

A kvantummechanika hőskora

Csordás András

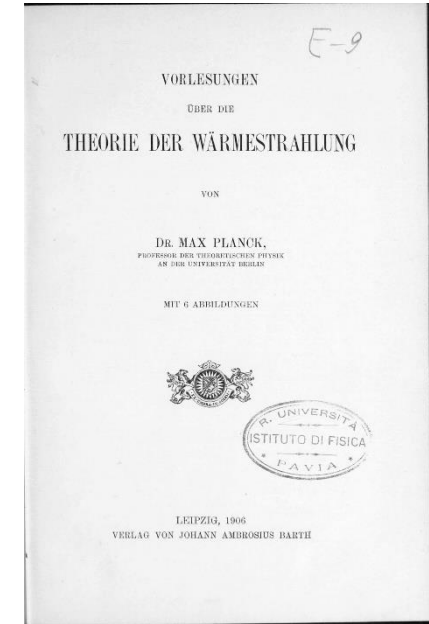
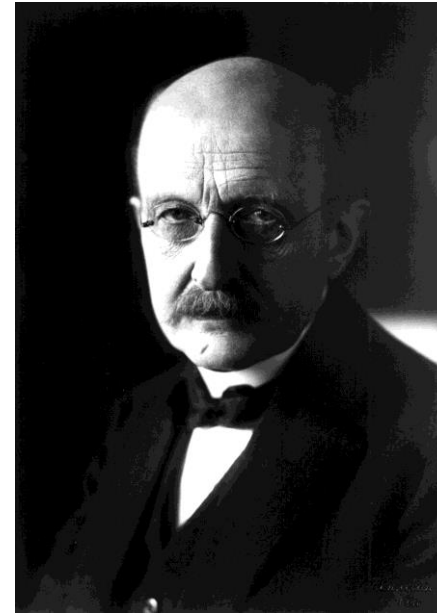
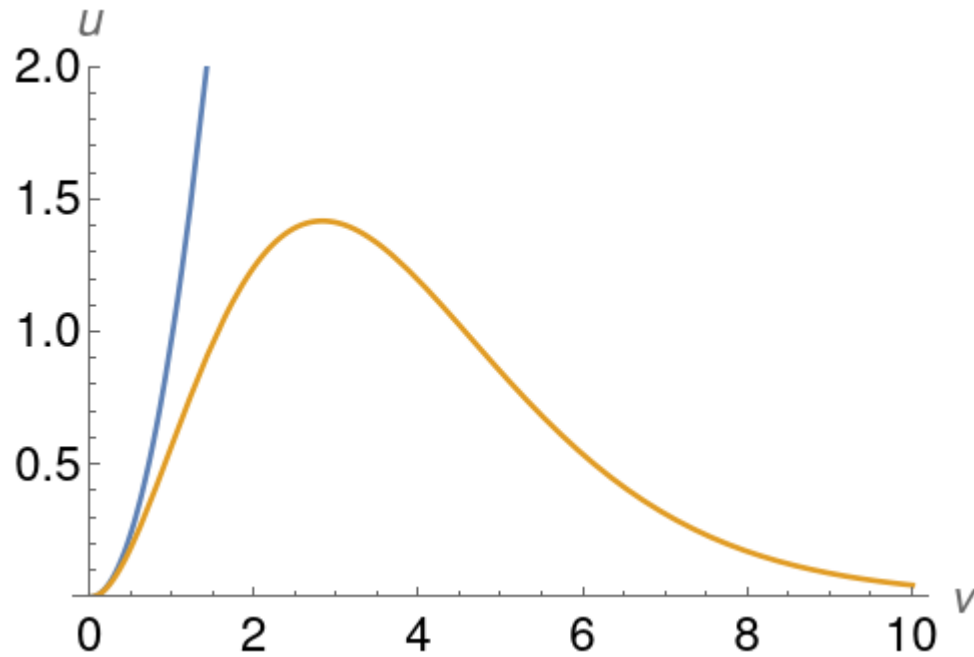
Előadás "Az Atomoktól a csillagokig" sorozaton
2024. február 22

Nobel-díjasok

| | | | | | |
|------|--|---------------------------------------|------|---|---|
| 1901 | Wilhelm Conrad Röntgen | RTG sugárzás | 1923 | Robert Millikan | elemi töltés, fotoelektromos hatás |
| 1902 | Hendrik Lorentz, Pieter Zeeman | Zeemann-effektus | 1924 | Manne Siegbahn | RTG felfedezések |
| 1903 | Henri Becquerel, Pierre Curie, Marie Curie | radioaktivitás | 1925 | James Franck, Gustav Hertz | Frank-Hertz kísérlet |
| 1904 | Lord Rayleigh | gázok/argon | 1926 | Jean Baptiste Perrin | anyag nem folytonos, szedimentációs egyenúly |
| 1905 | Lénárd Fülöp | katódsugarak | 1927 | Arthur Compton, Charles Thomson Rees Wilson | Compton effektus, Wilson-kamra |
| 1906 | Joseph John Thomson | vezetés gázokban | 1928 | Owen Willans Richardson | Richardson -tv (termionikus-effektus) |
| 1907 | Albert A. Michelson | interferométer | 1929 | Louis de Broglie | az elektron hullámtermészete |
| 1908 | Gabriel Lippmann | színek reprodukálása | 1930 | Venkata Raman | Raman-effektus, Raman-szórás |
| 1909 | Guglielmo Marconi, Karl Ferdinand Braun | drótnélküli távíró | 1931 | Nem osztották ki a díjat | pedig nem volt háború |
| 1910 | Johannes Diderik van der Waals | gázok és folyadékok állapotegyenlete | 1932 | Werner Heisenberg | kvantummechanika megalkotása, H molekula ion |
| 1911 | Wilhelm Wien | hőmérsékleti sugárzás | 1933 | Erwin Schrödinger, Paul Dirac | atomelmélet |
| 1912 | Gustaf Dalén | akkumulátorok bolyákra, | 1934 | Nem osztották ki a díjat | pedig nem volt háború |
| 1913 | Heike Kamerlingh Onnes | folyékony hélium | 1935 | James Chadwick | neutron felfedezése |
| 1914 | Max von Laue | RTG vonalak felfedezése kristályokban | 1936 | Victor Franz Hess, Carl David Anderson | kozmikus sugárzás, pozitron felfedezése |
| 1915 | William Lawrence Bragg | RTG vonalak analízise kristályokban | 1937 | Clinton Davisson, George Paget Thomson | elektronok diffrakciója kristályokon |
| 1916 | Nem osztották ki a díjat | háború miatt | 1938 | Enrico Fermi | új radioaktív elemek létrehozása neutronbesugárzással |
| 1917 | Charles Glover Barkla | elemek RTG vonalai | 1939 | Ernest Lawrence | ciklotron, mesterséges radioaktivitás létrehozása |
| 1918 | Max Planck | energia kvantumok | 1940 | Nem osztották ki a díjat | |
| 1919 | Johannes Stark | Stark-effektus | 1941 | Nem osztották ki a díjat | |
| 1920 | Charles Edouard Guillaume | precíziós mérések ötvözetekben | 1942 | Nem osztották ki a díjat | |
| 1921 | Albert Einstein | fotoelektromos hatás | 1943 | Otto Stern | a proton mágneses momentuma (Stern-Gerlach kísérlet) |
| 1922 | Niels Bohr | atomszerkezeti kutatások | 1944 | Isidor Isaac Rabi | Rezonancia-módszer, Rabi-frekvencia |
| | | | 1945 | Wolfgang Pauli | Pauli-féle kizárási elv |
| | | | | | |

Planck-formula a feketetest sugárzására:

A spektrális energia sűrűségfüggvénye a klasszikus fizika szerint $u = \frac{8\pi\nu^2 k_B T}{c^3}$ (Rayleigh-Jeans-törvény) ultraibolya katasztrófához vezet



A sugárzási tér a leírás szempontjából oszcillátorok halmaza, és az oszcillátorokra Planck feltételezte, hogy energiájukra $\epsilon_n = n \cdot h\nu$, ahol n egész: 0,1,... (Az oszcillátorok/fotonok energiája kvantumos) Ezzel az

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{k_B T}} - 1}$$

alakra jutott, amivel eltűntette az ultraibolya katasztrófát. Ez a spektrális sűrűség a tapasztalattal egyező, Következik belőle a Wien-féle eltolódási törvény és a Stefan-Boltzmann-törvény. Illesztve mérési adatokra u -t, a h Planck-állandó és a k_B Boltzmann állandó is meghatározható. (Előadás a DPG-n, 1900)

Franck-Hertz kísérlet

Hg atomok csak meghatározott energiát képesek a velük ütköző elektronoktól átvenni.

Atomi nívók létezését fénykibocsátás nélkül igazolta

Verh. d. Dt. Phys. Ges. 16, 457 (1914).

Über Zusammenstöße zwischen Elektronen und den Molekülen des Quecksilberdampfes und die Ionisierungsspannung desselben*)

Von *J. Franck* und *G. Hertz*

In einer früheren Arbeit¹⁾ haben wir zeigen können, daß die Ionisierungsspannung, also die Spannung, die ein Elektron frei durchlaufen haben muß, um durch Stoß ein Gasmolekül zu ionisieren, eine für jedes Gas

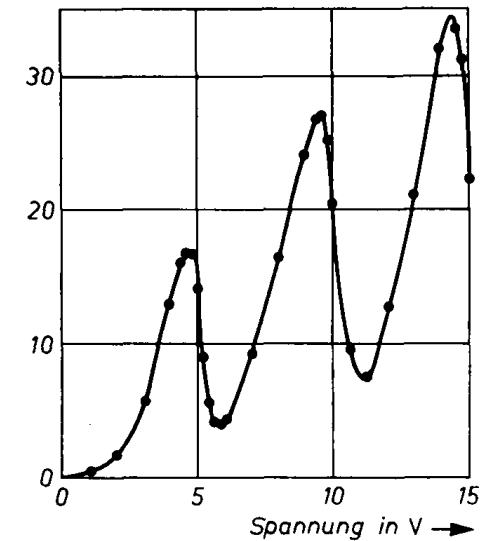
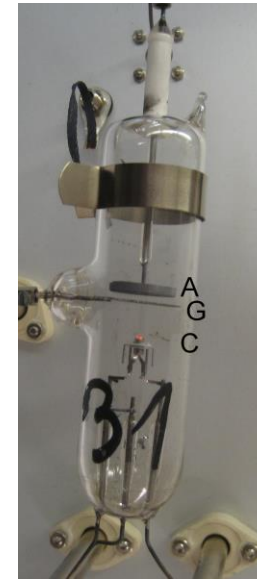


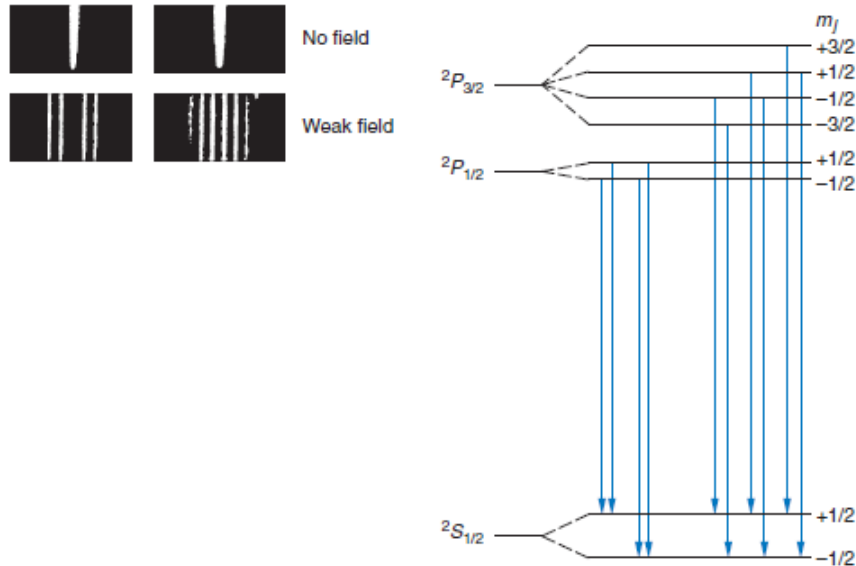
Abb. 3: Kurve 3

Zeeman-effektus

Az atomi nívók mágneses térben (különböző módon) felhasadnak

36 More Chapter 7

FIGURE 7-30 Energy-level splitting in a magnetic field for the ${}^2P_{3/2}$, ${}^2P_{1/2}$, and ${}^2S_{1/2}$ energy levels for sodium, showing the anomalous Zeeman effect. These are the D_1 and D_2 lines in Figure 7-22. The splitting of the levels depends on L , S , and J , leading to more than the three lines seen in the normal effect. [Photo from H.E. White, *Introduction to Atomic Spectra*, New York: McGraw-Hill Book Company, 1934. Used by permission of the publisher.]



226 Dr. P. Zeeman on the Influence of Magnetism

8. Finally, it should be carefully noted that the essence of the whole matter lies in the fact that when the specified conditions hold, the given determinant is transformable into an axi-symmetric determinant in which α is involved in the same way as before.

Mowbray Hall, Capetown, S.A.,
November 30, 1896.

XXXII. *On the Influence of Magnetism on the Nature of the Light emitted by a Substance.* By DR. P. ZEEMAN*.

1. SEVERAL years ago, in the course of my measurements

Philosophical Magazine. 5th series. 43
(262): 226–239 (1897)

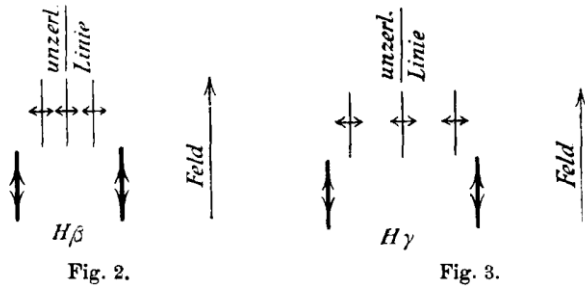


Zeeman, Einstein és Ehrenfest

Stark-effektus

Atomi nívók elektromos térben felhasadnak

der Komponenten ist in rohem Maß der Breite der Striche



proportional gesetzt; 1 mm Abstand zwischen ihnen entspricht

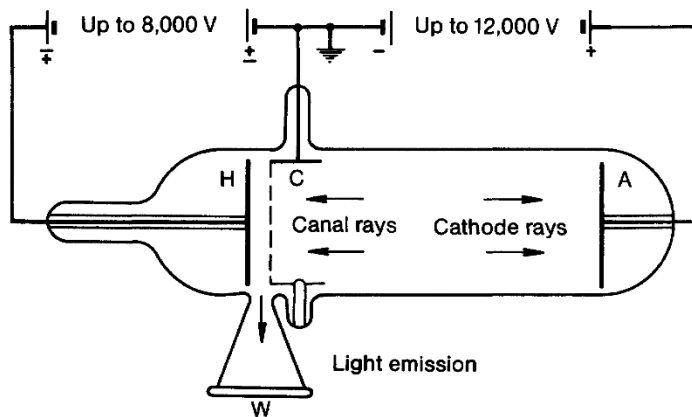


Fig. 15.1. Canal ray tube for investigation of the emission of atoms in an electric field: the Stark effect. The potential between the cathode C and the electrode H can be as high as 8000 V. The resulting splitting of spectral lines is observed through the window W. In order to observe neutral H atoms, the positive ions of the canal rays must be neutralised. This is not shown in the figure

1914.

№ 7.

ANNALEN DER PHYSIK.

VIERTE FOLGE. BAND 43.

1. *Beobachtungen über den Effekt des elektrischen Feldes auf Spektrallinien. I. Quereffekt;*¹⁾ von *J. Stark.*

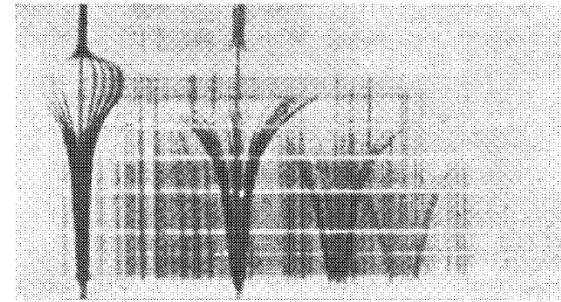


Fig. 15.2. Splitting of the hydrogen atom lines in an electric field. The strength of the field varies along the light source, the image of which is shown after passage through a spectrograph slit. The field is 10^5 V/cm in the region of smaller splitting near the bottom of the figure and rises to a value of $1.14 \cdot 10^6$ V/cm in the region of the greatest splitting. From K. H. Hellwege, *Einführung in die Physik der Atome*, Heidelberger Taschenbücher, Vol. 2, 4th ed. (Springer, Berlin, Heidelberg, New York 1974) Fig. 45

<- Kép forrása:
Haken-Wolf Atom- und
Quantenphysik, (Springer
1996), 257. oldal

Stern-Gerlach kísérlet

„Die Aufnahmen zeigen dass der Silberatomstrahl im inhomogenen Magnetfeld in der Richtung der Inhomogenitat in zwei Strahlen aufspalten wird deren einer zum Schneidenpol hingezogen, deren anderer vom Schneidenpol abgestossen wird“

Fordítás: A képek azt mutatják, hogy az inhomogén mágneses térben az ezüst atomnyaláb az inhomogenitás irányában két sugárra oszlik, amelyek közül az egyiket a vágási pólus vonzza, a másikat pedig a vágási pólus taszítja.

Gerlach, W.; Stern, O. (1922). "Der experimentelle Nachweis der Richtungsquantelung im Magnetfeld". Zeitschrift für Physik. 9 (1): 349–352.

349

Der experimentelle Nachweis der Richtungsquantelung im Magnetfeld.

Von **Walther Gerlach** in Frankfurt a. M. und **Otto Stern** in Rostock.

Mit sieben Abbildungen. (Eingegangen am 1. März 1922.)

Vor kurzem¹⁾ wurde in dieser Zeitschrift eine Möglichkeit angegeben, die Frage der Richtungsquantelung im Magnetfeld experimentell zu entscheiden. In einer zweiten Mitteilung²⁾ wurde gezeigt, daß das normale Silberatom ein magnetisches Moment hat. Durch

350

Walther Gerlach und Otto Stern,

Die beiden Blenden, die beiden Magnetpole und das Glasplättchen, sitzen in einem Messinggehäuse von 1 cm Wandstärke starr miteinander verbunden, so daß ein Druck der Pole des Elektromagneten weder eine Deformation des Gehäuses noch eine Verschiebung der relativen Lage der Blenden, der Pole und des Plättchens verursachen kann.

Evakuiert wird wie bei den ersten Versuchen mit zwei Volmersehen Diffusionspumpen und Gaede-Hg-Pumpe als Vorpumpe. Bei danerndem Pumpen und Kühlen mit fester Kohlensäure wurde ein Vakuum von etwa 10^{-5} mm Hg erreicht und dauernd gehalten.

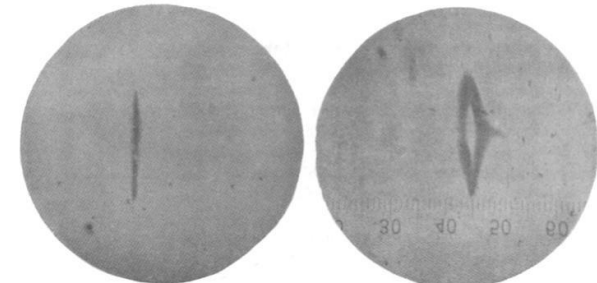


Fig. 2.

Fig. 3.

Die „Belichtungszeit“ wurde auf acht Stunden ohne Unterbrechung ausgedehnt. Aber auch nach achtstündiger Verdampfung war wegen der sehr engen Blenden und der großen Strahlänge der Niederschlag des Silbers auf der Auffangeplatte noch so dünn, daß er — wie früher mitgeteilt — entwickelt werden mußte.

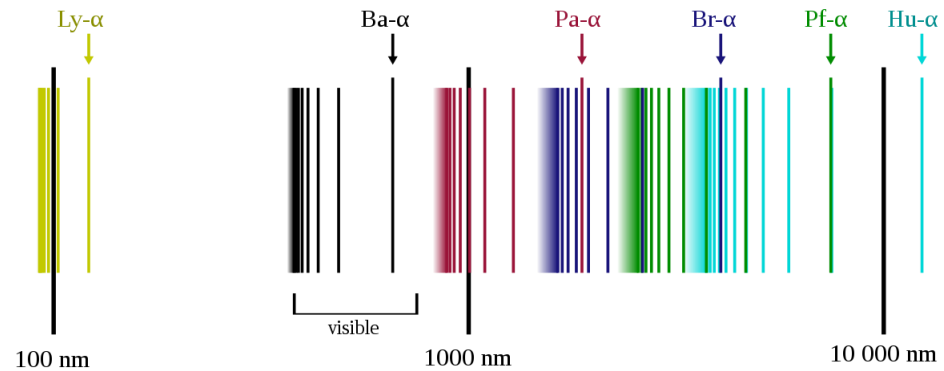
Ergebnisse. Fig. 2 gibt zunächst eine Aufnahme mit $4\frac{1}{2}$ stündiger Bestrahlungszeit ohne Magnetfeld; die Vergrößerung ist ziemlich genau 20fach. Die Ausmessung des Originals im Mikroskop mit Okularmikrometer ergab folgende Dimensionen: Länge 1,1 mm, Breite an der schmalsten Stelle 0,06 mm, an der breitesten Stelle 0,10 mm. Man sieht, daß der Spalt nicht ganz genau parallel ist. Es sei aber darauf hingewiesen, daß die Figur den Spalt selbst in 40facher Vergrößerung darstellt, da das „Silberbild“ des Spaltes schon doppelte Dimension hat; es ist schwierig, einen solchen Spalt in einer Fassung von wenigen Millimetern herzustellen.

Nap színekvonalai (Fraunhofer vonalak):



A hidrogén spektrum szerkezete (Lyman-, Balmer-, Paschen-, Brackett-, Pfund- és Humprey sorozatok). Tapasztalat (Rydberg-formula):

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$



Kezdeti kvantálások

--- Heurisztikus korrekciók a klasszikus mechanikához. Ma úgy gondoljuk, hogy ezek az elméletek a szemiklasszikus közelítések a kvantummechanikához (Ennek is van modern változata, Gutzwiller-trace formula, M. Berry munkássága, stb.)

--- Főbb eredmények:

- a) Planck-féle sugárzási törvény
- b) Bohr korrespondencia-elve ($\hbar \rightarrow 0$ limeszben vissza kell kapnunk a klasszikus mechanikát)
- c) Einstein-Brillouin-Kramer kvantálás (EKB kvantálás, a hatások kvantálása)
- d) Bohr-Sommerfeld kvantálás, Bohr modell
- e) 1924 Louis de Broglie anyaghullámok
- f) Wentzel-Kramers-Brillouin (WKB-kvantálás) (matematikai módszer bizonyos diff. egyenletekre)

Niels Bohr, (a Bohr-Intézet):

(Koppenhága, 1885-1962)

1922 Nobel-díj,
(1938 MTA külső tagja)
1920 Carlsberg sörgyár
segítségével megalapítja az
Elméleti Fizikai Intézetet. A kor
szinte minden fontosabb fizikusa
megfordult itt. A Nobel-díj után
ingyen ihatott Carlsberg sört!



Fontosabb kutatási területei:

- a) kvantummechanika kérdései,
interpretációja
- b) atomszerkezet



THE
LONDON, EDINBURGH, AND DUBLIN
PHILOSOPHICAL MAGAZINE
AND
JOURNAL OF SCIENCE.

[SIXTH SERIES.]

JULY 1913.

I. *On the Constitution of Atoms and Molecules.*
By N. BOHR, Dr. phil. Copenhagen*.

Introduction.

IN order to explain the results of experiments on scattering of α rays by matter Prof. Rutherford† has given a theory of the structure of atoms. According to this theory, the atoms consist of a positively charged nucleus surrounded by a system of electrons kept together by attractive forces from the nucleus; the total negative charge of the electrons is equal to the positive charge of the nucleus. Further, the

$$W_{\tau_2} - W_{\tau_1} = \frac{2\pi^2 m e^4}{h^2} \left(\frac{1}{\tau_2^2} - \frac{1}{\tau_1^2} \right).$$

If now we suppose that the radiation in question is homogeneous, and that the amount of energy emitted is equal to $h\nu$, where ν is the frequency of the radiation, we get

$$W_{\tau_2} - W_{\tau_1} = h\nu,$$

* See f. inst. N. Bohr, Phil. Mag. xxv. p. 24 (1913). The conclusion drawn in the paper cited is strongly supported by the fact that hydrogen, in the experiments on positive rays of Sir J. J. Thomson, is the only element which never occurs with a positive charge corresponding to the loss of more than one electron (comp. Phil. Mag. xxiv. p. 672 (1912)).

Bohr, Niels (1913). "On the Constitution of Atoms and Molecules, Part I". Philosophical Magazine. 26 (151): 1–24.

A Bohr-elmélet két feltevése:

- 1.) Az elektronokra ható centripetális erő a Coulomb-erő
- 2.) Az elektronok „kvantált körpályán mozognak”: Az elektron impulzusmomentuma = $\hbar n$, ahol n = egész.

Számolás:

Coulomb törvény: $F_C = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}$

e-p kh. konstans legyen: $e_0^2 = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0}$, (e: elektrontöltés)

1.): $m \frac{v_n^2}{r_n} = \frac{e_0^2}{r_n^2}$

2): $m r_n v_n = n \hbar$

1)-ből és 2)-ből:

$$e_0^2 = m v_n^2 r_n = (m v_n r_n) \cdot v_n = n \hbar v_n \quad \rightarrow \quad v_n = \frac{e_0^2}{n \hbar}, \quad \left(\frac{v_n}{c} = \frac{\alpha}{n}, \quad \alpha = \frac{e_0^2}{\hbar c} \approx \frac{1}{137} \right)$$

α : finomszerkezeti állandó

$$r_n = \frac{n \hbar}{m v_n} = n^2 a_0, \quad a_0 = \frac{\hbar^2}{m e_0^2}$$

a_0 : Bohr-sugár (1s állapotban átlagosan ilyen távolságra van az elektron a magtól)

$$E_n = \frac{1}{2} m v_n^2 - \frac{e_0^2}{r_n} = -\frac{e_0^2}{2 a_0} \cdot \frac{1}{n^2}, \quad \left(\frac{e_0^2}{a_0} = \frac{m e_0^4}{\hbar^2} = 2 \text{ Rydberg} = 1 \text{ Hartree} \right)$$

A kibocsájtott foton hullámhosszára:

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{E_{n_2} - E_{n_1}}{hc} = \frac{e_0^2}{2 a_0 hc} \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) = R_H \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

Amiből a Rydberg-állandó:

$$R_H = \frac{e_0^2}{2 a_0 hc} = 1.097\,37 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$$

Mért érték hidrogénra: $1.096\,775\,83 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$

Megjegyzés:

A) Az eltérés oka:

Még pontosabb számítással (Dirac-egyenlettel)

$$E(n_r, j) = \frac{mc^2}{\sqrt{1 + \frac{Z^2 \alpha^2}{\left(n_r + \sqrt{\left(j + \frac{1}{2}\right)^2 - Z^2 \alpha^2}\right)^2}}} \approx mc^2 \left(1 - \frac{1}{2} \frac{\alpha^2}{\left(n_r + j + \frac{1}{2}\right)^2} + O(\alpha^4) \right)$$

ahol: $n_r = 0, 1, \dots$ (radiális kvantumszám); $j = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \dots$ (az elektron impulzusmomentuma);

Természetesen: $n = n_r + j + \frac{1}{2} = 1, 2, \dots$ (főkvantumszám), $mc^2 \alpha^2 = \frac{e_0^2}{a_0}$.

B) A Bohr-modell nagyon jól leírja a H kötött energiáit, megadja a Rydberg-formulát kis korrekcióktól eltekintve. De 2) nem egy egzakt kvantálás! Az impulzusmomentum kvantálása ennél lényegesen bonyolultabb (Lásd impulzusmomentum algebra, és Wigner Jenő csoportelméleti könyve).

A módszer már a hélium-atomra sem ad pontos eredményt!

Modern kvantummechanika

- a) Schrödinger-egyenlet (1926)
- b) Pauli beilleszti a spin szabadsági fokot (1925)
- b) Heisenberg-féle mátrixmechanika, határozatlansági reláció (1925)
- d) Dirac-egyenlet (relativisztikus kvantummechanika az elektronra 1928)
- e) Kvantumstatisztikák (Bose-Einstein (1924) és Fermi-Dirac statisztika (1926))
- e) Terek kvantálása, térelmélet, QED, QCD (De ez már egy másik történet)

Erwin Schrödinger:

A legfontosabb cikkek:

- E. Schrödinger: Quantisierung als Eigenwertproblem I, Annalen der Physik 79 (1926), S. 361–376.
- E. Schrödinger: Quantisierung als Eigenwertproblem II, Annalen der Physik 79 (1926), S. 489–527.
- E. Schrödinger: Über das Verhältnis der Heisenberg-Born-Jordanschen Quantenmechanik zu der meinen, Annalen der Physik 79 (1926), S. 734–756.
- E. Schrödinger: Quantisierung als Eigenwertproblem III, Annalen der Physik 80 (1926), S. 437–490.
- E. Schrödinger: Quantisierung als Eigenwertproblem IV, Annalen der Physik 81 (1926), S. 109–139



3. *Quantisierung als Eigenwertproblem;* *von E. Schrödinger.*

(Erste Mitteilung.)

§ 1. In dieser Mitteilung möchte ich zunächst an dem einfachsten Fall des (nichtrelativistischen und ungestörten) Wasserstoffatoms zeigen, daß die übliche Quantisierungsvorschrift sich durch eine andere Forderung ersetzen läßt, in der kein Wort von „ganzen Zahlen“ mehr vorkommt. Vielmehr ergibt sich die Ganzzahligkeit auf dieselbe natürliche Art, wie etwa die Ganzzahligkeit der *Knoten*zahl einer schwingenden Saite. Die neue Auffassung ist verallgemeinerungsfähig und rührt, wie ich glaube, sehr tief an das wahre Wesen der Quantenvorschriften.



Wolfgang Pauli

Pauli relative keveset publikált, de rengeteg levelet írt kollégáinak eredményeiről. Büszke volt, hogy keveset idézik A német Wikipédia szerint azt mondta: "Megengedhetem magamnak, hogy ne idézzenek")

A $H\Psi = E\Psi$ sajátértékegyenlet felírása és alkalmazása a H atomra.

Miért nem tanuljuk középiskolában?

- A Ψ hullámfüggvény egy komplex hullámfüggvény.
- H egy operátor (komplex függvényt komplex függvénybe képez). H a fizikai rendszertől függ, annak felépítéséhez kell a mechanika az adott rendszerre.
- A Schrödinger-egyenlet egy parciális deriváltakat tartalmazó operátor sajátértékegyenletének megoldását teszi szükségessé. Ez általában nehéz.

Über den Zusammenhang des Abschlusses der Elektronengruppen im Atom mit der Komplexstruktur der Spektren.

Von W. Pauli jr. in Hamburg.

(Eingegangen am 16. Januar 1925.)

Es wird, namentlich im Hinblick auf den Millikan-Landéschen Befund der Darstellbarkeit der Alkalidubletts durch relativistische Formeln und auf Grund von in einer früheren Arbeit erhaltenen Resultaten, die Auffassung vorgeschlagen, daß in diesen Dubletts und ihrem anomalen Zeemaneffekt eine klassisch nicht be-

Elektrons im Atom durch die Hauptquantenzahl n und zwei Nebenquantenzahlen k_1 und k_2 , zu denen bei Anwesenheit eines äußeren Feldes noch eine weitere Quantenzahl m_1 hinzutritt. In Anknüpfung an eine neuere Arbeit von E. C. Stoner

Zeitschrift für Physik, Bd. 31, 1925, S. 765: A kizárási elvet is itt fogalmazza meg.

Az absztrakt vége: „ zu denen bei Anwesenheit eines ausseren Feldes noch eine weitere Quantenzahl m_1 hinzutritt”
Fordítás: „amelyhez egy külső tér jelenlétében egy további m_1 kvantumszámot kell hozzáadnunk.”

Zeitschrift für Physik, Bd. 43, S. 601: „Zur Quantenmechanik des magnetischen Elektrons” Itt vezeti be azokat a 2x2-es mátrixokat, amiket a fizikus gyakran használ, és úgy hívják Pauli-mátrixok.

Werner Heisenberg

Diplomamunka Arnold Sommerfeldnél (ő is kvantummechanikán dolgozik), doktori téma (szintén nála): „*Stabilität und Turbulenz von Flüssigkeitsströmen*” (1923), védésnél apró problémák (angolul: <https://www.sjsu.edu/faculty/watkins/quantumdrama.htm>) Majd Göttingen (Born) és Koppenhága (Bohr). 25 évesen (1927) professzor Lipcsében, Nobel-díj: 1932



Zur Quantenmechanik. II.

Von M. Born, W. Heisenberg und P. Jordan in Göttingen.

(Eingegangen am 16. November 1925.)

Die aus Heisenbergs Ansätzen in Teil I dieser Arbeit entwickelte Quantenmechanik wird auf Systeme von beliebig vielen Freiheitsgraden ausgedehnt. Die Störungstheorie wird für nicht entartete und eine große Klasse entarteter Systeme durchgeführt und ihr Zusammenhang mit der Eigenwerttheorie Hermitescher Formen nachgewiesen. Die gewonnenen Resultate werden zur Ableitung der Sätze über Impuls und Drehimpuls und zur Ableitung von Auswahlregeln und Intensitätsformeln benutzt. Schließlich werden die Ansätze der Theorie auf die Statistik der Eigenschwingungen eines Hohlraumes angewendet.

vorgeschrieben würde²⁾. Wir führen daher als fundamentale quantenmechanische Relation ein:

$$pq - qp = \frac{h}{2\pi i} 1. \quad (5)$$

Auf die korrespondenzmäßig-physikalische Bedeutung dieser Relation werden wir später zu sprechen kommen. An dieser Stelle scheint es uns

Born, M., Heisenberg, W. & Jordan, P. Zur Quantenmechanik. II.. Z. Physik 35, 557–615 (1926)

Az alsó összefüggésből következik a Heisenberg-féle határozatlansági reláció.

Paul Adrien Maurice Dirac

Dirac-egyenlet (1928): a QM relativisztikus változata, pozitron (antirészecskék) megjósolása, 1933: Nobel-díj. Mai modern kvantummechanikai jelöléseink is tőle származnak

The Quantum Theory of the Electron.

By P. A. M. DIRAC, St. John's College, Cambridge.

(Communicated by R. H. Fowler, F.R.S.—Received January 2, 1928.)

for no field. From equation (9) we thus obtain

$$\left[p_0 + \frac{e}{c} A_0 + \rho_1 \left(\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{p} + \frac{e}{c} \mathbf{A} \right) + \rho_3 mc \right] \psi = 0. \quad (14)$$

This wave equation appears to be sufficient to account for all the duplexity phenomena. On account of the matrices ρ and σ containing four rows and



Az ifjú Dirac 1933-ban, illetve feleségével W. Mancival (1963)

<- Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Vol. 117, No. 778 (Feb. 1, 1928), pp. 610-624

Bozonok, Fermionok, Pauli-elv

A természetben kétféle (részecske) kvantumstatisztika létezik:

- a) bozonok (A részecskét Bose-ról P.A.M. Dirac nevezte el)
- b) fermionok

A Bose- /Fermi-kvantumstatisztika nagy hőmérsékleten a klasszikus (Boltzmann-statisztikába megy át)

A, Bozonok

Satvendra Nath Bose (1894-1974)

Plancks Gesetz und Lichtquantenhypothese.

Von **Bose** (Dacca-University, Indien).

(Eingegangen am 2. Juli 1924.)

Der Phasenraum eines Lichtquants in bezug auf ein gegebenes Volumen wird in „Zellen“ von der Größe h^3 aufgeteilt. Die Zahl der möglichen Verteilungen der Lichtquanten einer makroskopisch definierten Strahlung unter diese Zellen liefert die Entropie und damit alle thermodynamischen Eigenschaften der Strahlung.

Bose (1924), "Plancks Gesetz und Lichtquantenhypothese",
Zeitschrift für Physik (in German), 26 (1): 178–181,



man dies in obige Gleichung für E ein, so erhält man

$$E = \sum_s \frac{8 \pi h \nu^3}{c^3} V \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} d\nu,$$

welche Gleichung Plancks Formel äquivalent ist.

(Übersetzt von A. Einstein.)

Anmerkung des Übersetzers. Boses Ableitung der Planckschen Formel bedeutet nach meiner Meinung einen wichtigen Fortschritt. Die hier benutzte Methode liefert auch die Quantentheorie des idealen Gases, wie ich an anderer Stelle ausführen will.

Fordítás: A fordító megjegyzése: Véleményem szerint Bose Planck képletének levezetése fontos előrelépést jelent. Az itt alkalmazott módszer az ideális gáz kvantumelméletét is biztosítja, amint azt másutt kifejttem.)

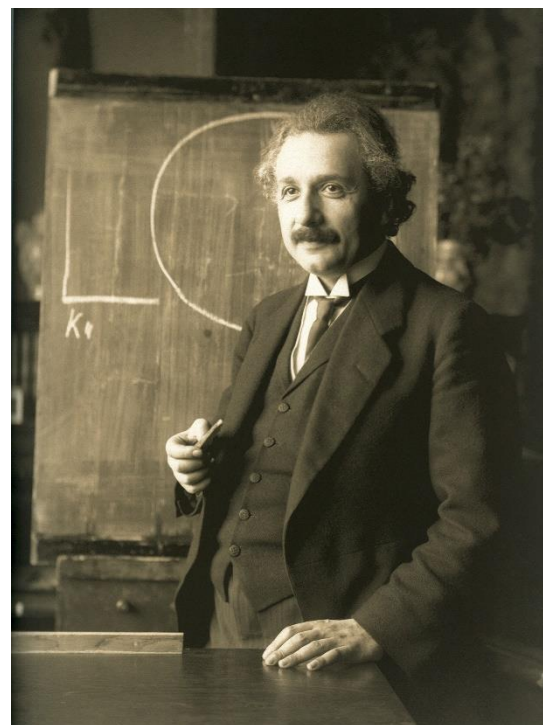
Az ígért munka:

A. Einstein. „Quantum theory of ideal monoatomic gases”. Sitzungsberichte der Preussische Akademie der Wissenschaften,23:3, 1925

(A történet ennél bonyolultabb volt, Lásd ArXiv:1004.5567):

| | |
|-------------------|---|
| 4 June 1924 | Bose writes to Einstein |
| c. 2 July 1924 | Bose's paper (translated by Einstein) received by <i>Zeitschrift für Physik</i> |
| 10 July 1924 | Einstein's first paper on QTMIG presented to the Prussian Academy (PA) |
| 20 September 1924 | Einstein's first paper on QTMIG published (Einstein 1924) |
| December 1924 | Einstein's second paper on QTMIG signed Bose's paper published (Bose 1924) |
| 8 January 1925 | Einstein's second paper on QTMIG presented to PA |
| 29 January 1925 | Einstein's third paper on QTMIG presented to PA |
| 9 February 1925 | Einstein's second paper on QTMIG published (Einstein 1925a) |
| 5 March 1925 | Einstein's third paper on QTMIG published (Einstein 1925a) |

Table 1: Chronology of the presentation and publication of Einstein's quantum theory of the monoatomic ideal gas (QTMIG) and some related facts

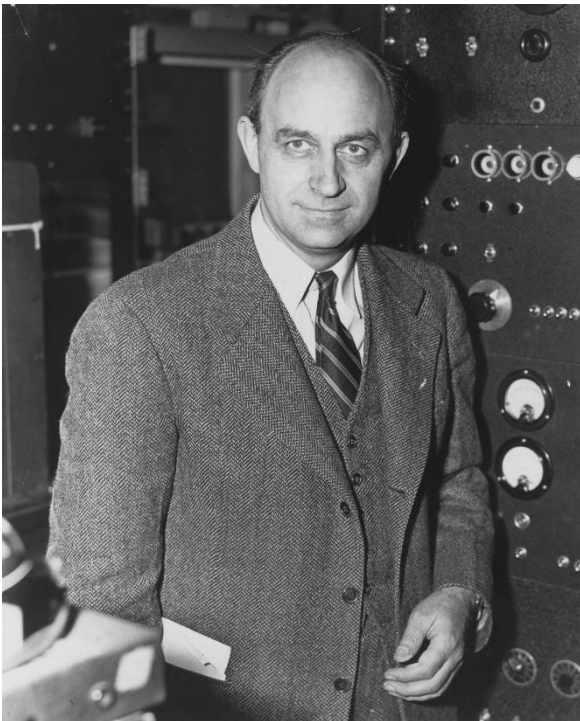


A. Einstein 1921-ben

Einstein vette észre, hogy ideális Bose-gázban a hőmérséklet csökkenésével egy fázisátalakulás történhet. A jelenség neve: **Bose-Einstein kondenzáció**

B, Fermi-Dirac statisztika (Fermionok)

Enrico Fermi és P.A.M. Dirac nemkölcönható „elektronok” ideális gázát vizsgálta



Zur Quantelung des idealen einatomigen Gases¹⁾.

Von **E. Fermi** in Florenz.

(Eingegangen am 24. März 1926.)

Wenn der Nernstsche Wärmesatz auch für das ideale Gas seine Gültigkeit behalten soll, muß man annehmen, daß die Gesetze idealer Gase bei niedrigen

(Enrico Fermi: Zur Quantelung des einatomigen idealen Gases. In: Zeitschrift für Physik. Band 36, 1926, S. 902–912)

On the Theory of Quantum Mechanics.

By P. A. M. DIRAC, St. John's College, Cambridge.

(Communicated by R. H. Fowler, F.R.S.—Received August 26, 1926.)

§ 1. *Introduction and Summary.*

The new mechanics of the atom introduced by Heisenberg* may be based on the assumption that the variables that describe a dynamical system do not

(P.A.M. Dirac: On the Theory of Quantum Mechanics. In: Proceedings of the Royal Society of London. Series A Band 112, 1926, S. 661–677)

Pauli-elv modern alakja:

Wolfgang Pauli, Nobel lecture (December 13, 1946):

„Among the different classes of symmetry, the most important ones (which moreover for two particles are the only ones) are the symmetrical class, in which the wave function does not change its value when the space and spin coordinates of two particles are permuted, and the antisymmetrical class, in which for such a permutation the wave function changes its sign...[The antisymmetrical class is] the correct and general wave mechanical formulation of the exclusion principle.”

(A szimmetria különböző osztályai közül a legfontosabbak (amelyek ráadásul két részecske esetében az egyetlenek) a szimmetrikus osztály, amelyben a hullámfüggvény nem változtatja meg az értékét, ha két részecske tér- és spinkoordinátái permutálódnak, és az antiszimmetrikus osztály, amelyben egy ilyen permutáció esetén a hullámfüggvény megváltoztatja az előjelét... [Az antiszimmetrikus osztály] a kizárási elv helyes és általános hullámmechanikai megfogalmazása.

- **Azonos fajtájú (nem megkülönböztethető) bozonok hullámfüggvénye szimmetrikus**
- **Azonos fajtájú fermionok hullámfüggvénye antiszimmetrikus**

Ebből a szimmetria elvből már a Pauli-elv egyéb vonatkozásai (kizárási elv: egy atomban két elektron kvantumszámai nem lehetnek azonosak, két elektron ugyanolyan spinnel nem lehet ugyanott, stb.) már levezethetők

Nagy magyar fizikusok a kvantummechanika születésénél:

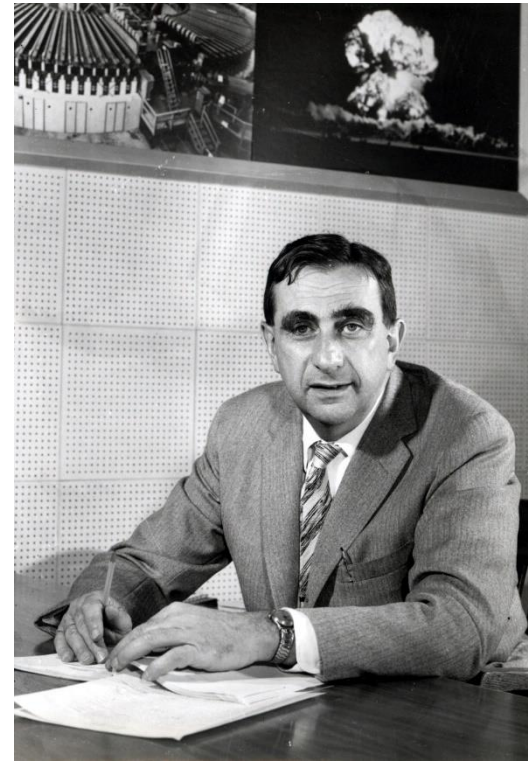
1. Teller Ede
2. Wigner Jenő
3. Neumann János
4. Tisza László
5. Balázs Nándor

Teller Ede

Korai évek: Karlsruhe kémia, matematika tanulmányok. Váltás fizikára 1928 München, Sommerfeldnél. Göttingen villamosbaleset, majd Lipcse doktori munka Heisenberg témavezetésével (1930): „A hidrogén molekulaion () gerjesztett állapotairól”, Jahn-Teller effektus, Látogatás Ferminél, Rockefeller-ösztöndíj Bohrnál

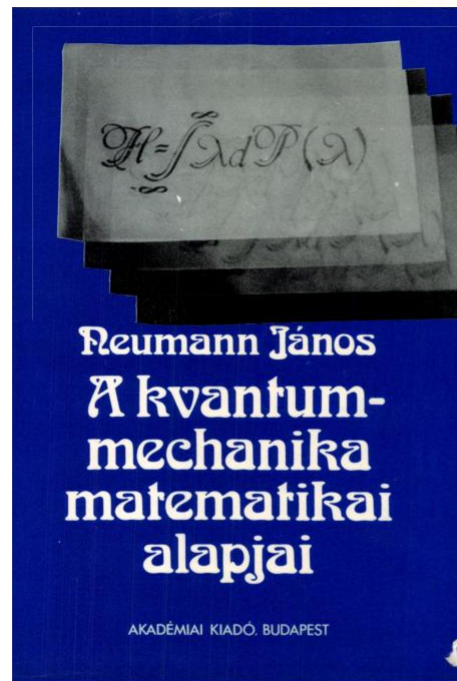
Wigner Jenő

Korai évek: Berlin TU, Aszisztens a Kaiser Wilhelm Institute-ban, Majd Hilberthez megy Göttingába. Ő és Weyl volt a felelős itt a csoportelmélet eltrjesztéséért. Könyve először 1931-ben jelent meg.



Neumann János (külföldön: John von Neumann)

1921-ben beiratkozott a berlini Frigyes Vilmos Egyetemre. Egyetemi évei alatt Fritz Habernél kémiát, Albert Einsteinnél statisztikus mechanikát és Erhardt Schmidtnél matematikát hallgatott. Ott fűzte szorosra kapcsolatát Wignerrel, Szilárd Leóval és Gábor Dénessel. A berlini egyetemmel párhuzamosan beiratkozott a budapesti Magyar Királyi Pázmány Péter Tudományegyetem matematika szakára is. Apja kívánságára 1923-ban Zürichbe ment, hogy a Zürichi Műszaki Egyetemen (ETH) folytassa vegyészmérnöki tanulmányait. Az igazi szerelme azonban mindig is a matematika maradt, amelynek bármikor önfeledten adta át magát. Csakúgy mint korábban Berlinben, a zürichi egyetemen is áthallgatott a matematika előadásokra, Hermann Weyl és Pólya György matematika szemináriumain rendszeresen részt vett, akik hamarosan felfigyeltek rá. Vegyészmérnöki diplomáját Zürichben 1925-ben szerezte meg, diplomamunkája a naftazarin nevű vegyület előállításával foglalkozott. 1932-ben írja meg *A kvantummechanika matematikai alapjai* c. könyvét (Wikipédia részlet)



Az eredeti mű adatai
ИОГАНН ФОН НЕЙМАН
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ
ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
МОСКВА 1964

Fordította
SEBESTYÉN ÁKOS
a fizikai tudományok kandidátusa

Ellenőrző szerkesztő
ABONYI IVÁN
a fizikai tudományok kandidátusa

ISBN 963 05 2295 0

© Akadémiai Kiadó, Budapest

Printed in Hungary

Tisza László

Ortvay felkérésére, 1929-ben ő tartotta az első előadást az alfa-bomlásnak alagút-effektuson alapuló, George Gamow által adott magyarázatáról, azon az elméleti fizikai szeminárium-sorozaton, amely ma Ortvay kollokvium néven fut az ELTE-n. 1930-ban hazatért, de kommunista iratok terjesztésében való részvételért letartóztatták, majd elítélték. Szabadulása után Teller közbenjárására Landau hívta meg 1934-ben Harkovba, az Ukrán Fizikai-Technikai Intézetbe. Tisza László neve az ötödik azon a hosszú listán, amely a híres „Landau-minimum” vizsgát letett fizikusok nevét őrzi. Érdeklődése itt fordult a termodinamika felé; ezt a tudományágat Landau megújította, összekapcsolván a kvantummechanikával. Ezután Szilárd Leó közvetítésével a Párizsban dolgozó Fritz Wolfgang London munkatársa lesz. Az 1938 januárjában felfedezett superfolyékonyság Tisza-féle kétfolyadék elméletével írta be a nevét a fizika történetébe. (Wikipédia)



Balázs Nándor

1949 tavaszán, 22 évesen szökött ki Magyarországról. Amszterdamban doktorált 1951-ben statisztikus fizikából, ezután Schrödinger asszisztense lett az írországi Dublinban 1951–52-ben. Schrödinger küldte a princetoni Institute for Advanced Study intézetbe Einsteinhez dolgozni, ahol egy évet töltött. (Wikipédia)



Megjegyzés:

Nem volt mindenki olyan szerencsés, mint Tisza. Álljon itt Hans Hellmann (Hellmann-Feynman tétel, pseudopotenciál elmélet) története:

A náci hatalomátvétel után, 1933. december 24-én Hellmann-t zsidó felesége miatt "nemkívánatos személyként" elbocsátották. A Szovjetunióba emigrált, és a moszkvai Karpov Intézetben helyezkedett el, ahol többek között az a pseudopotenciálokra dolgozott. Később azonban a nagy tisztogatás során feljelentették, 1938. május 10-én bebörtönözték, majd május 29-én Butovóban kivégezték. Fia, ifjabb Hans Hellmann csak 1991-ben hagyhatta el az egykori Szovjetuniót.

Tanulság:

Ez az igen pezsgő időszak volt, az előfutára a terek kvantálásának, a modern magfizikának és részecskefizikának, az atombomba programoknak. Nem véletlen, hogy sokan a most tárgyalt kutatókból részt vettek az atombomba programokban. De erről máskor.

Köszönetnyilvánítás:

Köszönet mondok a magyar, német és angol Wikipédia-oldalaknak, ahonnan a legtöbb képet vettem az előadás mondanivalójának szemléltetésére.

Köszönet „Az atomoktól a csillagokig” sorozat minden stábtagnak, akik a lebonyolítást, a videofelvételt elkészítését, és az előadás archiválását professzionális módon végzik.