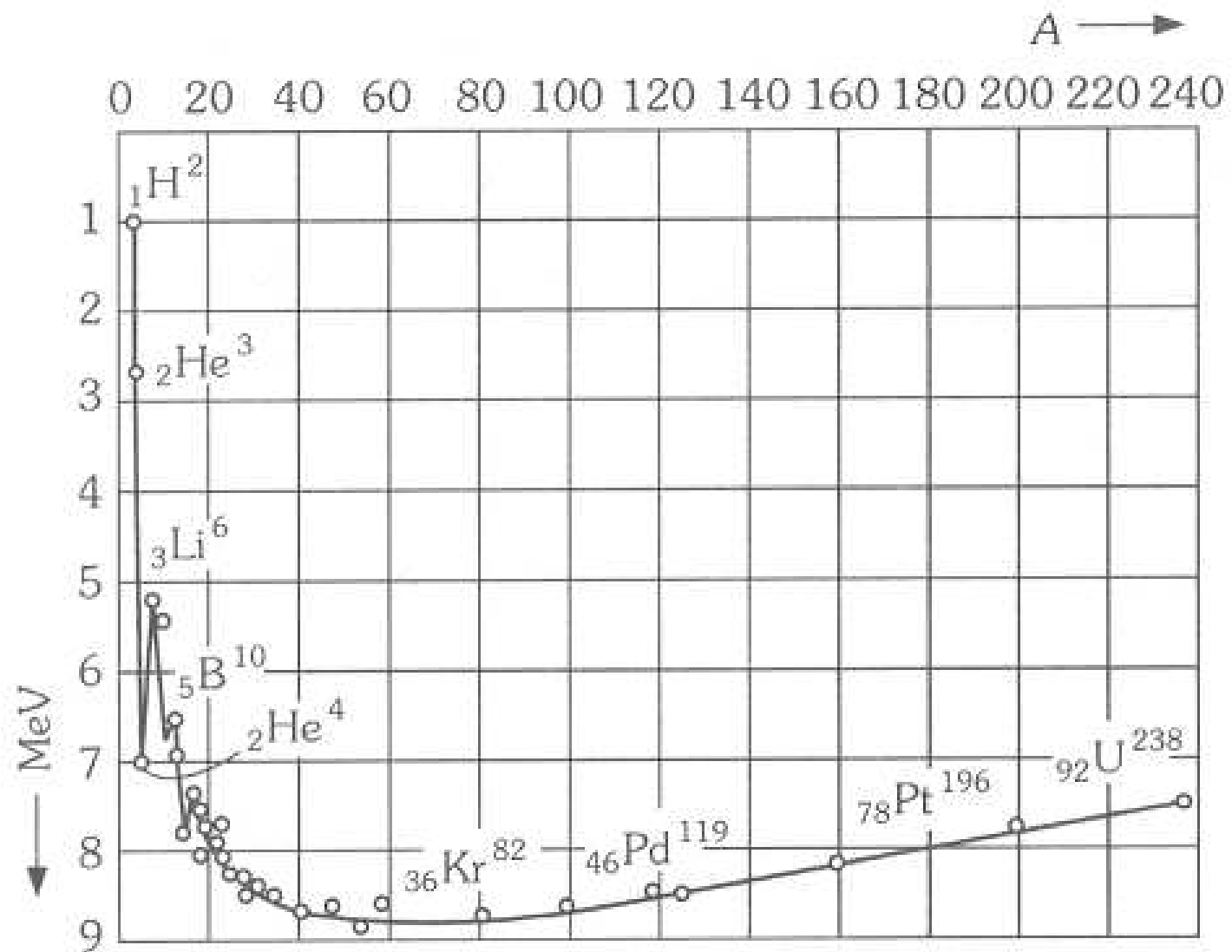


A neutron fölfedezése

- első magmodellek: a Z rendszámú és A tömegszámú atomban a periférián Z elektron, a magban A proton és $A - Z$ elektron
- a Heisenberg-féle határozatlansági reláció szerint nem lehet elektron a magban: jól lokalizált, ezért nagy impulzusszórása van, kirepülne a magból
- RUTHERFORD sejtése: léteznie kell egy protonnal kb egyező tömegű semleges részecskének
- BOTHE és GEIGER: berilliumot α -részecskékkel bombázva nagy áthatolóképességű, nem ionizáló (\rightarrow töltés nélküli) sugárzás (1930) – föltételezés: γ -sugárzás
- JOLIOT-CURIE-házaspár: mérték a föltételezett γ -sugárzás energiáját, túl nagy érték (50 MeV) adódott
- SIR JAMES CHADWICK (1891–1947): nem γ -sugárzás, hanem a RUTHERFORD által megsejtett *neutron*



Az egy nukleonra jutó kötési energia



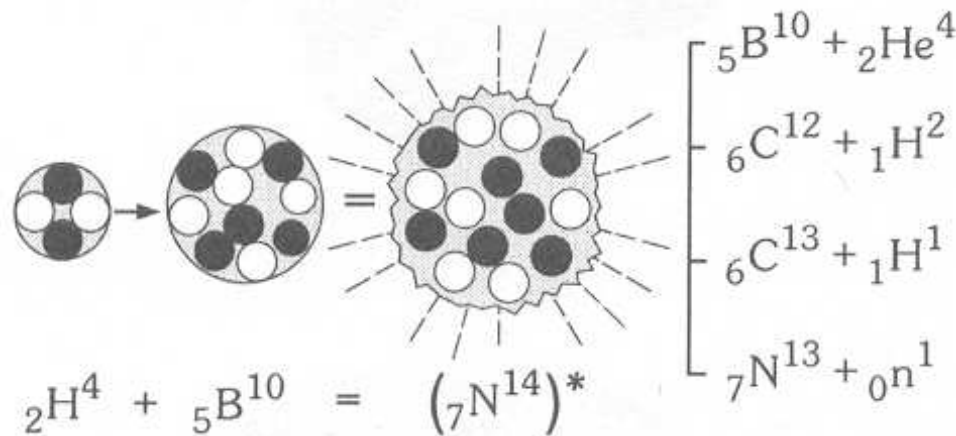
Magmodellek

- a neutron belefoglalása a magmodellekbe: a periférián Z elektron, a magban Z proton és $A - Z$ neutron
- tömegdefektus: $Zm_p + (A - Z)m_n > m_{\text{mag}}$
- $\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - m_{\text{mag}}$ a mag kötési energiájának mértéke (\rightarrow tömeg-energia-ekvivalencia)
- ELSASSER „független részecske”-modellje (héjmodell): az összes nukleontól származó közepes potenciáltérben az egyes nukleonok független mozgására fölírja a Schrödinger-egyenletet
- a modell hibája: nem jó jóslást ad a stabil magokra („mágikus számok”)
- cseppmodell: az egy nukleonra eső kötési energia és az atommag sűrűsége állandó

$$m_{\text{mag}} = Zm_p + (A - Z)m_n - \left[a_1 A - a_2 A^{2/3} - a_3 \frac{Z^2}{A^{1/3}} - a_4 \frac{(A/2 - Z)^2}{A} \pm \Omega \right]$$

Magmodellek

- BOHR „közbülső mag”-elmélete (1936): a magba lőtt lövedék behatol a magba, energiáját szétosztja a nukleonok között, majd a gerjesztett, instabil magból az energia valamilyen részecske formájában távozik \Rightarrow maghasadás

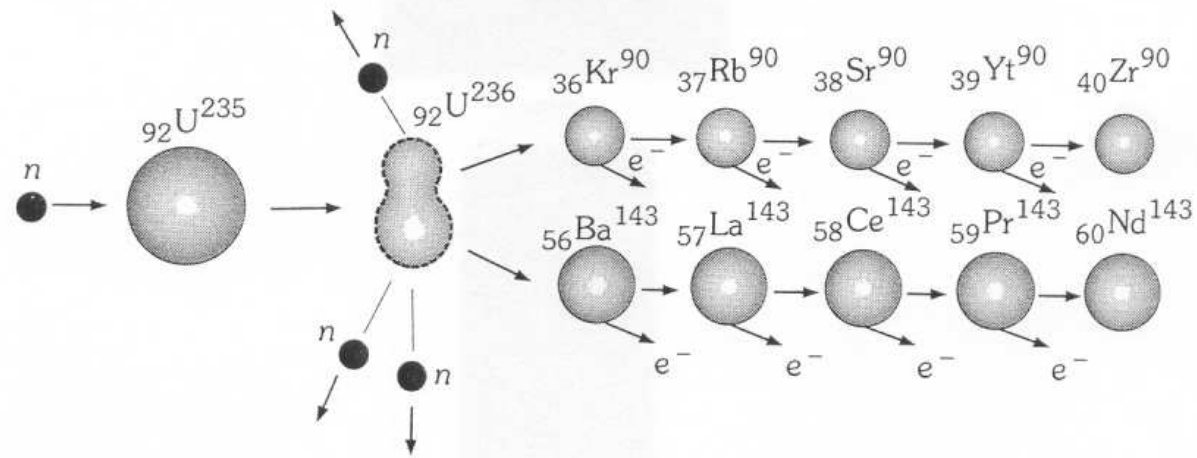


- FESHBACH, PORTER és WEISSKOPF optikai modellje (1954): a mag adott törésmutatójú gömb – a törésmutató valósrésze a részecskék szórását, a képzetes rész a részecskék befogását (abszorpció) adja meg

Maghasadás

- nehéz atommagok neutronnal bombázása: transzurán elemek létrehozása
- ENRICO FERMI (1901–1954): 92-nél magasabb rendszámú elem (1936)
- IDA NODDACK: elképzelhető, hogy az atommag neutronnal való bombázáskor széthasad nagyobb töredékekre →← valószínűtlen az alagúteffektus egy He-atomagnál nehezebb részecskére
- OTTO HAHN, LISE MEITNER és STRASSMAN: a neutronokkal bombázott urán bomlástermékei középnéhez magok (1939)
- JOLIOT, FERMI, SZILÁRD *&al* (1939): a hasadáskor neutronok is keletkeznek ⇒ LÁNCREAKCIÓ

Láncreakció



FERMI vezetésével: az első „atommáglya” a chicagói egyetem tornatermében (1942. december 2)

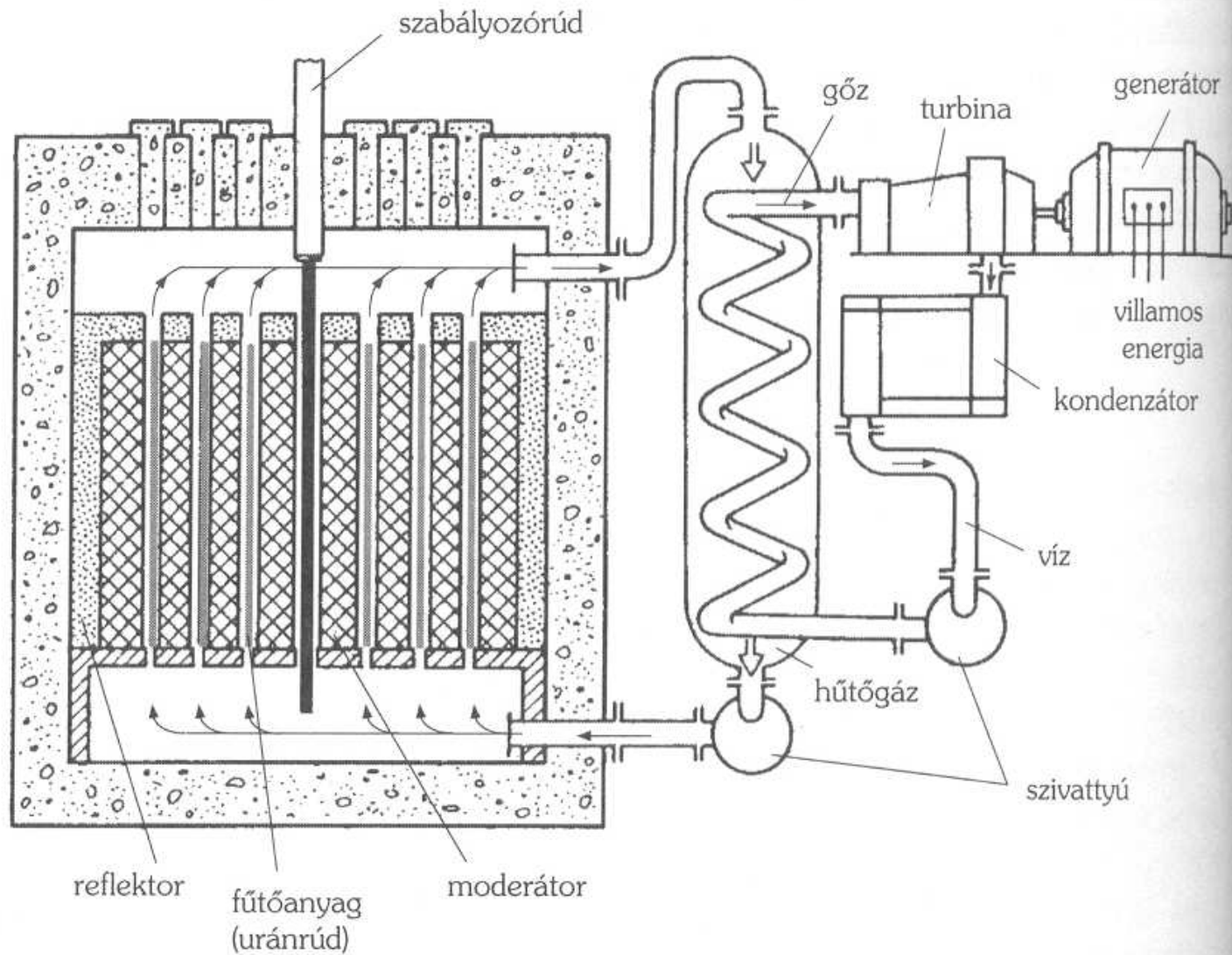
„– Jim, bizonyára érdekelni fog a hír, hogy az olasz hajós éppen most szállt partra az új világban ... a Föld nem volt olyan nagy, mint hitte, és így a vártnál előbb érkezett meg.

– Barátságosak voltak a bennszülöttek?

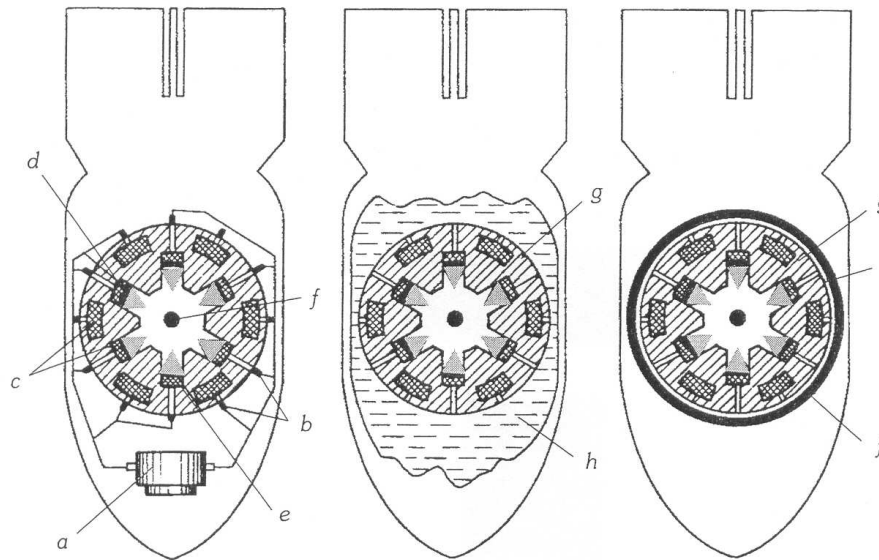
– Igen, mindenki biztonságban van.”

Telefonbeszélgetés Compton és Conant között

Atomreaktor



Atombomba



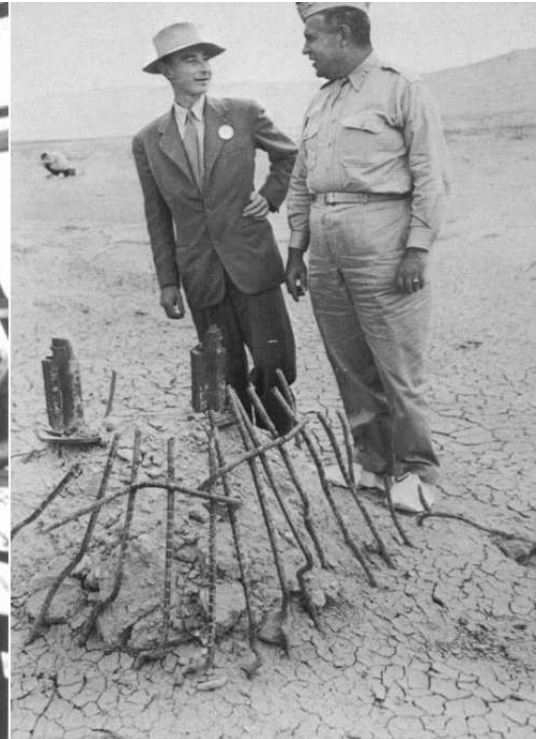
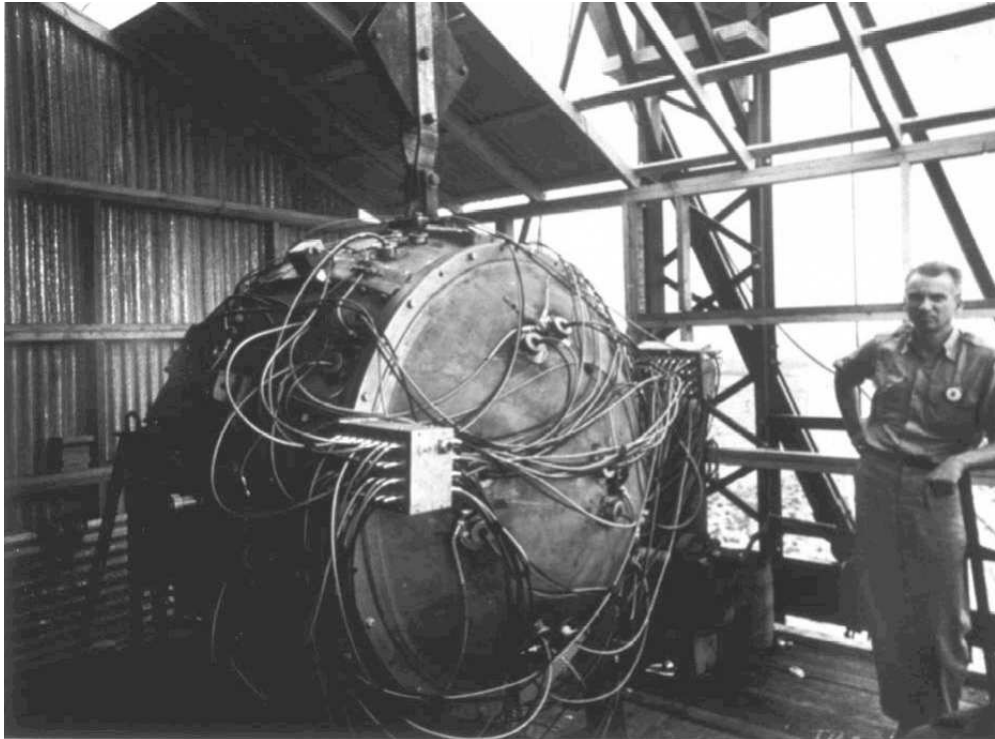
a: robbantó szerkezet; *b*: gyújtó; *c*: közönséges robbanóanyag; *d*: neutronreflektor; *e*: hasadó anyag; *f*: neutronforrás; *g*: a bal oldali ábrán láthatóval azonos uránbomba; *h*: deutérium-trícium keverék; *i*: deutérium-lítium keverék; *j*: természetes urán

- Új energiaforrás – a magfúzió: $4\text{}^1_1\text{H} \rightarrow \text{}^4_2\text{He} + 2\text{e}^+ + 26\text{ MeV}$
- a hidrogénbomba kifejlesztése: TELLER EDE (1908–2003)

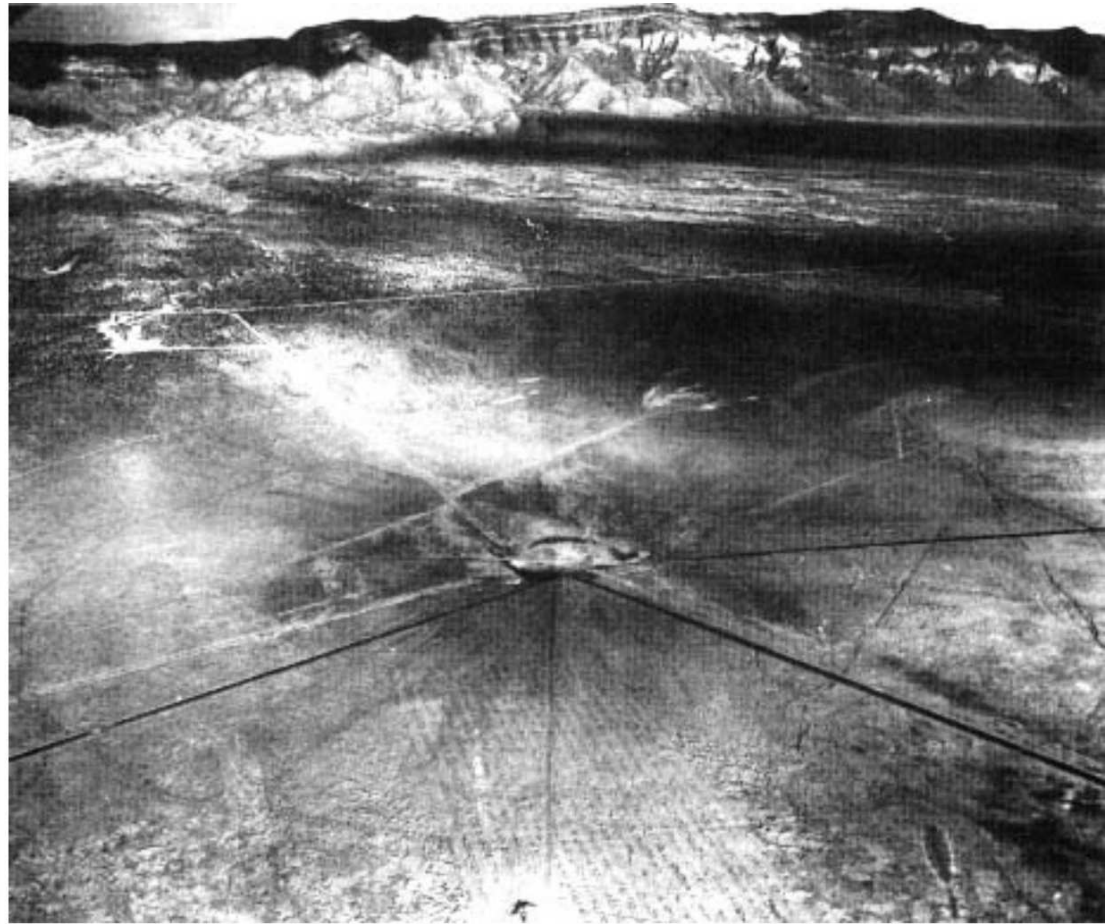
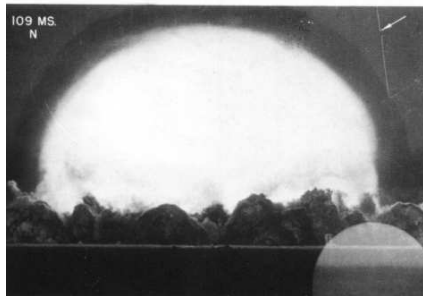
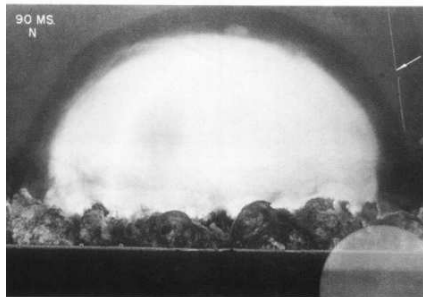
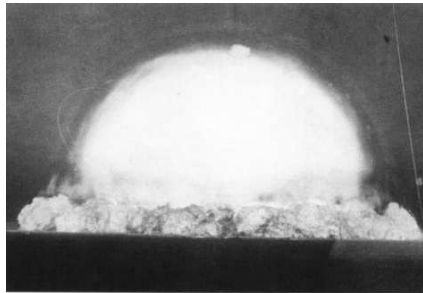
Trinity

- EINSTEIN levelei Rooseveltnél, 1939–1940 (valószínűleg SZILÁRD LEÓ sugallatára)
- beindul a *Manhattan-terv*; a kutatás vezetője: J ROBERT OPPENHEIMER; főhadiszállás: Los Alamos
- a *Trinity* kódnevű kísérleti robbantás helyszíne: Alamogordo a *Jornada del Muerto* („A Holtak Útja”) sivatagban
- *Trinity* („Háromság”) név eredete: vagy a keresztény Szentháromság, vagy Oppenheimer választása, és Brahma, Vishnu és Shiva hármasságára utal
- *The Gadget* („Szerkentyű”), 1945. július 16, 5:29:45: az első atombomba (plutóniumbomba)
- *Little Boy* („Kisfiú”), 1945. augusztus 6, Hiroshima: kb 70 000 azonnali halálos áldozat (uránbomba)
- *Fat Man* („Kövér ember”), 1945. augusztus 9, Nagaszaki: kb 45 000 azonnali halálos áldozat (plutóniumbomba)

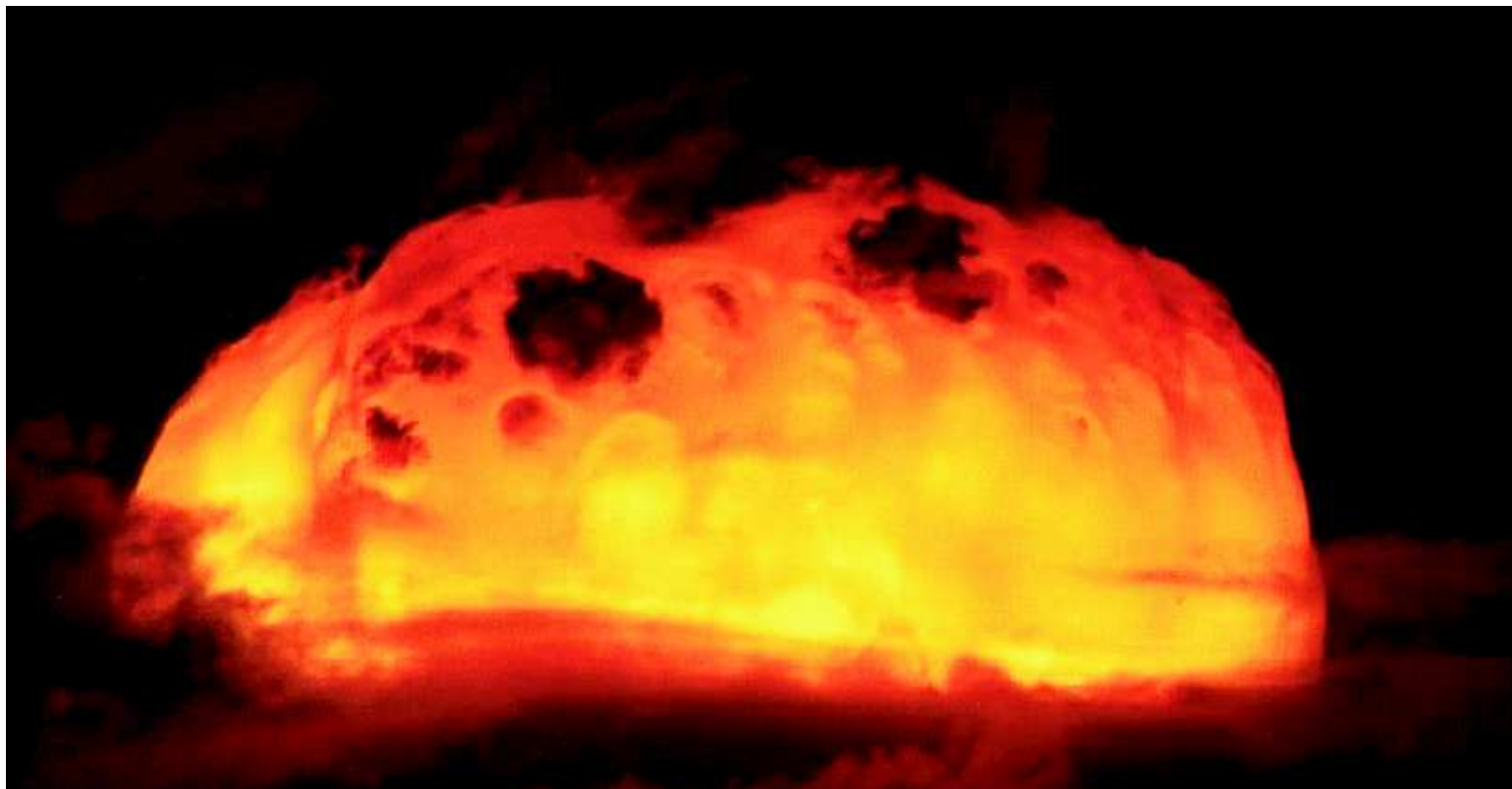
Trinity



Trinity



Világok elpusztítója



„Ha ezer meg ezer nap egyszerre lángolna fel az égen, az közelítené csak meg a Hatalmas ragyogását. ...Halál lettem, világok elpusztítója.”

Robert Oppenheimer, a *Bhagavad-gītā* (11:12 és 11:32) nyomán

A tömeg–energia-ekvivalencia

- WILHELM OSTWALD (1853–1932): „az energia az, amiben a való testet ölt”
- THOMSON: egy elektron gyorsításához szükséges erő az E energiájú elektromos térben az alábbi tömegnek felel meg (1881):

$$m = \frac{4}{3} \frac{E}{c^2}$$

- POINCARÉ: a c sebességgel haladó E energiájú sugárzás és egy m tömegű test kölcsönhatásakor az impulzusmérleg

$$p = c \frac{E}{c^2},$$

az energiának inercia tulajdonítható (1900)

- FRIEDRICH HASENHÖRL: egy dobozba E energiájú sugárzást bezárva és a dobozt gyorsítva ugyanaz a hatás, mintha a tömeg az energiával arányosan megnőtt volna (1904)

A tömeg–energia-ekvivalencia

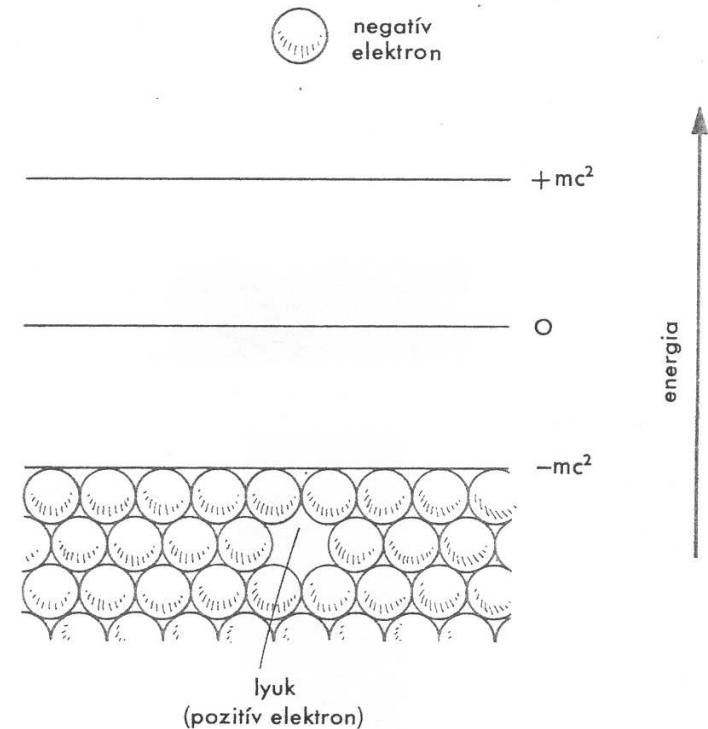
- EINSTEIN: a relativitás transzformációs formuláiból: E energia kibocsátása E/c^2 tömegcsökkenéssel jár – „*a test tömege az energiatartalmának mértéke*” (1905)

$$E = mc^2$$

- Planck: a tömeg–energia-ekvivalencia általános megfogalmazása
- a tömeg–energia-ekvivalencia szerepe a mag tömegdefektusában

Antianyag

- Paul A M Dirac (1902–1984): a Schrödinger-egyenletet relativisztikusan invariáns alakra hozta
- a szabad elektronra negatív tömegű és kinetikus energiájú megoldások is kiadódtak
- a vákuum új értelmezése: „Dirac-óceán” – negatív tömegű részecskékkel kitöltött (antianyag)
- lyuk a Dirac-óceánban: az anyag világában is észlelhető (párképződés–megsemmisülés)
- jóslás: antielektron (pozitron)



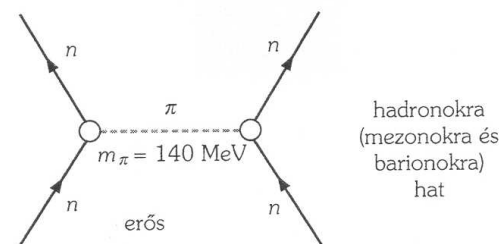
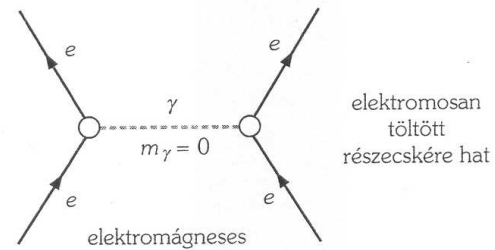
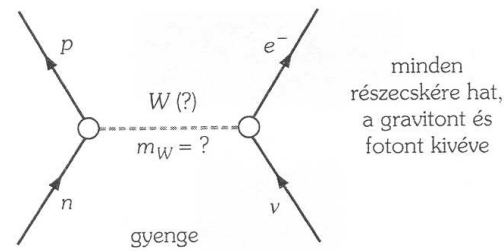
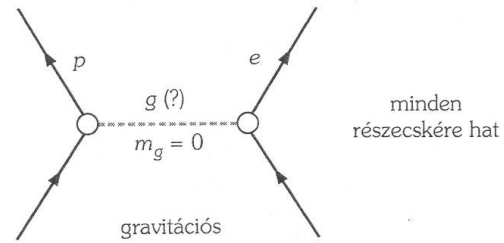
Új elemi részek

- CARL ANDERSON: a pozitron kísérleti kimutatása (1932)
- antiproton (1955) és antineutron (1956) kimutatása
- β -bomlás nagy energiaszórása – valami elviszi az energiát: *neutrino* (FERMI); kísérlettel 1955-ben
- HIDEKI YUKAWA (1907–1981): a magerőket részecskék – *mezonok* – közvetítik
- további részecskék megsejtése: szimmetriákból

FERMIONOK Spin: 1/2	
Leptonok	Kvarkok
elektron e -1 0,511	u-kvark u +2/3 5,6
elektron-neutrínó ν_e 0 0	d-kvark d -1/3 9,9
müon μ -1 105,8	c-kvark c +2/3 1350
müon-neutrínó ν_μ 0 0	s-kvark s -1/3 199
tauon τ -1 1860	t-kvark t +2/3 $2 \cdot 10^5$
tauon-neutrínó ν_τ 0 0	b-kvark b -1/3 5000

BOZONOK Spin: 1 kölsön- hatás	
foton γ 0 0	elektro- mágneses
W-bozon W_\pm ± 1 $85 \cdot 10^3$	gyenge
Z ₀ -bozon Z_0 0 $95 \cdot 10^3$	
gluon g 0 0	erős
Spin: 2	
graviton G 0 0	gravitációs

Részecskék és kölcsönhatások



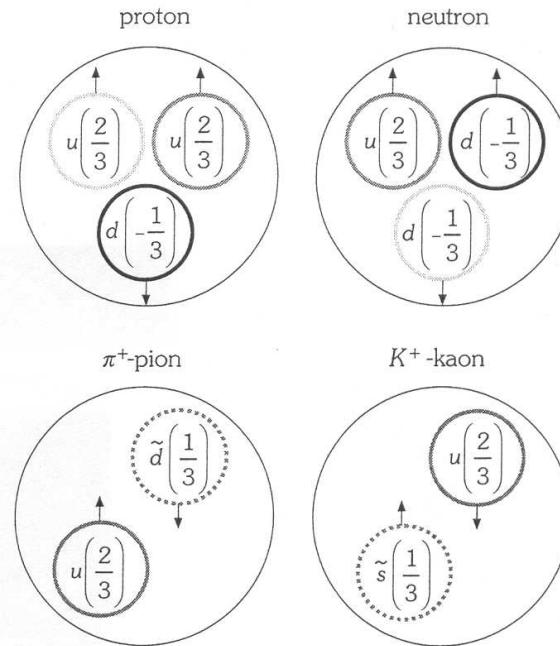
Kvarkok

*„Three quarks for Muster Mark!
Sure he hasn't got much of a bark
And sure any he has it's all beside the mark.
But O, Wreaneagle Almighty, wouldn't un be a sky of a lark
To see that old buzzard whooping about for uns shirt in the dark
And he hunting round for uns speckled trousers around by Palmerstown Park?”
James Joyce: *Finnegan's wake**

- MURRAY GELL-MANN: absztrakt szimmetriák (SU-3) arra utalnak, hogy az összes elemi részecske „még elemibb” részekre vezethető vissza

Kvarkok

	$u \triangle$	$d \nabla$	$s \circ$
I_3	$+\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	0
Q	$+\frac{1}{3}$	$-\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$
B	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{3}$
S	0	0	-1
	$\tilde{u} \blacktriangledown$	$\tilde{d} \blacktriangle$	$\tilde{s} \bullet$
I_3	$-\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{2}$	0
Q	$-\frac{2}{3}$	$+\frac{1}{3}$	$+\frac{1}{3}$
B	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$
S	0	0	+1
	K^+	K^-	K^0
	π^+	π^-	π^0
	η		
	proton	neutron	Σ^+
			Ξ
			hiperon



Vissza az *apeiron*hoz

- Meddig oszthatók az elemi részek? Mehetünk-e egyre lejjebb?
- HEISENBERG: az elemi részek egyazon „ősanyag” megvalósulásai (BORN: ANAXIMANDROSZ nyomán *apeironnak* nevezte)
- visszanyúlás PLATÓN filozófiájához: platóni szimmetrikus testek \Rightarrow a kvantumelmélet szerint az elemi részek szimmetriacsoportok ábrázolásai
- MI A SZUBSZTANCIA? (szubsztancia: a világ végső, változatlan lényege, ami önmaga oka – *causa sui*)

„A formálható meghatározó a formával szemben. Az anyag a megformálhatóság lehetősége. Egy többlépcsős folyamatban az anyag egyre »kialakultabb«, a további formálhatóság tere egyre szűkebb lesz. Ezzel egyre jobban eltűnik az anyag, a csak potenciális, nem aktualizálódott lét komponense. Nem az anyag, hanem a forma rendelkezik szubsztancialitással. A forma olyasvalami, ami a lehetőséget valósággá kényszeríti.”

HERMANN WEYL (1885–1955)

Vissza az apeironhoz

„... a mai fizika észrevehetően elmozdult Démokritosztól Platón irányába. Platónnál ugyanis a formák állnak a kezdet kezdetén. A legkisebb részek Platónnál, a matematikai formák nem szilárd, változtathatatlan adottságok. S az is egészen bizonyos, hogy a legmodernebb fizikában az anyag legkisebb végén (a legkisebb dimenziók világában) szintén matematikai formák állnak.”

HEISENBERG: Válogatott tanulmányok



„... »Kezdetben volt a szimmetria «– ez minden bizonnyal szerencsésebb kifejezés, mint a démokritoszi »kezdetben volt a részecske «. Az elemi részecskék szimmetriákat testesítenek meg; ők a szimmetriák legegyszerűbb reprezentánsai, de ugyanakkor következményei is a szimmetriának...

... És ha ezen a nyomon haladunk, máris ott vagyunk Platón filozófiájánál. Elemi részecskéinket a Platón Timaiosában szereplő szabályos testekkel hasonlítjuk össze. Ezek a mértani testek lennének az eredeti minták, az anyag ideái.”

HEISENBERG: A rész és az egész

Fölhasznált irodalom

- SIMONYI KÁROLY: *A fizika kultúrtörténete*. Budapest, 1998, Akadémiai Kiadó
- GEORGE GAMOW: *Fizika*. Budapest, 1973, Gondolat
- BUDÓ ÁGOSTON – MÁTRAI TIBOR: *Kísérleti fizika 3.* Budapest, 1992, Tankönyvkiadó