

HRASKÓ PÉTER

Epizódok a maghasadás felfedezésének történetéből¹

Lavoisier (1743–1794) és Dalton (1766–1844) óta a tudósok abban a meggyőződésben éltek, hogy az elemek állandók és megváltoztathatatlanok, nem tűnnek el és nem is keletkezhetnek. Ennek okát abban látták, hogy a különböző elemek atomjai örök életű elemi objektumok. De amikor a XX. század elején már annyi bizonyíték gyűlt össze az atomok valóságos létezéséről, hogy többé ép ésszel senki sem kétkelhetett bennük, ezzel párhuzamosan – vagy talán inkább ezzel szemben – ugyancsak vitathatatlan kísérletek bizonyították, hogy ezek az atomok nem elemi objektumok és nem is megváltoztathatatlan építőkövei az anyagnak. Felismerték az atomok planetáris szerkezetét, megértették, hogy a kémiai tulajdonságokat az elektronok száma határozza meg, ezt a számot pedig az atommag rendszáma rögzíti – és ez az atommag képes megváltozni.

A maghasadás felfedezésének drámaiságát, a tévutakat és a buktatókat csak akkor érthetjük meg, ha beleéljük magunkat a kor fizikusainak a helyzetébe, akiket ez az előbb vázolt kettősség már-már tudathasadásos állapotba hozott. Az iskolapadban még az elemek változatlanságát – az aranycsinálás lehetetlenségét – tanulták, fiatalkorukban a szemük előtt zajlott le az atomfizika diadala, de ugyanebben az időszakban a legendás Madame Curie (Maria Skłodowska, 1867–1934) megalkotta a radioaktivitás szót, ami azt fejezte ki, hogy ezek az atomok nem azok, amire számítottak, mert változhatnak és talán még az aranycsinálást is lehetővé teszik.

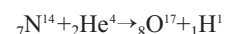
De nézzük meg a tényeket közelebbről: a radioaktivitás kizárólag a nagyon nehéz elemeket érinti, a 82-es rendszámú ólomtól kezdve a periódusos rendszer összes atomja stabil. És ezek a nehéz radioaktív elemek is csak kis lépésben változnak meg a radioaktív sugárzás

következtében: alfa-bomlásban a rendszám kettővel csökken, béta-bomlásban eggyel nő.²

Megnyugodhatunk, az atomok lényegében változatlanok, a 79-es rendszámú arany már éppen nem jöhet létre az ólomból. Mivel az atommag tulajdonságai közül a töltés és a hozzávetőleges méretén kívül egyedül a radioaktivitást ismerték, a magfizikának ebben a kezdeti szakaszában a magfizika alaptörvényének kezdték tekinteni, hogy az atommag csak kis lépésekben változhat meg. Úgy képzelték, hogy ez a törvény az atommag szerkezetének valamilyen lényegi tulajdonságát fejezi ki.

A bekövetkező fejlemények csak megerősítették a hitet ennek az alaptörvénynek a helyességében. 1919-ben Rutherford (1871–1937) megvalósította az atommag mesterséges átalakítását. Ő volt az, aki 1903-ban felfedezte az alfa-sugárzást, megállapította, hogy az alfa-részecskék kétszeresen ionizált héliumatomok. 1906-tól kezdve vizsgálta az alfa-részecskék szóródását különböző anyagokon, és 1912-ben ezeknek a ki-

sérleteknek az értelmezése kapcsán alkotta meg planetáris atommodelljét. A szórás kísérleteket ezután sem hagyta abba, és 1919-ben a



(α , p) reakcióval (α -részecskével, proton keletkezése közben) „először alakított át nitrogént oxigénné”. Ebben és az ehhez hasonló magreakciókban a magfizika alaptörvénye szintén érvényes: a nitrogén és az oxigén szomszédok a periódusos rendszerben.

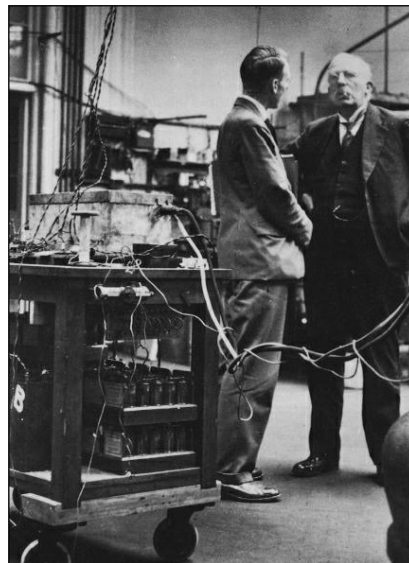
Az 1932-s év két új fundamentális részecskével gazdagította fizikai világképünket: Chadwick felfedezte a neutron (amelyet Rutherford nulla rendszámú elemként már 1920-ban megsejtett, és a „neutron” elnevezést is használta), az amerikai Anderson pedig a kozmikus sugárzásban megtalálta a pozitront, amelyet röviddel azelőtt Dirac jósolt meg elméletileg.

Itt lép be történetünkbe a híres házaspár, Frédéric Joliot (1900–1958) és Irène Curie (1897–1956). Ekkor – 1932-ben – Frédéric 32, Irène 35 éves. Párizsban,

Marie Curie laboratóriumának erkélyén, 1934-ben



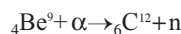
Ernest Rutherford munka közben



¹ Pécsen, a Kis Esti Fizika sorozatban elhangzott előadás.

² Emlékeztetünk rá, hogy az alfa-sugárzás héliumatommagokból, a béta-sugárzás elektronokból, a gamma-sugárzás pedig nagy energiájú fotonokból áll.

Pierre Curie utcában található Rádium Intézetben működtek és a magfizikai kutatások élvonalába tartozó kísérleteket végeztek. A házaspár szomorúan regisztrálta, hogy már mindkét részecskével találkoztak korábbi kísérleteikben, de nem ismerték fel őket. A pozitront kozmikus sugárzásban, a neutron pedig ugyanabban a



(α , n) magreakcióban „látták”, mint nem sokkal később Chadwick, de a nagy áthatólképességű neutronsugárzást gamma-sugárzásnak vélték. Elhatározták, hogy a neutronkeletkezés szempontjából szisztematikusan végigvizsgálják a könnyű elemeket. (A nehéz elemek esetében az alfa-bombázásnak kitett atommag elektromos taszítása nem engedte, hogy az alfa-részecskék behatoljanak a magba, mert abban az időben még gyorsítók nem léteztek, és csak a radioaktív bomlásban keletkező, korlátozott energiájú alfa-részecskék álltak rendelkezésre.)

Próbálkozásuk sikerrel járt, számos új, neutronemisszióval járó magreakciót fedeztek fel. Az alumínium esetében például azt találták, hogy amikor polóniumforrás alfa-részecskéivel alumíniumlemez bombáznak (ez tiszta ${}_{13}\text{Al}^{27}$ izotóp) ugyanúgy keletkeznek protonok, mint Rutherford kísérletében, de proton helyett néha neutron-pozitron pár jön létre (ezt mágneses térbe helyezett ködkamra segítségével figyelték meg). Eredményükről lelkesen számoltak be 1933 októberében Brüsszelben a 7. Solvay-konferencián.

A konferencián a magfizikai kutatások teljes élgárdája jelen volt, közöttük Lise Meitner (1878–1968) – még halunk róla –, a Joliot-éknál húsz évvel idősebb, nagy tekintélyű kutató, aki különösen gondos kísérletező hírében állt. Meitner kategorikusan kijelentette, hogy $\text{Al} + \alpha$ reakcióban „soha egyetlen neutron sem látott”. A konferencia inkább hitt Meitnernek, és a Joliot-Curie házaspár azzal a szilárd elhatározással tért vissza Párizsba, hogy véglegesen tisztázza a dolgot.

Arra gondoltak (mint utóbb kiderült, helyesen), hogy talán a bombázó α -részecske energiájától függ, jelenik-e meg a reakcióban a proton helyett néha neutron-pozitron pár, vagy sem. A kísérletet ezért többször is megismételték úgy, hogy a polóniumforrást különböző távolságra helyezték az alumíniumlemezről. Az α -részecskék ugyanis ionizálják a levegőt, ezért energiát veszítenek, és annál kisebb energiával érkezik az alumíniumlemezhez, minél messzebb van a forrás.

³ Joliot-ék ezzel egyben a radioaktivitás új típusát is felfedezték, a pozitív béta-bomlást, amely elektronki-bocsátás helyett pozitronki-bocsátással jár.



Frédéric Joliot és Irène Curie a laboratóriumában

Először kis távolságot választottak és kétséget kizárólag meggyőződtek a neutronok létezéséről. Egy bizonyosnál nagyobb távolságot választva pedig a neutronok valóban teljesen eltűntek, de legnagyobb meglepetésükre a pozitronszámláló még az alfa-forrás eltávolítása után is kezegett néhány percig. Először természetesen mérési hibára gyanakodtak, de másnap megértették, hogy új jelenséget fedeztek fel, a mesterséges radioaktivitást. Így okozkodtak: Az α -részecskében és a ${}_{13}\text{Al}^{27}$ -ben összesen 15 proton és 16 neutron van. Tegyük fel, hogy csak egy neutron repül el. Akkor a ${}_{13}\text{P}^{30}$ mag marad vissza, amely a foszfor ismeretlen izotópjá. Azért ismeretlen – fűzték tovább a gondolataikat –, mert elbomlik: kb. 2,5 pernyi felezési idő alatt pozitronemisszióval a ${}_{14}\text{Si}^{30}$ maggá alakul át. Ezt a sugárzást jelezte a pozitrondetektor elhúzódo kegyegése.

Harminc éve a radioaktivitás jelenségét még teljes homály borította – most a Rádium Intézetben már mesterségesen elő tudtak állítani sugárzó atommagot,³ amely ráadásul könnyű mag volt, és szintén eleget tett a magfizika alaptörvényének.

Ez az átalakulási séma azonban még csak feltételezés volt, nagyon hihető feltételezés, de nem bizonyosság. Joliot és Curie elhatározták, hogy kémiai úton közvetlenül is kimutatják a radioaktív foszfor jelenlétét a közelről besugárzott alumíniumlemezben.

A cél nem volt akármilyen, mert a becslések szerint foszforból nem lehetett több néhány millió atomnál (10^{15} gramm). De nem a mennyiség okozta a

fő gondot. Ramsay (1852–1916), aki 1893-ban a héliumot felfedezte, már harminc évvel korábban kidolgozott egy eljárást a nagyon kis mennyiségben jelen lévő radioaktív atomok kémiai analizésére. Bármilyen kémiai anyaggal kezeljük ugyanis ezt a kis mennyiségű sugárzó atomot tartalmazó mintát, a sugárzó atomokat mindig nyomon tudjuk követni a sugárzásuk alapján. Abból, hogy a választott kémiai anyag hatására kicsapódnak, oldatba mennek át, vagy gázzá változnak, következtethetünk a kémiai tulajdonságaikra, sőt többnyire pontosan meg is állapíthatjuk, melyik elem atomjai. Az eljárást Ramsay a rádium bomlástermékének, a radonnak a kémiai azonosítására használta. A szóban forgó ${}_{86}\text{P}^{222}$ izotóp felezési ideje azonban 3,8 nap, Joliot-ék foszforjáé pedig csupán 2,5 perc! Ennyi idő állt rendelkezésre a kémiai analízis elvégzésére.

Az intézet egyik vegyész, aki előtt Joliot felvázolta a feladatot, először dührohamot kapott, azután elvégezte a munkát. A besugárzott alumíniumlapot sósavat tartalmazó tartályba dobta és a tartályt lezárta. A sav feloldotta a lemezt, hidrogéngáz képződött, amely kipezsgett az oldatból és magával vitte a foszfort. A gáz, amelyet fordított kémcsőben gyűjtöttek össze, tovább sugározta a pozitronokat, a visszamaradt alumíniumsót figyelő számláló azonban megszűnt kattogni.

Így mesélte el a történetet Joliot, amikor 1935-ben a feleségével együtt átvette a Nobel-díjat.

Joliot-ék kísérlete után bizonyára többeknek is eszébe jutott, hogy mesterséges radioaktív izotópok előállítására sokkal alkalmasabbak a neutronok, mint az alfa-részecskék. A neutronokra ugyanis nem hat a mag elektromos taszítása, ezért talán még a legnehezebb atommagokat is képesek átalakítani sugárzó izotóppokká. A visszaemlékezésekből azonban tudjuk,⁴ sokakat visszatartott a kísérletek tényleges elvégzésétől az a körülmény, hogy az akkoriban rendelkezésre álló neutronforrások sokkal gyengébbek voltak az alfa-forrásoknál.

Enrico Fermi (1901–1954) azonban nem ilyen fából faragták. Elhatározta, hogy szisztematikusan végigvizsgálja az egész periódusos rendszert ebből a szempontból.

A *Comptes Rendus*-nek az a száma, amely Joliot-ék felfedezését tartalmazta, 1934 januárjában érkezett meg Rómába. Fermi akkor 33 éves volt, 25 éves kora

⁴ Szilárd Leó is látta, hogy „értelmes dolog volna szisztematikusan végigvizsgálni az összes elemet. Kilencvenkettő van belőlük. De persze ez egy elég unalmas foglalatosság, ezért úgy gondoltam, felhajtok valamennyi pénzt, építek egy berendezést és fölveszek valakit, aki majd ott ül és végigveszi az elemeket, egyiket a másik után”. Ez azonban jámbor óhaj maradt.



William Ramsay

óta a Római Egyetem elméleti fizika professzora, 1929-től pedig az Olasz Királyi Akadémia tagja. Nagyon szegény, vidékről Rómába került vasutas családból származott. 14 éves korában a Campo dei Fiorin, a bohápicson megvette Andrea Carfa jezsuita páter 1840-ben megjelent elméleti fizika könyvét. A nénye, Maria, így emlékszik vissza arra az időre:

Kijelentette..., hogy azonnal hozzáfog az olvasáshoz. A következő napokban tanulás közben folyton megzavartak az öcsém megjegyzései:

– Fogalmad sincs, milyen érdekes. Megtanultam az összes hullámfajta terjedését.

– Csodálatos! Megmagyarázta az égitestek mozgását!

Lelkesedése a tetőpontra hágott, amikor a tengermozgás fejezethez ért. Végül befejezte a könyvet. ...Egyszer csak oda jön hozzám:

– Tudod – mondta –, latinul van írva. Nem is vettem észre.

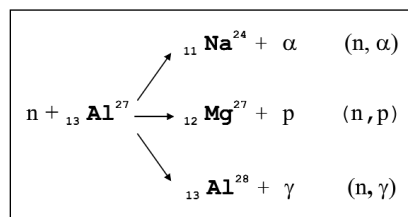
Emilio Segrè, Fermi munkatársa és életrajzírója megtalálta Fermi hagyatékában a könyvet. „Nagyon alaposan kellett tanulmányoznia – írta –, mert tele van lapszéli jegyzetekkel, hibajavításokkal, és papírszeletek is találhatók benne Fermitől származó megjegyzésekkel.”

Ferminak szerencséje is volt, mert 1921-től kezdve szárnyai alá vette a Római Egyetem fizikai intézetének igazgatója, Orso Mario Corbino. Corbino kitűnő szervező volt, akadémikus, kormánykörökben is befolyásos ember, akinek hön óhajtott célja az volt, hogy kimozdítsa az olaszországi fizikát abból a mélypontból, amelybe az első világháború után került. Fiatal tehetségeket ku-

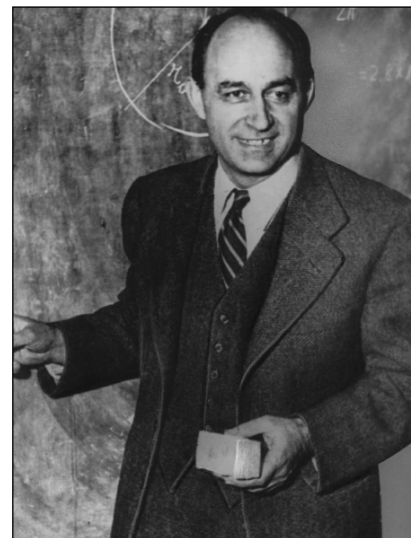
tatott fel, a legjobb helyekre küldte őket tanulni külföldön és ütőképes csapatot szervezett belőlük, amelynek vitathatatlan vezéreghényisége – a „pápa”, ahogy a többiek hívták – Fermi volt. 1934-re a csapat már jól felkészült gárdává fejlődött, és januárban, Joliot-ék munkájának a hatására elhatározták, hogy végigvizsgálják a periódusos rendszert.

A teljesen maguk készítette eszközökkel elvégzett ambiciózus kísérletsorozatban végigmentek a periódusos rendszer elemein abból a szempontból, hogy milyen radioaktivitás keletkezik bennük neutronbesugárzás hatására. Fermi szisztematikus ember volt, a legalacsonyabb rendszámú vizet (a hidrogén miatt), lítiumot, bórt, szenet sugároztak be, de nem tapasztaltak radioaktivitást. Az első pozitív eredmény a fluornál mutatkozott: néhány perces besugárzás után a műszer radioaktivitást mutatott, de csak nagyon rövid ideig, kb. 10 másodperces felezési idővel. A 60 megvizsgált elem közül 40 bizonyult radioaktívknak. A felezési idő gyakran volt nagyon rövid, ezért futva kellett átvinni a besugárzott mintát abba a lehető legtávolabbi helyiségbe, ahol az aktivitást mérték. Fermi futott a csapatból a leggyorsabban, ezért legtöbbször ő rohant végig a folyosón a mintával a kezében. Egyszer egy előkelő, sötét ruhás spanyol tudós érkezett a fizikai intézetbe, és Fermi öccellenciáját kereste – ez a megszólítás dukált az akadémikusoknak. Még mielőtt útbaigazíthaták volna, egy szürke köpenyes, kurta lábú férfi rohant neki mint az örült: Fermi öccellenciája személyesen.

A kísérletsorozat rendkívül eredményes volt. Fontos szabályszerűségeket állapítottak meg. A könnyű atommagok besugárzás után többféle módon bomlhattak: α -val, protonnal vagy γ -sugárzással. Az alumíniumnál mindhárom előfordult:



Mindhárom végtermék béta-aktív 15 óra, 5,5 perc és 2,3 perc felezési idővel. A nehezebb elemeknél, a periódusos rendszer vége felé, már csak (n, γ) reakció ment végbe – a Coulomb-gát ugyanis nemcsak befelé, hanem kifelé sem engedi át a töltött részecskéket. Ilyenkor az történik, hogy a neutron a magba befogódva a gerjesztési energiáját elektromágneses sugárzással (γ -emisszió-



Enrico Fermi

óval) adja le és a besugárzott atommag új, gerjesztetlen izotópját hozza létre, amely instabil: mivel neutronfölsége van, béta-bomlással lassan eggyel magasabb rendszámú atommá alakul át.

Amikor Fermiék eljutottak a periódusos rendszer utolsó eleméhez, a 92-es rendszámú uránhoz, ott is kíséltetett béta-sugárzást tapasztaltak. Csak arra gondolhattak, hogy a béta-sugárzás után 93-as rendszámú transzuráelem jön létre, amely a természetben nem fordul elő: ha igaz, az ismert elemek mesterséges izotópjai után sikerült egy új elemet is mesterségesen előállítani. Természetesen gondosan ellenőrizték, hogy az új béta-sugárzás forrása nem valamelyik 92-nél alacsonyabb rendszámú izotóp. A „magfizika alaptörvénye” szerint legfeljebb a 90-es tórium jöhetett számításba, de a biztonság kedvéért a vizsgálatot egészen az ólomig (82-es rendszám) elvégezték, és megmutatták, hogy a sugárzás nem származhat olyan elemről, amelynek rendszáma 82 és 92 közé esik. Csak ezután, 1934 júniusában küldték be a *Nature* nevű tekintélyes angol folyóiratba a *Possible production of elements of atomic number higher than 92* című dolgozatukat.⁵

Az új elem előállítása, persze, igazi szenzáció volt, de tudományos szempontból jelentősebbnek ígérkezett az (n, γ) reakció domináns szerepének a felismerése. Az ok a következő: az atommag valódi nagyságát akkor már jól ismerték és a bombázó neutronok energiája alapján könnyen kiszámították, hogy a neutron mintegy 10^{-21} másodperc

⁵ 92-nél magasabb rendszámú elemek valószínű előállítása.

AZ ELEMEK PERIÓDUSOS RENDSZERE

relatív atomtömeg — 26,98
vegyjel — Al
rendsám — 13 — az elektronok eloszlása az energiaszinteken

Alumínium

s-elemek		d-elemek										p-elemek																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	VIII	I	II	III	IV	V	VI	VII	0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
K	L	M	N	O	P	Q											R	S	T	U	V	W	X	Y	Z																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287	288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323	324	325	326	327	328	329	330	331	332	333	334	335	336	337	338	339	340	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361	362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	376	377	378	379	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390	391	392	393	394	395	396	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	411	412	413	414	415	416	417	418	419	420	421	422	423	424	425	426	427	428	429	430	431	432	433	434	435	436	437	438	439	440	441	442	443	444	445	446	447	448	449	450	451	452	453	454	455	456	457	458	459	460	461	462	463	464	465	466	467	468	469	470	471	472	473	474	475	476	477	478	479	480	481	482	483	484	485	486	487	488	489	490	491	492	493	494	495	496	497	498	499	500	501	502	503	504	505	506	507	508	509	510	511	512	513	514	515	516	517	518	519	520	521	522	523	524	525	526	527	528	529	530	531	532	533	534	535	536	537	538	539	540	541	542	543	544	545	546	547	548	549	550	551	552	553	554	555	556	557	558	559	560	561	562	563	564	565	566	567	568	569	570	571	572	573	574	575	576	577	578	579	580	581	582	583	584	585	586	587	588	589	590	591	592	593	594	595	596	597	598	599	600	601	602	603	604	605	606	607	608	609	610	611	612	613	614	615	616	617	618	619	620	621	622	623	624	625	626	627	628	629	630	631	632	633	634	635	636	637	638	639	640	641	642	643	644	645	646	647	648	649	650	651	652	653	654	655	656	657	658	659	660	661	662	663	664	665	666	667	668	669	670	671	672	673	674	675	676	677	678	679	680	681	682	683	684	685	686	687	688	689	690	691	692	693	694	695	696	697	698	699	700	701	702	703	704	705	706	707	708	709	710	711	712	713	714	715	716	717	718	719	720	721	722	723	724	725	726	727	728	729	730	731	732	733	734	735	736	737	738	739	740	741	742	743	744	745	746	747	748	749	750	751	752	753	754	755	756	757	758	759	760	761	762	763	764	765	766	767	768	769	770	771	772	773	774	775	776	777	778	779	780	781	782	783	784	785	786	787	788	789	790	791	792	793	794	795	796	797	798	799	800	801	802	803	804	805	806	807	808	809	810	811	812	813	814	815	816	817	818	819	820	821	822	823	824	825	826	827	828	829	830	831	832	833	834	835	836	837	838	839	840	841	842	843	844	845	846	847	848	849	850	851	852	853	854	855	856	857	858	859	860	861	862	863	864	865	866	867	868	869	870	871	872	873	874	875	876	877	878	879	880	881	882	883	884	885	886	887	888	889	890	891	892	893	894	895	896	897	898	899	900	901	902	903	904	905	906	907	908	909	910	911	912	913	914	915	916	917	918	919	920	921	922	923	924	925	926	927	928	929	930	931	932	933	934	935	936	937	938	939	940	941	942	943	944	945	946	947	948	949	950	951	952	953	954	955	956	957	958	959	960	961	962	963	964	965	966	967	968	969	970	971	972	973	974	975	976	977	978	979	980	981	982	983	984	985	986	987	988	989	990	991	992	993	994	995	996	997	998	999	1000

*Az elemek ideiglenes elnevezése
-104 Rf—Rutherfordium - 104 Ku—Kurchatovium
-105 Ha—Hanium - 105 Ns—Nielsbohrium

f-elemek		138,91	140,12	140,91	140,91	145	150,4	151,96	157,25	158,93	162,50	164,93	167,26	168,93	173,04	174,97
LANTANOIDÁK		La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
AKTINOIDÁK		Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

A periódusos rendszer

alatt repül keresztül a magon. Ennyi idő állt rendelkezésre a reakció „lebonnyolítására”, de ennyi idő sehogyan sem elég ahhoz, hogy a gerjesztési energia elektromágneses sugárzássá alakuljon. Az atomok elektromágneses sugárzását akkor már nagyon jól ismerték és ebből kiindulva meg tudták becsülni a kisugárzásához szükséges időt, ami 10^{-16} másodperc körülinek adódott. A következő, 1935-ös év során az is kiderült, hogy a magok γ -kisugárzásának ugyanolyan rezonanciaszerkezete van, mint amilyenek a fénylő gázok spektrumvonalai: a befogás csak elég jól meghatározott (rezonáns) neutronenergiáknál következik be. A ΔE rezonanciaszélesség ismeretében egyszerűen kiszámítható az élettartam,⁶ amelyből szintén 10^{-16} másodperc körüli érték jött ki.

Ezek a tapasztalati tények vezették el 1936 januárjában Niels Bohrt (1885–1962) a *közbenső* (vagy *kompaund*) mag fogalmához. A magreakció lefolyását eszerint a felfogás szerint úgy kell elképzelni, hogy amikor a neutron elkezd ütközni a mag nukleonjaival, elosztja közöttük az energiáját úgy, hogy már egyiknek sincs elég energiája ahhoz, hogy kirepüljön. Ennek a gerjesztett rendszernek, amelyet Bohr fölmelegített folyadékcepphez hasonlított, már elég ideje van ahhoz, hogy elektromágneses sugárzással szabaduljon meg a gerjesztési energiájától.

De térjünk vissza 1934 nyarához, amikor Fermiék a tudományos világ elé tár-

⁶ A $\Delta E \cdot \Delta t = h/2\pi$ reláció segítségével.

ták kísérletsorozatuk eredményeit. Nyár végén Fermi előadást tartott Londonban egy nemzetközi fizikuskonferencián az (n, γ) reakcióról. Röviddel az előadás után azonban táviratot kapott Rómában maradt munkatársaitól, Amalditól és Segrétől, amelyből megtudta, hogy a kísérlet időközben megismételték az alumíniummal, és *nem tapasztaltak gamma-sugárzást*. Fermi természetesen kényes volt a reputációjára és miután hazament, a csapat részletes vizsgálatnak vetette alá a kísérlet körülményeit. Megdöbbentő eredményre jutottak: *amikor az alumíniummal besugárzását faasztalon végezték, akkor volt (n, γ) reakció, amikor márványasztalon végezték, nem volt*. Úgy látszott, hogy az eredmény attól is függ, milyen anyagok vannak nagyobb mennyiségben jelen a neutronforrás közelében. Mindenféle anyaggal megpróbálkoztak, és kiderítették, hogy a paraffin az, amely a leghatékonyabban segíti elő a gamma-sugárzás megjelenését – amikor a neutronforrás közelébe paraffintömböt tettek, a γ -számláló vadul csörögni kezdett.

Akik a fizikai intézetben tartózkodtak, elmesélték, milyen feljázott állapotba került a Fermi-gárda azon a délelőttön. Ilyen felkiáltásokat hallottak: Ez csoda! Teljesen hihetetlen! Fekete mágia! De Fermi akkurátus ember volt, a napirendjén még ezen a napon sem változtatott. A megszokott időben ment haza ebédelni és jött vissza délután az intézetbe – de már a magyarázattal.

– A különös jelenség két okra vezethető vissza – mondotta. Az egyik a kísérlet körülményeire, a másik a besugárzott atommagra vonatkozik:

a) A neutronok rugalmas golyókként ütközhetnek a forrás közelében lévő tárgyak atommagjaival és egy ütközésben annál több energiát veszítenek, minél kisebb a különbség az ütköző partnerek tömege között. Amikor biliárdozásnál a játékos fehér golyója telibetalálja a nyugvó piros golyót, egész energiáját átadja neki és ő maga megáll. Ha a piros golyó tömege nagyobb volna a fehérenél, az energiának csak egy részét tudná felvenni, annál kevesebbet, minél nagyobb a golyók tömegkülönbsége. Ebből már látható, hogy a neutronok olyan közegben veszítik el leggyorsabban az energiájukat, amelyekben sok hidrogén van – a proton tömege ugyanis majdnem pontosan egyenlő a neutronéval.

b) De ez még nem elég. Minél lassúbb a neutron, annál hosszabb ideig tartózkodik az atommag közelében, ezért feltételezhető, hogy annál intenzívebben lép vele kölcsönhatásba, annál több γ -foton jön létre. Ahhoz, hogy a neutron egy protont „kiüssön” a magból, rövid idő is elég, az elektromágneses sugárzás létrejöttéhez azonban időre van szükség.

Este Amaldiéknál már írták is a közleményt. Világosan értették, hogy nemcsak lebilincselően érdekes jelenségre bukkantak, hanem új eszközt is adtak a magreakciókkal foglalkozó kutatók kezébe, mert a neutronok lelassítása hatalmasan megnövelte a neutronforrások hatékonyságát a magreakciók kiváltása tekintetében. Ma már tudjuk, hogy a jelenség elsőrendű fontossága az atomenergetika szempontjából is.

Négy évvel később, 1938. december 10-én Fermi átvehette a fizikai Nobel-díjat, amelynek hivatalos indoklása szerint a kitüntetését „új radioaktív anyagok felfedezéséért az elemek széles tartományában és a lassú neutronok szelektív hatásának ezzel egyidejű felfedezéséért” kapta meg.⁷

De miért hiányzik az indoklásból a 93-as rendszámú új elem felfedezése? A Nobel-bizottság jó ösztönrel mulasztotta el, hogy külön utaljon rá, mert ez a felfedezés még tartogatott meglepetéseket. Ezekre térünk most át.

Megint 1934-ben vagyunk, néhány héttel a neutrontermalizáció felfedezése előtt, az (n, γ) zúrvavar kellős közepén. Szeptemberben a *Zeitschrift für Allgemei-*

ne *Chémie* nevű tekintélyes folyóiratban megjelent Ida Noddack (1896–1978) munkája „A 93-as elemről” lakonikus címmel. Noddack ismert kémikus volt, 1925-ben a férjével ő állított elő először tiszta állapotban réni-umot. A cikkében élesen bírálja Fermi munkáját: „Fermi bizonyítékai nem fogadhatók el.” Miért áll meg az ólomnál? „Az új radioaktív elemet az összes ismert elemmel össze kellett volna hasonlítani.” A múltban csupán olyan elemekkel volt dolgunk, amelyek a radioaktív bomláskor csak kissé változtatták meg a helyüket a periódusos rendszerben, de „amikor nehéz atommagokat bombáznak neutronokkal, elképzelhető, hogy az atommag néhány könnyű fragmentumra hasad szét, amelyek természetesen ismert elemek izotópjai, de az uránnak nem szomszédai a periódusos rendszerben”.

A dolgozat, amely a „magfizika alaptörvényét” vonta kétségbe, nem keltett különösebb feltűnést se a vegyészek, se a fizikusok között. Egyszerűen kukacoskodásnak tekintették. Maga Fermi azonban komolyan vette. Legalább hárman tanúsítják, hogy Fermi számításokat végzett a Noddack által fölvetett hasadási folyamat valószínűségének becslésére és elhanyagolhatóan kicsinek találta. A három visszaemlékező egyike Teller Ede, aki szerint Fermi számítása teljesen korrekt volt, és csak azért adott elhanyagolhatóan kis valószínűséget, mert még



Ida Noddack

nem ismerték elég pontosan az atommagok tömegét. Ennél azonban valószínűbbnek látszik, hogy hiába számított Fermi kvantummechanikai ügyekben csalhatatlannak (ezért hívták tréfásan pápának), az atommag szerkezetéről akkoriban még szinte semmit sem tudtak. Ezért csak olyan általános jellemzőkre támaszkodhatott, mint a méret, a töltés, a tömeg, és valamilyen feltevéseket kellett tennie a hasadás elképzelhető mechanizmusára vonatkozóan, amelyek nem biztos, hogy helyesen tükrözték a valóságot.

Mindent összevéve Noddack cikke egyáltalán nem befolyásolta a további fejleményeket. A transzuránokkal kapcsolatos kutatások azonban nem álltak le, mert az urán neutronbefogását követő különféle sugárzások olyan kusza halmozatot alkottak, amelyben feltétlenül rendet kellett teremteni még akkor is, ha a „magfizika alaptörvényét” nem kérdőjelezték meg.

Két tekintélyes kutatócsoport fogott hozzá a tisztázáshoz. Az egyik csoportnak, amely a Berlin melletti Dahlemben, a Vilmos Császár Kémiai Kutatóintézetben (KWI) működött, Lise Meitner, Otto Hahn (1879–1968) és Fritz Strassmann (1902–1980) volt a tagja. Meitner és Hahn kisebb-nagyobb megszakításokkal 1908 óta dolgozott együtt Dahlemben (1912-ig egyikük sem kapott fizetést). A fizikus Meitner és a vegyész Hahn jól kiegészítette egymást, és számos jelen-

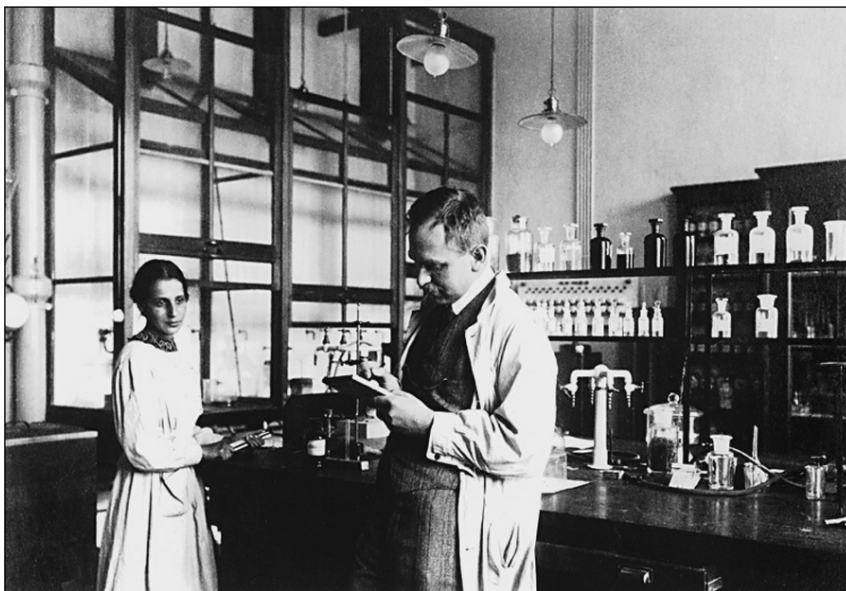
tős tudományos eredményt értek el közös munkával. Egyebek között a belső konverzió és a magizoméria felfedezése fűződik a nevükhöz, és 1917-ben ők azonosították először a periódusos rendszerben az uránt megelőző elemet – a protaktíniumot, ahogy elnevezték –, amelybe előttük már többeknek beletört a bicskjája.

Meitner Bécsben született 1878-ban, ott járt egyetemre matematika–fizika szakra, és Boltzmanntól (1844–1906) tanulhatta a fizikát. Boltzmann halála után elhatározta, hogy néhány szemeszterre Berlinbe utazik – harmincegy évig maradt ott. 1912-ben Max Planck (1858–1947) asszisztense lett. Az I. világháború kitörésekor azonban sürgősen visszatért Bécsbe és jelentkezett a hadseregbe. Röntgentechnikusként és nővérként dolgozott először az orosz, majd az olasz és ismét az orosz fronton. 1916-ban leszerelt, visszatant Dahlemben, ahol professzorként a fizikai részleget vezette.

1934-ben Meitner rábeszélte Hahnt, aki az intézet igazgatója volt, hogy indítsanak közös programot a transzuránokkal összefüggő problémák tisztázására. 1935-ben csatlakozott hozzájuk Strassmann. 1938-ig tíz különböző felezési idejű radioaktivitást azonosítottak a lassú neutronokkal besugárzott uránmintában, sokkal többet, mint úttörő munkájukban Fermiék. A hipotézisük az volt, hogy ezek vagy különféle uránizotópok, vagy transzuránok sugárzásai. Ezt próbálták fizikai és kémiai módszerekkel igazolni, de egyre nagyobb akadályokba ütköztek.

Velük párhuzamosan Párizsban Irène Curie és egy jugoszláv vendégkutató, Pavel Szavics foglalkozott ugyanezzel a problémával. Azonosítottak egy olyan, 3,5 óra felezési idejű aktivitást, amelyet a dahlemiek nem láttak, és úgy gondolták, hogy tóriumtól (${}_{90}\text{Th}^?$) származik. Ha igaz, ez azt jelentené, hogy egy lassú neutron képes egy alfa-részecskét kilökní az uránmagból, ami a Coulomb-gát miatt elég hihetetlennek látszott. A berliniek sikertelenül próbálták megtalálni ezt az aktivitást és felszólították a párizsiakat, hogy vonják vissza a közleményüket. Ezek azonban újftent igazolták az aktivitás létezését, de közben pontosították az eredetét. Megállapították, hogy olyan anyagtól származik, amely a lantánnal (${}_{57}\text{La}$ ritka földfém) csapódik ki a besugárzott uránmintából, ezért kémiaiilag a lantánnal kell rokonságban lennie.⁸ Eszerint inkább aktínium

Lise Meitner és Otto Hahn Berlinben, az 1920-as években



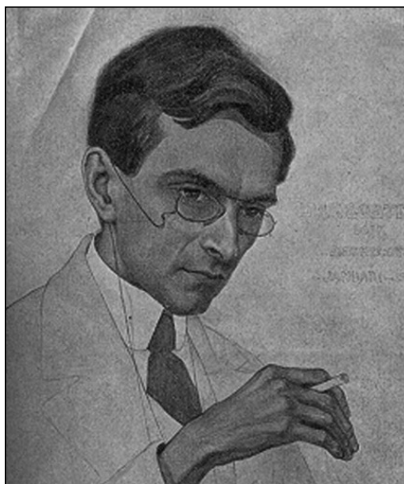
⁸ Az ismeretlen sugárzó izotóp kicsapására olyan anyagokat kell alkalmazni, amelyek maguk nem radioaktívak, mert ellenkező esetben sokkal nehezebb lenne az azonosítandó izotópot a sugárzása alapján nyomon követni.

(^{89}Ac), mint tórium, de ezt még nehezebb volt elhinni.

Természetesen megpróbálták, hogy a 3,5 órás aktivitást mutató csapadékból kémiaiailag kiválasszák az aktíniumot, de nem sikerült. „Úgy látszik – írták 1938. májusi közleményükben –, hogy ez az anyag csak transzuránelem lehet, amely a már ismert transzuránoktól kémiaiilag nagyon különbözik, bár ezt a hipotézist is nagyon nehéz interpretálni.”

Következő közleményükben, 1938 szeptemberében megerősítették, amit korábban találtak: „Mindent összevéve, az $\text{R}_{3,5\text{h}}$ (így jelölték az ismeretlen, 3,5 óra felezési idejű izotópot) tulajdonságai megegyeznek a lantanéval, amelytől a frakcionálás kivételével semmilyen módon sem lehet elkülöníteni.” A frakcionális lepárlásról akkor már pontosan tudták, hogy nemcsak a különböző vegyületek és elemek, hanem még egy adott elem különböző izotópjainak a szétválasztására is alkalmas. Mégsem jutott az eszébe senkinek, hogy akkor talán egy lantanizotóp az, ami sugároz, hiszen ez ellentmondott volna a „magfizika alap-törvényének”: a lantán rendszáma több mint harminccal kisebb, mint az uráné.

Amikor Hahn 1938 szeptemberében ezt a közleményt olvasta, Meitner már nem volt Berlinben, mert nyáron el kellett menekülnie Németországból. 1938. március 13-án ugyanis bekövetkezett az Anschluss: Németország bekebelezte és tartományává nyilvánította Ausztriát. A kegyetlen német zsidótörvények ettől a pillanattól kezdve az osztrák zsidókra is vonatkoztak, és Meitner osztrák zsidónak számított. Azért fogalmazzunk így, mert Meitner 1908-ban evangélikus vallásra tért át (valószínűleg Planck tiszteletet parancsoló protestantizmusa hatására), de a faji törvények erre nem voltak tekintettel. Az Anschlussig védte őt Berlinben az osztrák állampolgárság, de ez a védelem most megszűnt. Bizonyosra lehetett venni, hogy hiába igazgató Hahn, nem fogja tudni munkatársként megtartani, előbb-utóbb az utcára kerül és még koncentrációs táborba is hurcolhatják. Nyomatékosan tanácsolták neki, hogy addig meneküljön, amíg nem késő. Ezért fölvette a kapcsolatot Dirk Coster (1889–1950) nevű holland kollégájával,⁹ aki elintézte a holland kormánynál, hogy vízum nélkül is beengedjék az országba. Coster ezután elutazott Meitnerért. Július 16-án, egy pénteki napon érkezett Berlinbe. Éjjel ő és Hahn segítette Meitnernek a csomagolásban. Hahn értékes gyémántgyűrűt ajándékozott távozó barátjának és munkatársának, ame-



Dirk Coster (A. de Meester portréja, 1915)

lyet az édesanyjától örökölt, hogy szükség esetén pénzzé tehesse.

Másnap, szombat reggel Coster és Meitner vonatra ült. A feltűnés elkerülésére Meitner mindöze két kis bőröndöt vitt magával, Hahn gyémántgyűrűjét pedig Coster őrizte a zsebében. Coster a legkevésbé forgalmas, leggyengébben őrzött határállomást választotta ki, de itt is ötfős német határőr-különítmény járta végig a kocsikat és szedte össze az útleveleket. Meitner átnyújtotta érvénytelen osztrák útlevelét. Eltelt tíz hosszú perc. Ekkor az egyik német tiszt visszajött és szó nélkül Meitner kezébe nyomta az útlevelét.

Meitner ekkor 60 éves volt, teljesen egyedül álló nő, aki a szó legteljesebb értelmében a fizikának szentelte magát – a tudományon kívül más szerelmet sohasem ismert. Pedig nemcsak okos volt, szép is. Az életét azonban teljesen kitöltötték a Dahlemben végzett kutatások. Menekülése után soha többé nem találta meg a helyét a világban, életének hátralévő harminc évében számkivetettnek érezte magát. Egy nagy jelentőségű felfedezés azonban még várt rá...

Costernek nem sikerült állást találnia számára Hollandiában. A Nobel-díjas Manne Siegbahn (az idősebb, 1886–1978) ajánlott neki helyet új stockholmi laboratóriumában, de fizetés és a kutatásokhoz szükséges anyagi támogatás nélkül. Meitner sajnálta, hogy nem maradhatott Hollandiában, de ez mentette meg az életét. Néhány évvel később ugyanis a németek megszállták az országot és bizonyos Auschwitzba hurcolták volna. A semleges Svédország sok üldözöttnek nyújtott menedéket.

Térjünk most vissza Berlinbe Hahnhoz, aki ekkor 59 éves, csaknem 40 évnyi gyakorlattal a háta mögött alighanem a legképzettebb radiokémikus a vi-

lagon. Strassmann sokkal fiatalabb nála, de kitűnő munkatárs. Elhatározzák, hogy megismétlik a franciák kísérletét azzal a kiegészítéssel, hogy a lantanon kívül báriummal is megkísérik kicsapatni az aktivitást hordozó izotópot. A periódusos rendszerből leolvasható, hogy míg a lantan az aktínium, addig a bárium a rádium kiválasztására alkalmas olyan anyag, amely maga nem radioaktív.

Egyheti kemény munkával 16 különböző felezési időt regisztráltak. Ezek közül a báriummal lehetett kicsapatni három, amelyeket korábban még senki sem látott. Feltételezték, hogy ezek ismeretlen rádiumizotópok, és a továbbiakban csak ezekre koncentráltak. De ha már az aktíniumot (^{89}Ac) is nagyon nehezen lehetett megemészteni, mert a besugárzott uránból (^{92}U) alfa- és protonemisszióval kellett képződnie, a rádiummal (^{88}Ra) a helyzet, ha lehet, még súlyosabb volt, mert a létrejöttéhez két alfa-részecske kibocsátása kellett.

A döntő kísérletre december 19. és 21. között került sor. Azt kellett eldönteni, hogy a báriummal kicsapott radioaktív izotóp valóban rádium-e, vagy – bármilyen hihetetlen – esetleg talán báriumizotóp. Hahn és Strassmann így oszkodott: ha ^{88}Ra -ról van szó, akkor ennek béta-bomlással ^{89}Ac -ra kell bomlania, ha pedig ^{56}Ba -ról, akkor ebből béta-bomlással ^{57}La keletkezik. A lantánt és az aktíniumot pedig el lehet különíteni egymástól.

Hahn december 19-én éjjel levelet írt Meitnernek (ezt egyébként gyakran megtette, folyamatosan váltott leveleket legközelebbi kollégájával a dolgok állásáról; novemberben személyesen is találkozott Koppenhágában):

...Pár perc múlva lesz éjjel 11 óra; Strassmann fél 12-kor jön vissza, akkor gondolhatok a hazamenetelre. A helyzet az, hogy a „rádiumizotópokkal” olyan különös eredményre jutottunk, hogy egyelőre csak téged tájékoztatunk róla. Mindhárom izotóp felezési idejét elég pontosan megmértük; minden elemtől elkülöníthetők, kivéve a báriumot; minden reakció teljesen összhangban van egymással. ... A rádium izotópjai pontosan úgy viselkednek, mint a bárium.

... Talán javasolhatnál valamilyen fantasztikus magyarázatot. Mi értjük, hogy az urán nem hasadhat báriumra.... Kérlek, gondold ki valamilyen más lehetőséget...

Meitner december 21-én, szerdán kapta kézhez Hahn levelet. Pénteken falura utazott, a svédországi Kungälvbe, ahol fizikus ismerősének, Eva von Bahrborgiusnak és férjének volt háza. Oda hívták meg Bergiusék a magányos Meitnert és szintén emigráns fizikus unokaöccsét, Otto Frischt (1904–1979), aki Koppenhágában a Bohr-intézetben dolgozott, hogy szombaton töltsék velük

⁹ Coster és Hevesy György (1885–1966) nevéhez fűződik a hafnium azonosítása 1923-ban.



Milton Plesset, Niels Bohr, Fritz Kalckar, Teller Ede és Otto Frisch Dániában, 1934-ben



Fritz Strassman, Lise Meitner és Otto Hahn Mainzban, 1956-ban

együtt a karácsonyestét. Frisch pénteken éjjel érkezett Kungälvbe és ugyanabban a panzióban vett ki szobát, ahol a nagynénje. A reggelinél találkoztak. Frisch a kísérleteit szerette volna megbeszélni sokkal tapasztaltabb nagynénjével (a neutronok mágneses tulajdonságainak a vizsgálatára épített speciális mágnes), de a nagynéni nem figyelt rá. Hahn levelet tartotta a kezében és odanyújtotta az unokaöccsének: Mit szólsz hozzá?

– Bárium? – kérdezte Frisch –, ez teljesen lehetetlen. Valami hiba van a dologban.

– Aligha – tiltakozott Meitner. – Hahn túl jó vegyész ahhoz, hogy ekkorát tévedjen.

Teljesen belefeledkeztek Hahnék eredményének taglalásába, majd elhatározták, hogy séta közben folytatják a beszélgetést. Frisch felkötötte a futólécét, a nagynéni gyalogolt mellette.

Képtelenek voltak elképzelni, hogy az uránmagot a neutron úgy vágja ketté, ahogy egy almát hasítunk kettőbe. De aztán eszükbe jutott, hogy Bohr szerint az atommag inkább hasonlít folyadékcsepphez, mint szilárd golyóbishoz, és a *felületi feszültség* az, ami az atommagcseppeket gömb alakban összetartja... És ekkor villanásszerűen megértették, hogy a *protonok elektromos taszítása a felületi feszültség csökkenését eredményezi*, és ennek következtében az elegendően nagy töltésű – nagy rendszámú – magok már valószínűleg instabilak a két kisebb cseppre történő szétszakadással szemben. Izgatottan leültek egy kivágott fatörzsre, Meitner ceruzát és papírszeletkéket halászott elő a zsebéből, és próbálták megbeszélni, mekkora is az a *Z* rendszám, amelynél a magok instabillá válnak. Mindketten gyakorló magfizikusok vol-

tak, az atommagok alapvető paramétereit kívülről tudták. Ekkor már a magok félempirikus tömegformulája is a rendelkezésükre állt¹⁰ (C. Weizsäcker, 1935). Egykettőre megállapították, hogy a Coulomb-taszítás körülbelül a 100-as rendszámnál semlegesíti a felületi feszültséget, az ennél nagyobb rendszámú atommagoknak azonnal szét kell esniük stabil részekre. A világon először értették meg, miért végződik a periódusos rendszer a száz-as rendszámhoz közel eső ⁹²U-nal.

Már a százánál nem sokkal alacsonyabb rendszámú atommagokat is csak kicsit kell felgerjeszteni ahhoz, hogy instabillakká váljanak a hasadással szemben. Az alapállapotú (gerjesztetlen) uránmag nem vehet fel a gömbtől nagyon eltérő alakot, mert ehhez a felületi feszültséggel szemben nagy munkát kellene végeznie. Azonban egy lassú neutron is bevihet annyi energiát, amennyi elég ahhoz, hogy a mag babapiskóta alakúvá válhasson, amelyben azután a felületi feszültség már a két félre történő szétszakadást segíti: a körülbelül 50-es rendszámú atommagok felületi feszültsége ugyanis sokkal nagyobb az uránénál.

De akkor a két hasadási terméknek nagyon nagy energiával kell szétrepülnie, mert elektromosan taszítják egymást és a széthasadás pillanatában nagyon közel vannak egymáshoz. Ezt az energiát könnyű megbecsülni: el kell képzelni két, egymást érintő, 50-es rendszámú, gömb alakú atommagot. A szétrepülés után a kinetikus energia ennek a konfigurációnak az elektrosztatikus energiájával lesz egyenlő. A fatörzsön ülve arra az eredményre jutottak, hogy ez az energia kb. 200 MeV, sok-sok nagyságrenddel nagyobb, mint a radioaktivitásban felszabaduló energiák.

Honnan származik ez az energia? Csak a tömegdefektusból jöhet ugyanúgy, mint a radioaktív bomlások sokkal kisebb energiája: a két fragmentum tö-

megének valamilyen Δm tömeggel kisebbnek kell lennie, mint a neutronbefogással fölgerjesztett uránmag tömege. Ez a tömegdefektus fedezi az $E=mc^2$ képlet alapján a kétszázmillió elektronvoltos szétrepülési energiát.

Meitner évtizedek óta foglalkozott radioaktivitással, és az atommagok tömegéről elég sok adatra emlékezett fejből ahhoz, hogy meg tudják tippelni a tömegdefektus értékét az urán kettéhasadásánál. Arra jutottak, hogy ez a tömegdefektus körülbelül a proton tömegének egyötöde, a proton tömege pedig majdnem pontosan 1000 MeV. Minden stimmelt.

Este, az ünnepi vacsora közben aligha eshetett másról szó, mint a maghasadásról.

De egy kritikus teszt még hátra volt: mit szól mindehhez Bohr? Bohr kíméletlenül ízekre szedte a felszínes, elhamarkodott elgondolásokat, és Frisch tartott tőle, ez vár a hasadásra vonatkozó elképzelésre is. Január 3-án kereste fel Bohrt, hogy kikérje a véleményét. Alig kezdett hozzá azonban a mondókájához, Bohr az öklével kezdte verni a homlokát: „Micsoda idioták vagyunk! Hogy ez nem jutott korábban az eszünkbe! Ez fantasztikus, nem is lehet másképp!” A beszélgetés csak néhány percig tartott, Bohr azonnal felfogta, miről van szó. Január 16-án Frisch már be is küldte Meitnerrel írt közös cikküket publikálásra a *Nature*-nek.¹¹

Ugyanabba a borítékba egy másik cikket is beletett. Ebben (már egyedül) egy kísérletről számolt be, amelyet három nappal korábban, január 13-án végzett el. Ionizációs kamrában elhelyezett egy nagyon vékony uránréteggel bevont fóliát. A fólia közelébe tette a Bohr-intézetben feltalálható mindhárom neutronforrást és rákapcsolt egy oszcilloszkópot a kamra

¹⁰ SH-atlasz. Atomfizika (Springer Hungarica, 1995) 73. oldal.

¹¹ L. Meitner and O. R. Frisch, Disintegration of Uranium by neutrons; a New Type of Nuclear Reactions, *Nature*, 1939. febr. 11. (Az urán szétbomlása neutronok hatására; a magreakciók egy új típusa.)

elektródaira. A várakozásának megfelelően magas, hegyes, keskeny impulzusok futottak végig az oszcilloszkóp képernyőjén, amelyek eltűntek, amikor a neutronforrásokat eltávolították. Az impulzusok nagyságából ki lehetett számítani, hogy az ionizációt kb. 100 MeV-es részecskék – a hasadási termékek – okozzák.

Január 7-én Bohr hajóra szállt, hogy eleget tegyen egy amerikai meghívásnak, és személyesen vitte el a hírt az Egyesült Államokba.

Hahn és Strassmann dolgozata, amelyben leírták a garast a bárium mellett, 1939. január 6-án jelent meg Berlinben. A cikkben határozottan leszögezték, hogy a besugárzott uránminta báriumot tartalmaz, ezt vegyészként garantálják, de a bárium létrejöttének a mechanizmusáról nem bocsátkoztak feltételezéskbe:

A kísérletek, amelyeket röviden ismertettünk, bennünket mint vegyészeket, arra kényszerítettek, hogy a korábban rádiumként, aktíniumként, tóriumként azonosított [nehéz] elemeket [a sokkal könnyebb] báriummal, lantánnal, cériummal helyettesítsük; de mint a fizikához közel álló „nukleáris vegyészek” [magkémikusok] nem tehetjük meg ezt az úgrást, amely ellentétben áll a magfizika egész tapasztalati anyagával.

Mire a cikk megjelent, már megkönnyebbülhettek: még január 3-án, Bohr jóváhagyása után, Meitner azonnal írt Hahnak: „Most már egészen biztos vagyok benne, hogy amit láttatok, az maghasadás báriumra.”

A *Naturwissenschaften*nek ez a száma január 16-án érkezett meg Párizsba. Joliot, miután elolvasta Hahnék dolgozatát, egy egész napra bezárkózott a szobájába, és nem engedett be senkit – ez volt a harmadik jelentős felfedezés, amelyhez már Párizsban is egészen közel jártak, de elszalasztották.

Joliot felindulása mutatja, milyen váratlan esemény volt a maghasadás felfedezése. Ma ezt már alig értjük, annyira magától értetődőnek tartjuk a jelenséget. De ha tanulni szeretnénk a történetből, meg kell próbálnunk a lehető legpontosabban beleélni magunkat a szereplők akkori helyzetébe.

A felfedezés váratlanságát jól illusztrálja a következő két történet is.

¹² A transzuránok igazi felfedezőjének Glenn Seaborgot és Edwin McMillant tekinthetjük, akik 1951-ben ezért részesültek Nobel-díjban.

¹³ Ebben talán a politikának is lehetett szerepe. Patricia Rife, Meitner életrajzírója szerint (I. könyvének 142. oldalán) a dahlemiek „a Noddack házaspárt politikailag erősen »barnának« tekintették — Hitler náci pártjának barnainges tagjaira utalva, akik minden hivatalos összejövetelen gyanút keltek.” („...the Noddacks were considered very 'brown' politically — a reference to Hitler's brown-shirted party members who made themselves conspicuous at every official gathering.”)

Szilárd 1932-ben jutott arra a gondolatra, hogy az atommag kötési energiájának egy részét neutronok által előidézett láncreakcióval lehetne felszabadítani. Természetesen nem hasadásra gondolt, hanem egy olyan magreakcióra, amelyet neutron idéz elő, és a bomlástermékek között van legalább két neutron. Tisztában volt vele, hogy ha ilyen reakció létezik, atombombát is lehet csinálni, ezért a láncreakció gondolatát titkosított formában szabadalmaztatta. Ezt úgy lehetett elintézni, hogy a szabadalmat a Brit Admirális jegyeztette be.

Teltek az évek, és senki sem látott megfelelő, két neutronra vezető magreakciót. A kedveszegett Szilárd ezért 1938. december 21-én – tehát Hahn és Strassmann döntő kísérletével pontosan egy időben, de arról mit sem tudva – levelet küldött az Admirálisnak, amelyben javasolta a szabadalom titkosságának a feloldását, mert reménytelennek ítélte a láncreakció megvalósítását neutronokkal. Néhány héttel később, amikor már a saját és mások kísérletei alapján tudta, hogy egy uránmag hasadását két-től több neutron megjelenése kíséri, táviratban kérte, hogy december 21-i levelét tekintse tárgytalannak.

A másik történet Fermivel kapcsolatos. Mint már szó volt róla, Fermi december 10-én vette át a Nobel-díjat Stockholmban. A díj indoklásában nem szerepelt a transzuránok felfedezése, de a díj átvételénél szokásos előadásban Fermi a transzuránokra is kitért. Nem sejtette, hogy két hét múlva bizonyosan lehet majd tudni: a módszere, amellyel a 93-as rendszámú elem létrejöttére következtetett, nem állja meg a helyét, és pedig pont abból az okból, amelyre négy évvel korábban Ida Noddack mutatott rá. Mint utóbb kiderült, neutronnal történő besugárzás hatása alatt az uránból a hasadási termékek mellett 93-as rendszámú elem is keletkezik, de Fermi kísérleteiből ez nem következett.¹²

A Nobel-díj átvétele után Fermi többé nem tért vissza Olaszországba, a fasizmus elől az Egyesült Államokba emigrált. Néhány nappal Bohr előtt érkezett New Yorkba és a kikötőben várta Bohrt. Annak alapján, amit megtudott tőle, kénytelen volt utólag helyesbíteni előadása szövegét.

Végül is hogyan minősítsük a történetet, amit elbeszeltünk? A tévedések végjátékának? Tragikomédiának? Aligha járnánk el helyesen. Inkább abból kellene *kiindulnunk*, hogy ami ez alatt a tíz év alatt történt, az maga volt az igazi tudomány, és ahelyett, hogy nagyképpen posztumusz kioktatásban részesítenénk a főszereplőket, inkább próbáljuk ellesni tőlük a tudomány művelésének egynemű titkát.

Hogy lehet, hogy Joliot-ék, akik – amikor a mesterséges radioaktivitásról volt szó – egy nap alatt megértették, hogy új jelenséget fedeztek fel, és Fermiék, akiknek néhány nap elég volt, hogy meggyőzők magukat egy új elem létrehozásáról, a maghasadás elismerésétől a végsőkig vonakodtak, pedig Noddack időben figyelmeztette őket? A magyarázatot alighanem abban kell keresnünk, hogy a mesterséges radioaktivitás és a transzuránium – minden újszerűségük ellenére – kis előrelépést jelentettek abban az értelemben, hogy megmaradtak a magfizika elfogadott alapelveinek – elsősorban a „magfizika alaptörvényének” – a keretei között. Egyik esetben sem érezték sürgetőnek, hogy a jelenség mechanizmusát ahhoz hasonlóan tisztázzák, ahogyan Meitner és Frisch tisztázta a hasadás lehetőségét. A hasadással ugyanis más volt a helyzet, mert a jelenség „alaptörvénynek” mondott ellent. A kísérleti tények önmagukban, plauzibilis interpretáció nélkül ezért nem bizonyultak elég meggyőzőnek. Noddacknak már 1934-ben is igaza volt, és természetesen helyesen járt el, hogy a véleményét köntörfalazás nélkül nyilvánosságra hozta, de cikkében nem javasolt olyan hasadási mechanizmust, amely a hasadás pusztá logikái lehetőségének realizációját kölcsönözött volna. Ezért érezhették kritikáját „kukacoskodásnak”.¹³

Ugyanezért nem lenne helyes Noddackot tekinteni a maghasadás felfedezőjének. Rutherford például már 1903-ban felvetette a transzurániumok lehetőségét, 1920-ban pedig – mint már szó volt róla – a neutronét, mégsem őt tekintjük a transzuránok és a neutron felfedezőjének. Valaminek a felfedezését csak ritkán lehet egészen egyértelműen, meglegelés nélkül határozott névhez kötni. Ilyen tekintetben a Nobel-bizottság is követ el időnként szarvashibát. A maghasadásért például egyedül Hahnt tüntették ki Nobel-díjjal 1945-ben. A történet, amit elmeseltünk, meggyőzően bizonyítja, hogy három ember – Hahn, Meitner és Strassmann – között kellett volna megosztani a díjat.

A világháború után a megfizika a hivatalnokok kezébe került, és soha többé nem lett már olyan, mint azokban az években, amelyekről meséltem. ☹

IRODALOM

- Korszunszkij: Az atommag (Közoktatásügyi Kiadó-vállalat, 1951)
 W. Braunbeck: Az atommag regénye (Gondolat, 1960)
 Laura Fermi: Atom a családban. Enrico Fermi élete (Gondolat, 1966)
 M. Goldsmith: Frédéric Joliot-Curie (Gondolat, 1979)
 O. Hahn: Mein Leben (München, 1964)
 R. Rhodes: The Making of the Atomic Bomb (Penguin Books, 1988)
 R. Lewin Sime: Lise Meitner: A Life in Physics (University of California Press, 1996)
 Patricia Rife: Lise Meitner and Dawn of the Nuclear Age (Birkhäuser, Boston, 1999)