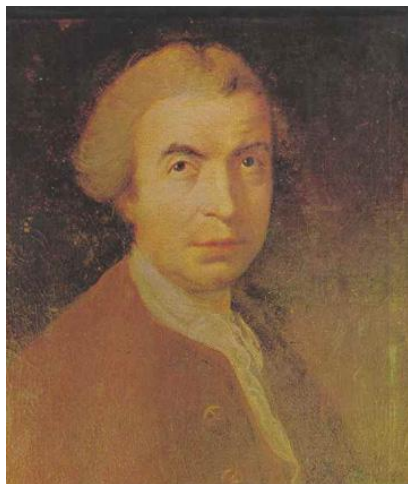


## Modeli atoma...

Grčki filozofi Leukip i Demokrit (5 stoljeće prije Krista) zastupaju ideju da se tvar sastoji od atoma - nedjeljivih čestica, koji se nalaze u neprekidnom gibanju u praznom prostoru.

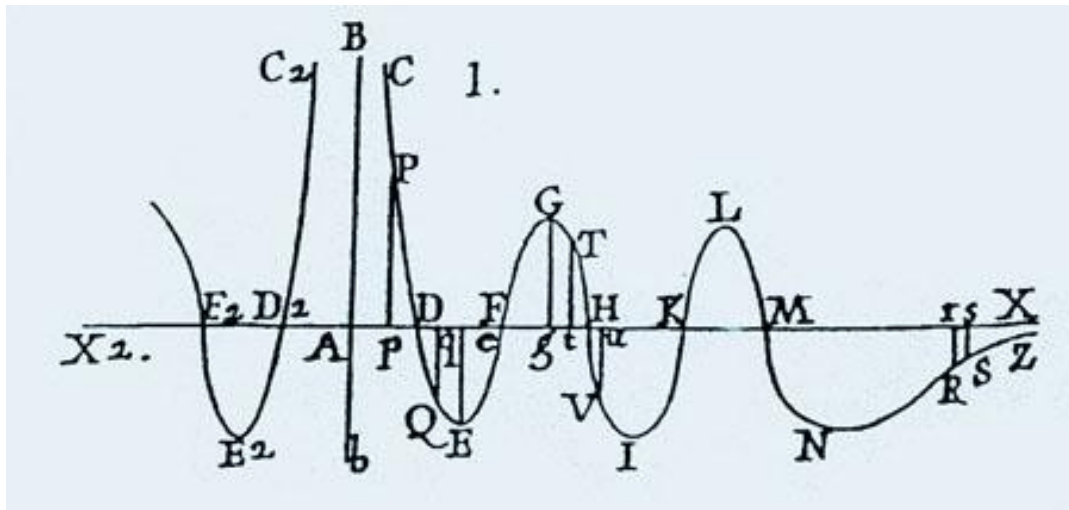
Galilei, Descartes i Newton bili su skloni atomističkom shvaćanju.

**Ruđer Bošković** (1711-1787) - hrvatski filozof i znanstvenik - preteča moderne atomističke teorije



"Po mojem mišljenju osnovni su elementi tvari posve nedjeljive i neprotežne točke koje su u beskrajnom vakuumu tako razasute da su po dvije bilo koje od njih međusobno udaljene nekim razmakom koji se može beskonačno povećati i smanjiti .."

"Zakon tih sila jest takav da su one pri neznatnim udaljenostima odbojne i povećavaju se beskonačno što se te udaljenosti smanjuju ..., povećavanjem udaljenosti prelaze u privlačne ... zatim odbojen sve dok ne počnu postajati trajno privlačne i približno obrnuto razmjerne kvadratima udaljenosti .."



### Boškovićeva krivulja (1763)

According to Bošković, matter is composed of points (*puncta*), which are simple, indivisible, non-extended, impenetrable, discrete and homogenous, and which are sources of forces that act remotely. These points differ from mathematical points in that they possess the property of inertia, and in that there is a force - Bošković's force - acting between them, which is represented by the Bošković curve (lat. *curva Boscovichiana*). At close distances the force is repulsive. As distances increase it reaches the point of neutrality, then becomes attractive, then reaches neutrality again, and finally becomes repulsive again. At farther distances the force is attractive, in accordance with Newton's theory of gravity.

Allowing for multiple repulsive areas in its potential, B. built the "pre-model" of "quark confinement", which is one of the central points of interest in current elementary particle physics. Non-extended points of matter are the building blocks of bigger particles, which in turn build up even bigger masses. B. speaks of them as the particles of the first, second, third, etc. order. This reflects the modern understanding of the structure of matter: quarks and antiquarks

correspond with the particles of the first order, nucleons of the second, atomic nuclei of the third, atoms of the fourth, and molecules of the fifth. The properties of these particles and the distinctions between them are the result of their internal structures. B. was one of the champions of this idea, though the concept of the interconnection between the property and structure of matter was not accepted until the 19th century. (J.J. Berzelius, 1830).

The application of Bošković's law of forces to three points, two of which are placed in the foci of ellipses, is known as Bošković's "model of the atom" (1748). Long before the advent of quantum physics, this model identified the concept of "allowed" and "forbidden" orbits in nature, i.e. it quantifies the trajectory of the particle. J.J. Thomson was directly inspired by Bošković in formulating that idea (1907), which was central for the Bohr Model of the Atom (1913). »The Bohr model of the atom is a direct successor of Bošković's law of forces between microscopically removed particles"... "Where B. sowed 200 years ago, the others have reaped" (H.V. Gill, 1941). Bošković can also be considered the forerunner of thermodynamics, the kinetic theory of matter, the theory of elasticity of solid objects, and the explanation of the form of the crystal.

Werner Heisenberg (Nobel prize for physics in 1932) wrote the following: *Among scientists from the 18th century Boskovic occupies outstanding place as a theologian, philosopher, mathematician, and astronomer. His "Theoria philosophiae naturalis" announced hypotheses which were confirmed only in the course of last fifty years. Indeed, see his graph of regions attractive and repelling forces between material points (elementary particles), the closest region being repelling, tending to infinity (nuclear force! published in his*

*Dissertationes de lumine pars secunda*, 1748), and the farthest region is repelling, corresponding to gravitational force.

With his theory of forces R. Boskovic was a forerunner of modern physics for almost two centuries. It was described in his most important book *Theoria Philosophiae naturalis* (Vienna 1758, Venice 1763, London 1922, Zagreb 1974, American edition in 1966).

Preuzeto sa: <http://nippur.irb.hr/eng/scientist/rudjer.html> and from Hrvatska enciklopedija, vol. II, Be-Da, the Miroslav Krleža Institute of Lexicography, Zagreb 2000

**Moderna teorija** o atomima započinje eksperimentalnim radovima Daltona i Avogadra (18. i 19. stoljeće). Prema Daltonu tvar je izgrađena od kemijskih elemenata čiji su najmanji dijelovi atomi. Avogadro tvrdi da se kemijski elementi sastoje od molekula koje su izgrađene od atoma jednog ili više elemenata.

U eksperimentima s razrjeđenim plinom otkrivene su katodne (Goldstein 1876) i kanalne zrake (Goldstein 1886). Daljnji eksperimenti su pokazali da su katodne zrake elektroni a kanalne zrake pozitivni ioni.

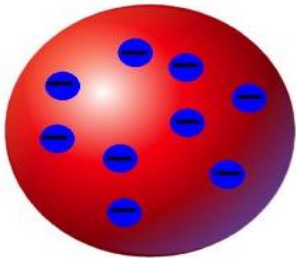
1874. Stoney je došao do zaključka da je minimalni naboj nekog iona oko  $10^{-19}$  C. Taj naboj je nazvao elektron.

J.J. Thompson prvi 1897 godine izmjerio omjer naboja i mase elektrona  $e/m$ , nađeno je da su katodne zrake negativno nabijene čestice, čija je masa oko 2000 puta manja od najlakšeg atoma, atoma vodika.

### **Thomsonov model 1898**

Atom je sferna pozitivna kuglica u kojoj su vrlo sitni elektroni ravnomjerno raspoređeni tako da je takav atom kao cjelina neutralan

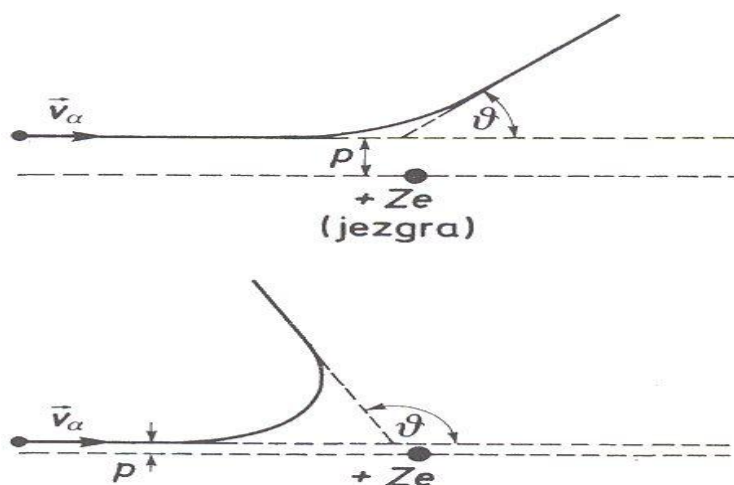
("sirnica s grožđicama" ili puding s grožđicama). Budući da su mase atoma puno veće od mase elektrona, Thomson je pretpostavio da je glavni dio atomske mase pozitivan.



### *Rutherfordovo raspršenje*

E. Rutherford 1909 svojim eksperimentom ukazao na neodrživost Thomsonovog modela.

Rutherford je promatrao raspršenje  $\alpha$ -čestica (jezgre helija  $\text{He}^{++}$ ) na metalnoj foliji. Nakon prolaska kroz metalnu foliju  $\alpha$ -čestice su detektirane na fluorescentnom zaslonu. Na taj način određena je raspodjela  $\alpha$ -čestica u ovisnosti o kutu raspršenja  $\theta$ .



$\alpha$ -čestice se raspršuju na jezgrama zbog odbojne elektrostatske sile.

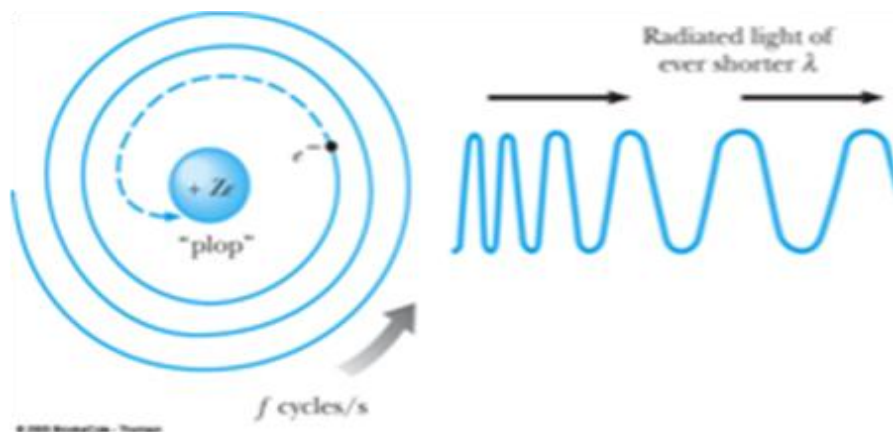
Većina  $\alpha$ -čestica prolazi kroz foliju neznatno odstupajući od svog prvobitnog smjera, manji dio se otklanja pod većim kutom, a neke od njih su odbijene natrag (kut od  $180^\circ$ ).

### ***Rutherfordov model atoma 1911***

Rutherford iznosi svoj model atoma: Atom se sastoji od vrlo male jezgre u kojoj je koncentrirana sva masa atoma i elektrona koji kruže oko jezgre. Jezgra ima pozitivan naboj  $Ze$  ( $Z$ -redni broj kemijskog elementa,  $e$ -naboj elektrona). Oko jezgre kruži  $Z$  elektrona (na približnoj udaljenosti  $10^{-10}$  m) pa je atom kao cjelina neutralan. Veći dio atoma je prazan, iz eksperimentalnih podataka dobio da je promjer atoma  $10^5$  puta veći od promjera jezgre.

### ***Nedostaci Rutherfordovog modela atoma***

Po klasičnoj teoriji elektron koji kruži zrači elektromagnetski val čija je frekvencija jednaka frekvenciji kruženja elektrona, naravno pri tome gubi energiju te se u spiralnoj putanji približava jezgri. Kako se približava jezgri smanjuje mu se polumjer putanje a povećava frekvencija pa bi atom zračio kontinuirani spektar frekvencija.



Ovim modelom se dobro opisuje raspršenje alfa-čestica, ali ne i atomski spektri. Ako se elektroni gibaju po zatvorenim krivuljama, a elektron

emitira elektromagnetske valove čime mu se mijenja brzina, znači da bi elektroni stalno emitirali, gubili energiju i konačno pali na jezgru!

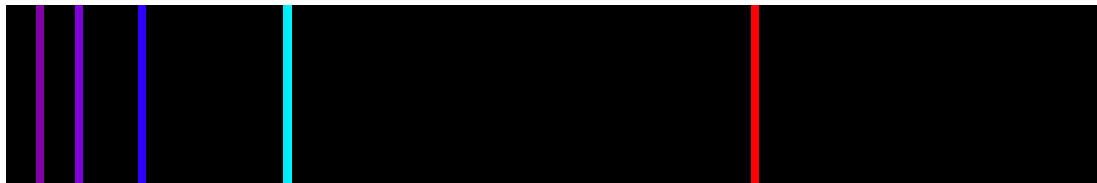
Znači, po *klasičnoj fizici* atom je nestabilan i emitira samo kontinuirani spektar što je sasvim suprotno od eksperimentalno utvrđene stabilnosti atoma i linijskog spektra koje zrače

Klasična fizika ne može objasniti nastanak linijskih spektara atoma; svi pokušaji u tom smislu završili su neuspjehom.

### *Linijski spektri*

Atomi razrijeđenih plinova i para metala, pobuđeni električnom strujom ili grijanjem, emitiraju svjetlost sastavljenu od valova određenih valnih duljina. Kažemo da se spektar te svjetlosti sastoji od niza diskretnih spektralnih linija.

Najjednostavniji spektar je linijski spektar vodika. Iako se spektar sastoji od mnogo linija u infracrvenom, vidljivom i ultraljubičastom području, one se ipak mogu grupirati u pojedine serije. Prvi je to uočio Johann Balmer (1865), pa se danas linije u vidljivom i ultraljubičastom dijelu spektra zovu njegovim imenom (Balmerova serija).



Balmerov *empirijski* izraz za linije u vidljivom dijelu spektra ( $n=3, 4, 5, 6$ ) te u UV ( $n=7, 8, 9, \dots$ )

$$\lambda = 3646 \frac{n^2}{n^2 - 4}$$

Linijske spektre je 1913. objasnio Niels Bohr kvantizacijom kutne količine gibanja te primjenom Einsteinove kvantizacije.

### ***Bohrov poluklasični model atoma 1913***

Bohrovi postulati

#### 1. klasična fizika

Elektron se kreće oko atomske jezgre u kružnim putanjama, pod djelovanjem privlačne kulonske sile, a u skladu s Newtonovim zakonima gibanja.

#### 2. Bohrov kvantni uvjet

Umjesto beskonačno puno putanja koje su moguće u klasičnoj fizici, dozvoljene su samo one kružne staze za koje kutna količina gibanja (angularni moment) elektrona može biti cjelobrojni višekratnik od  $h/2\pi$

$$L = mvr = n \frac{h}{2\pi} = n\hbar, \quad \text{za } n = 1, 2, 3, \dots$$



### 3. Stabilnost atoma

Gibajući se dozvoljenom putanjom elektron ne zrači energiju. Takvo stanje se zove stacionarno stanje. Dakle ukupna energija elektrona na određenoj putanji je konstantna (bazira se na eksperimentalnoj činjenici da je atom stabilan).

### 4. Einsteinova kvantizacija

Elektron spontano prelazi iz stanja više energije (pobuđenog stanja) u stanje niže energije i pri tome emitira kvant svjetlosti energije:

$$h\nu = E_n - E_m$$

Sve dok je elektron vezan u atomu može primiti samo iznose energije koji su jednaki razlici energija između dva stacionarna stanja.

Prema 1. postulatu sila je privlačna i elektron se giba po kružnici jednolikom brzinom  $v$

$$F_{Coulombova} = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} * \frac{Ze^2}{r^2} < 0$$

$$\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} C^2 N^{-1} m^{-2} \Rightarrow k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 Nm^2 C^{-2}$$

$$v = konst. \Rightarrow \sum_i F_i = 0 \Rightarrow F_{Coulombova} = F_{centripetdna}$$

$$\frac{Zke^2}{r_n^2} = \frac{m_e v_n^2}{r_n}$$

Prema 2. postulatu:

$$2\pi m_e v_n r_n = nh \Rightarrow v_n^2 = \frac{n^2 h^2}{4\pi^2 m_e^2 r_n^2}$$

$$\Rightarrow \frac{Zke^2}{r_n} = \frac{m_e n^2 h^2}{4\pi^2 m_e^2 r_n^2} \Rightarrow r_n = \frac{n^2 h^2}{4\pi^2 Z m_e k e^2}$$

$$n = 1 \Rightarrow r_1 = \frac{h^2}{4\pi^2 m_e k e^2 Z} \Rightarrow r_n = \frac{r_1}{Z} n^2$$

$$Z = 1 \Rightarrow r_1 = \frac{h^2}{4\pi^2 m_e k e^2} = 5,3 \cdot 10^{-11} \text{ m} \Rightarrow 2r_1 \cong 1\text{A}$$

$$r_n = n^2 r_1$$

Uvrstimo izraz za radijus elektrona na n-tom stanju u izraz za brzinu (prema 2. postulatu):

$$v_n = \frac{2\pi k e^2 Z}{nh}$$

$$n = 1 \Rightarrow v_1 = \frac{2\pi k e^2 Z}{h} \Rightarrow v_n = \frac{v_1}{n} Z$$

$$Z = 1 \Rightarrow v_1 = 2,2 \cdot 10^6 \text{ ms}^{-1}$$

Kada se u Bohrovom modelu elektron giba brzinom  $v$  po kružnoj putanji polumjera  $r$  ima električnu potencijalnu energiju:

$$E_p = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r}$$

$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ C}^2$  električna permitivnost (dielektričnost)  
vakuuma odnosno zraka

$$k = 1/(4\pi\epsilon_0) = 9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2 \text{ C}^{-2}$$

i kinetičku energiju:

$$E_k = \frac{1}{2} m_e v^2.$$

Ukupna energija elektrona na putanji polumjera  $r$  iznosi:

$$E = E_k + E_p$$

Uvrštavajući izraze za  $E_p$  i  $E_k$  dobivamo energiju elektrona  $E_n$  koji se giba po orbiti polumjera  $r_n$ :

$$E_n = \frac{m_e v_{e,n}^2}{2} + F_{Coulomb} r_n$$

$$E_n = \frac{m_e v_{e,n}^2}{2} - \frac{k e^2 Z}{r_n}$$

$$E_n = \frac{m_e 4\pi^2 e^4 k^2 Z^2}{2n^2 h^2} - \frac{k^2 e^4 4\pi^2 m_e Z^2}{n^2 h^2}$$

$$E_n = -\frac{4\pi^2 e^4 k^2 m_e Z^2}{2n^2 h^2}$$

$$n = 1 \Rightarrow E_1 = -\frac{2\pi^2 e^4 k^2 m_e Z^2}{h}$$

$$E_1 = -\frac{E_1}{n^2} Z^2$$

Za vodikov atom  $Z=1$  i  $E_1 = -13,6\text{eV}$

Dakle, u Bohrovom modelu elektron može imati samo određene vrijednosti energije:

$$E_1 = -13,6\text{eV}$$

$$E_2 = -\frac{1}{4} \cdot 13,6\text{eV} = -3,4\text{eV}$$

$$E_3 = -\frac{1}{9} \cdot 13,6\text{eV} = -1,54\text{eV}$$

$E_4, E_5, \dots, E_n$

Energija je negativna zato što predstavlja energiju vezanja elektrona u atomu. To znači da treba uložiti  $13,6 \cdot \frac{1}{n^2} \text{eV}$  da bi se elektron koji je na  $n$ -toj Bohrovoj orbiti oslobodio iz atoma. Vrijednost energije elektrona u svakoj Bohrovoj orbiti odgovara jednom energetsom nivou. Skup svih tih nivoa predstavlja energetski spektar atoma.

Prema 4. Postulatu

$$\nu = \frac{E_n - E_m}{h}$$

$$\nu = \frac{2\pi^2 m_e k^2 e^4}{h^3} \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) Z^2 \quad \text{--- za vodik } Z = 1$$

$$n > m$$

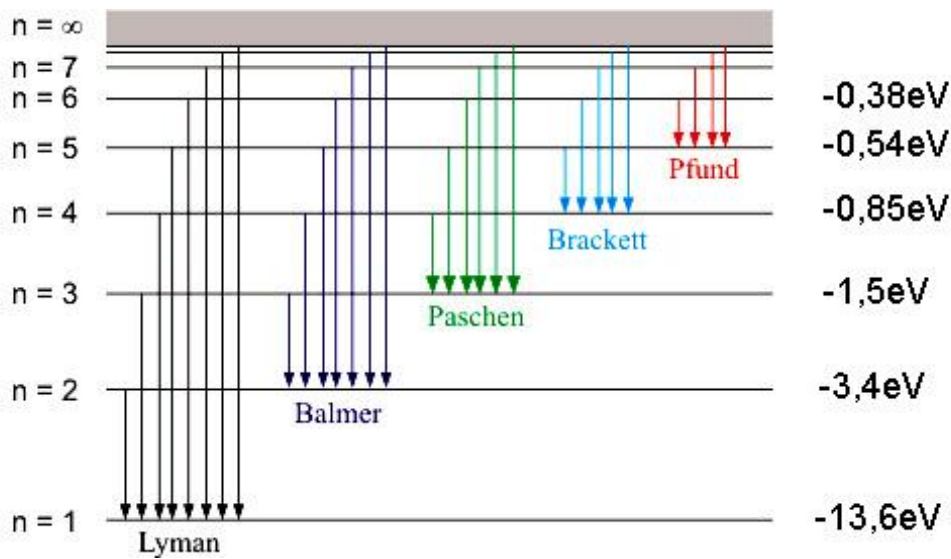
$$\nu = C \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) Z^2$$

$$C = 3,288 \cdot 10^{15} \text{s}^{-1}$$

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{\nu}{c} = \frac{3,288 \cdot 10^{15}}{3 \cdot 10^8} \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) Z^2$$

$$\frac{1}{\lambda} = 1,096 \cdot 10^7 \left( \frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) Z^2$$

$$R_H = 1,096 \cdot 10^7 \Rightarrow \text{Rydbergova konstanta}$$



Bohrov model daje teorijske izraze koji su identični empirijskim izrazima za linijske spektre (Lymanova, Balmerova,..serija). Vrijednost Rydbergove konstante u empirijskim formulama za linijske spektre koja je bila namještena tako da se reproduciraju izmjerene vrijednosti valnih duljina u linijskim spektrima se jednostavno može izračunati temeljem Bohrovog modela.

Teorijska vrijednost Rydbergove konstante u izvrsnom je slaganju s njenom empirijskom vrijednošću.

Valne duljine se izračunavaju po slijedećim izrazima:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n = 2, 3, 4, \dots$$

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n = 3, 4, 5, \dots$$

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n = 4, 5, 6, \dots$$

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n = 5, 6, 7, \dots$$

