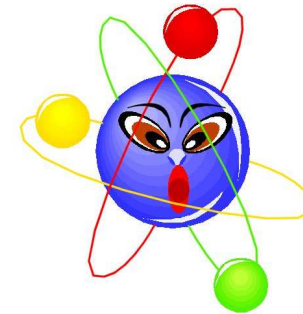


The reduction of matter

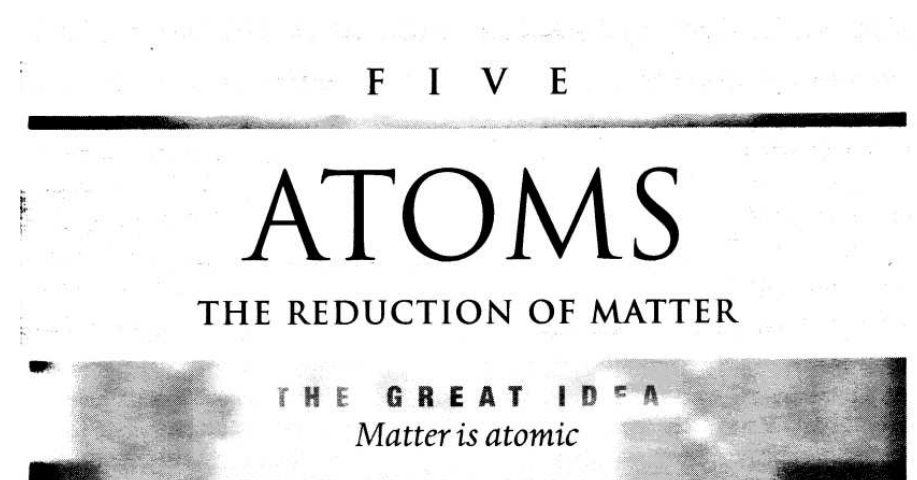
Matter is atomic, 2 maart 2005



Peter van der Straten
Debye instituut, Universiteit Utrecht



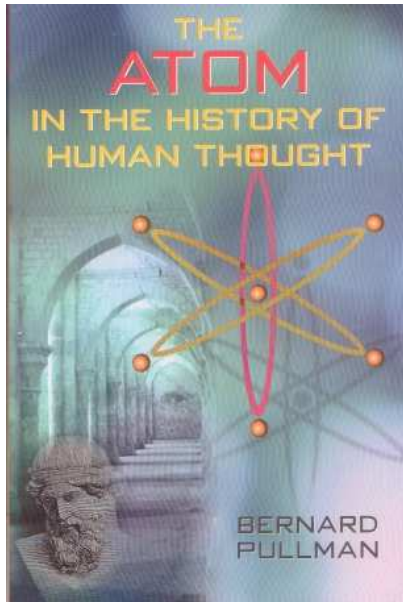
Peter Atkins, *Galileo's Finger*



I will reveal those atoms from which nature creates all things . . .

LUCRETIVS

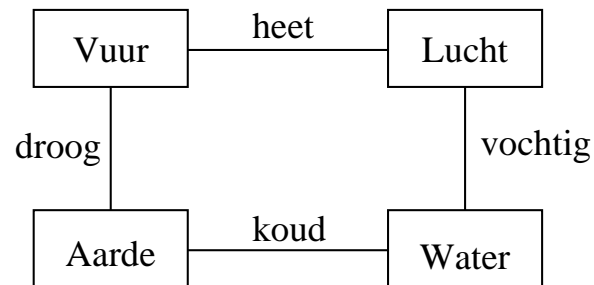




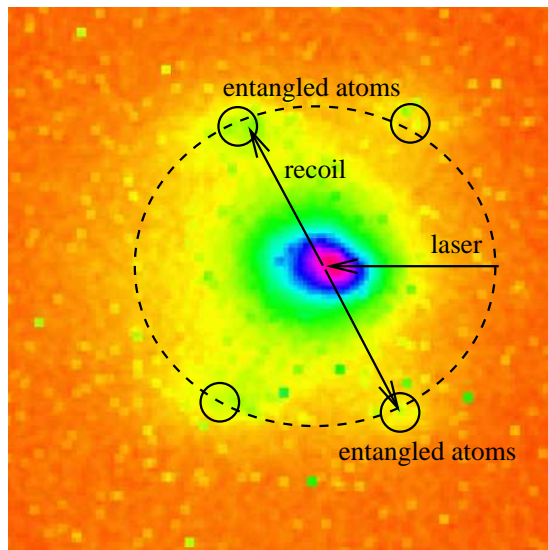
Onderzoeksgroep: Promovendi, technici en wetenschappelijke medewerkers van de onderzoeksgroep *Atom Optics and Ultrafast Dynamics*, Debye instituut.

Boek: *Galileo's finger*, Peter Atkins, Oxford University Press, Oxford, 2003.

Internet: <http://www.wikipedia.org>.



Kapitza-Dirac superstraling



Matter is atomic, Maart 2005: STU31 – p.35/37

Tito Lucretius Carus (95–55 v. Chr.)



De rerum natura (Over de aard der dingen)

- Atomen bewegen in een oneindige leegte.
- Het universum bestaat volledig uit atomen en leegte, niets anders.
- De rede vermoedt de atomen en de leegte om te verklaren, wat de zintuigen waarnemen.

Matter is atomic, Maart 2005: STU02 – p.5/37

Conclusies

- Materie bestaat uit ongeveer 100 elementen.
- Elementen zijn samengesteld uit atomen.
- De “orbitalen” structuur van atomen is verantwoordelijk voor hun periodiciteit.
- Het uitsluitingsprincipe van Pauli is essentieel voor het begrip van het periodiek systeem der elementen. Maar ook voor begrip van moleculaire binding, het gedrag van elektronen in een metaal, etc.

Matter is atomic, Maart 2005: STU32 – p.36/37

Antoine de Lavoisier (1743–94)



De eerste kwantitatieve chemische experimenten

- Waterstof en zuurstof reageren tot water.
- Wegen van reactanten voor en na de reactie \Rightarrow behoud van materie in reacties.

Matter is atomic, Maart 2005: STU03 – p.6/37

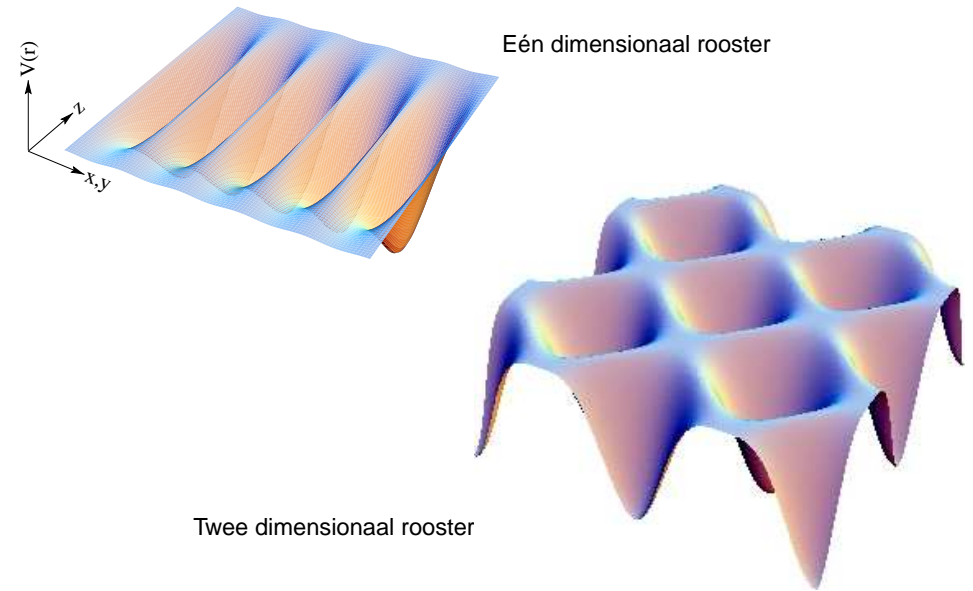
Sir Humphry Davy (1778–1829)



Elektrolyse: splitsing van chemische elementen d.m.v. stroom in een geleidende oplossing. Ontdekker van kalium, natrium, calcium, barium en magnesium (1807–1808).



Optische roosters in één- en twee-dimensies



John Dalton (1766–1844)



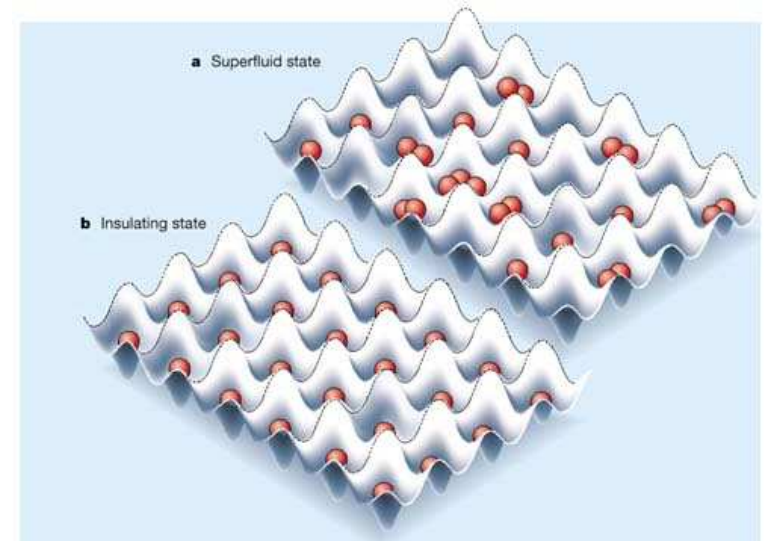
Eerste tabel van atomaire massa's (6 september 1803)

ELEMENTS				
	Hydrogen	1	Stoutian	46
	Azote	5	Barytes	68
	Carbon	5	Iron	50
	Oxygen	7	Zinc	56
	Phosphorus	9	Copper	56
	Sulphur	13	Lead	90
	Magnesia	20	Silver	190
	Lime	24	Gold	190
	Soda	28	Platina	190
	Potash	42	Mercury	167

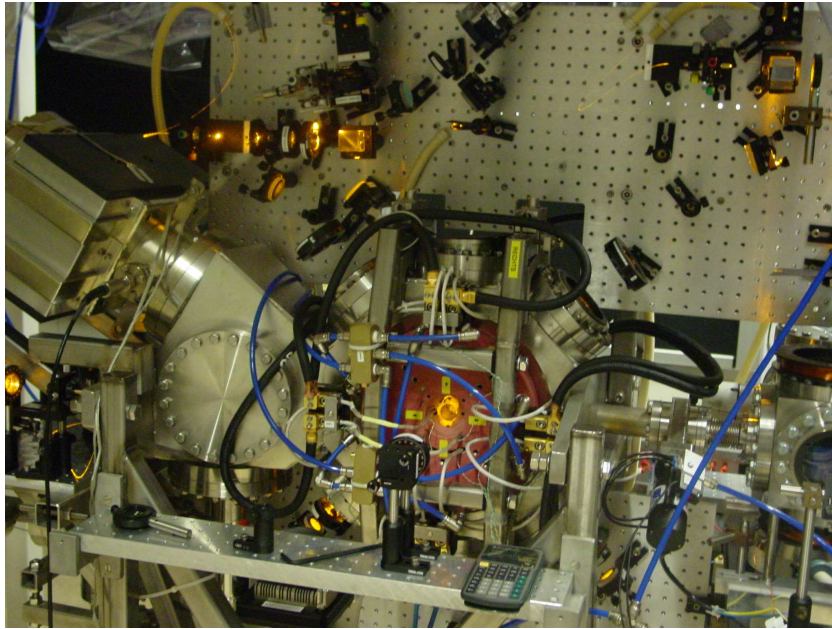


Kunstzinnige kijk

Fase overgang van superfluïde naar isolator toestand:

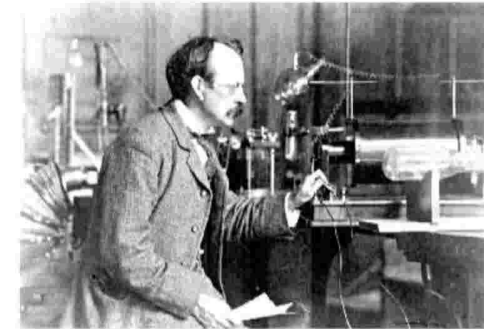
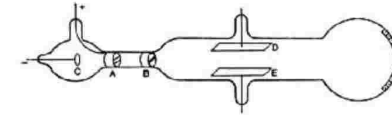


Huidige opstelling



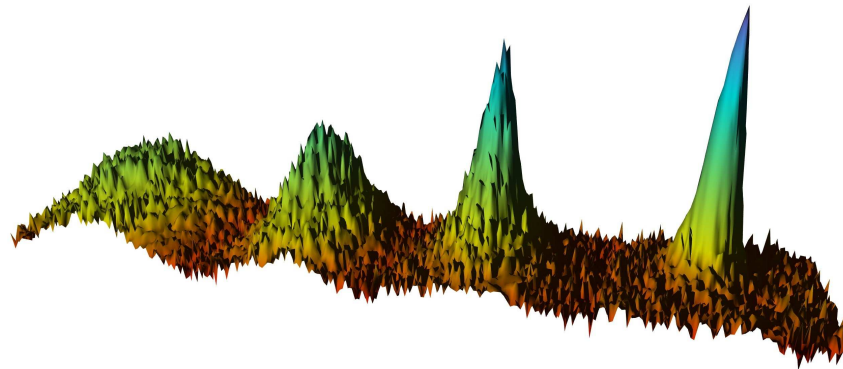
Matter is atomic, Maart 2005: STU28 – p.31/37

J. J. Thomson (1856–1940)



Matter is atomic, Maart 2005: STU06 – p.9/37

BEC: 11 augustus 2004



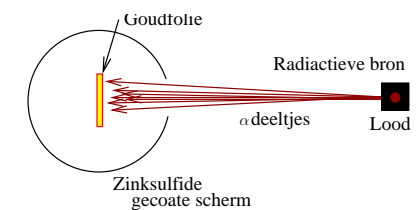
Temperaturen: $2.2 \mu\text{K}$, 816 nK, 330 nK and $< 200 \text{ nK}$.

Matter is atomic, Maart 2005: STU29 – p.32/37

Ernest Rutherford (1871–1937)

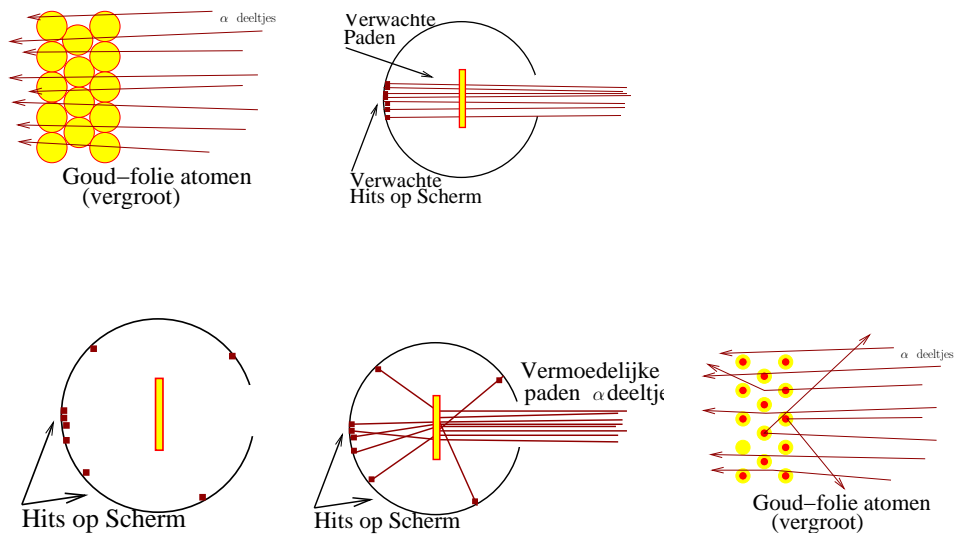


In science there is only physics; all the rest is stamp collecting.



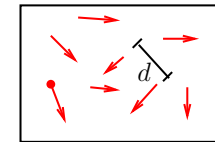
Matter is atomic, Maart 2005: STU07 – p.10/37

Verstrooiing van α -deeltjes

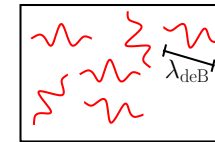


Matter is atomic, Maart 2005: STU08 – p.11/37

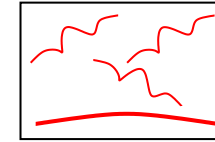
Bose-Einstein condensatie



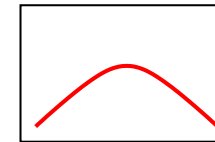
Hoge temperatuur T
thermische snelheid v
dichtheid $1/d^3$
“Biljard ballen”



Lage temperatuur
deBroglie golflengte
 $\lambda_{deB} = h/mv \propto 1/\sqrt{T}$
“Golf pakketjes”



$T = T_C$
Bose-Einstein condensatie
 $\lambda_{deB} = d$
“Materiegolven overlappen”



$T = 0$
Pure Bose condensaat
“Gigantische materiegolf”

Matter is atomic, Maart 2005: STU25 – p.29/37

Spectroscopie van waterstof



Tabel van overgangen in waterstof

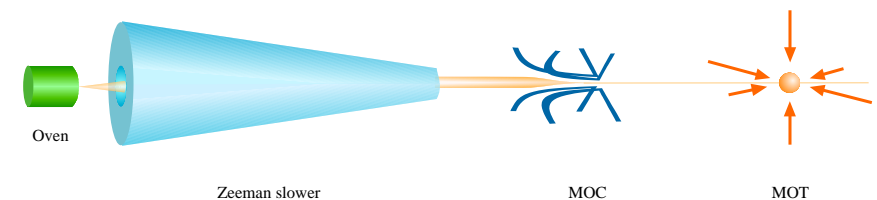
Balmer series	H_α	656.279 nm
	H_β	486.133 nm
	H_γ	434.047 nm
	H_δ	410.174 nm

Balmer (1885):

$$\nu_{ab} = R \left(\frac{1}{n_a^2} - \frac{1}{n_b^2} \right) \quad \lambda_{ab} = \frac{c}{\nu_{ab}}$$

Matter is atomic, Maart 2005: STU09 – p.12/37

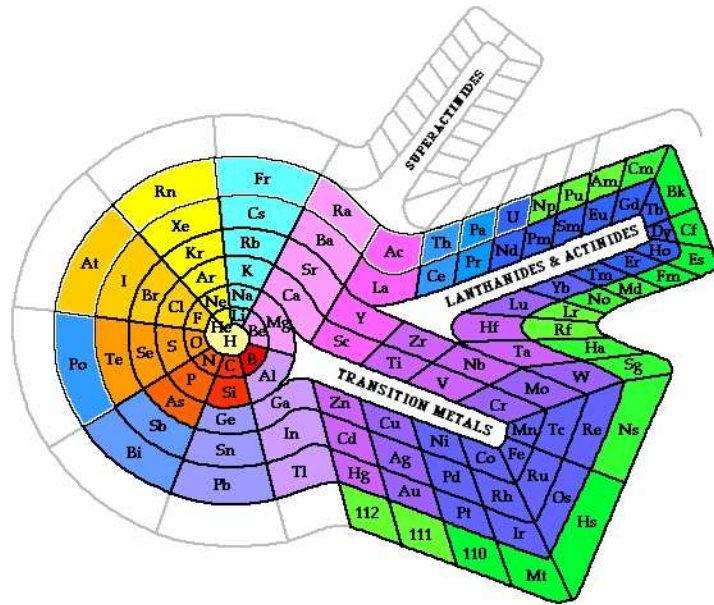
Experimentele haalbaarheid



Eigenschappen van de atomen	N	n (atoms/cm ³)	T (μK)
zeeman-geladen MOT	6×10^9	3×10^{11}	320
magnetische val	2×10^9	2.6×10^{10}	340
verdampingskoeling	5×10^6	3×10^{13}	0.15

Matter is atomic, Maart 2005: STU26 – p.30/37

Spiraal van chemische elementen



Matter is atomic, Maart 2005: STU23 – p.27/37

Niels Bohr (1885–1962)



Anyone who is not shocked by quantum theory has not understood a single word.

Postulate I: That an atomic system can, and can only, exist permanently in a certain series of states corresponding to a discontinuous series of values for its energy, and that consequently any change of the energy of the system, including emission and absorption of electromagnetic radiation, must take place a complete transition between two such states. These states will be denoted as the stationary states of the system.

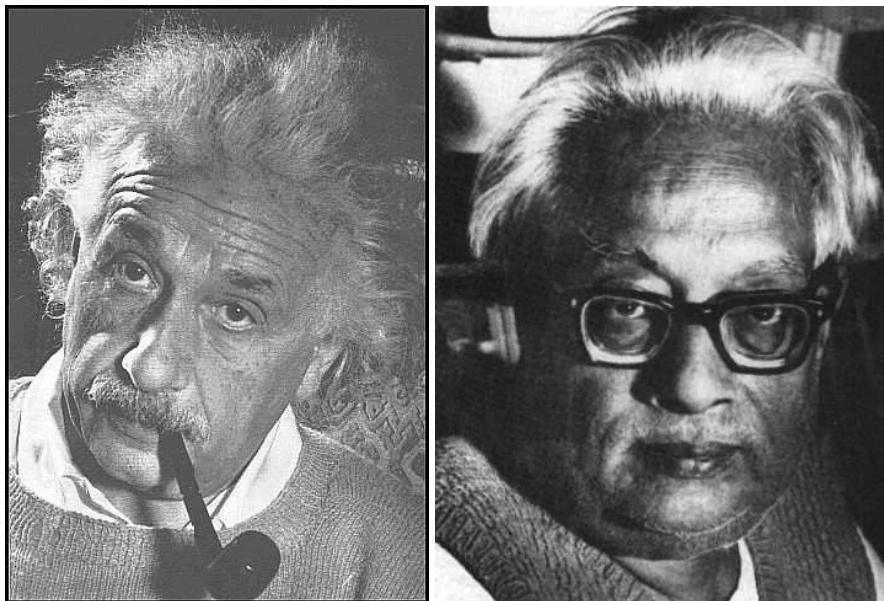
Postulate II: That the radiation absorbed or emitted during a transition between two stationary states is 'unifrequent' and possesses a frequency ν , given by the relation

$$E' - E'' = h\nu,$$

where h is Planck's constant and where E' and E'' are the values of the energy in the two states under consideration.

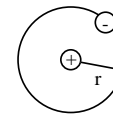
Matter is atomic, Maart 2005: STU10 – p.13/37

Currency of discourse



Matter is atomic, Maart 2005: STU24 – p.28/37

Bohrs waterstof model (1913)



Extra aanname: de beweging van het elektron rond de kern is een cirkel!

Balans tussen Coulomb en centrifugale kracht:

$$F_{\text{coul}} = F_{\text{cent}} \quad \text{of} \quad \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right) \frac{1}{r^2} = \frac{mv^2}{r}.$$

Tweede postulaat:

$$h\nu = E' - E'' = \frac{1}{2} \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right) \left(\frac{1}{r'} - \frac{1}{r''} \right).$$

Conclusie uit het Bohr model m.b.v. de Balmer formule:

$$r = a_0 n^2.$$

Matter is atomic, Maart 2005: STU11 – p.14/37

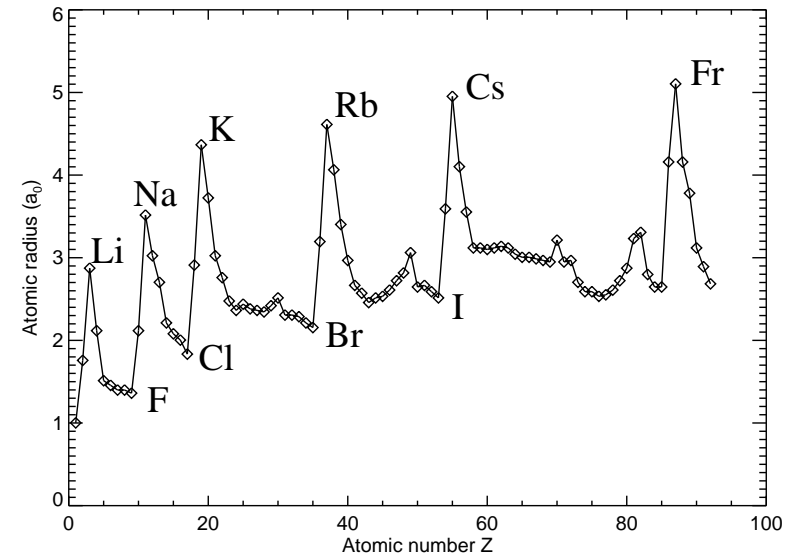
Correspondentie principe (1913)

Voor grote “quantum”-getallen, gaat het gedrag van systemen over van quantum-mechanisch naar klassiek

De overgangsfrekwentie voor een quantum-mechanische overgang in het waterstof atoom van $n \rightarrow n - 1$ moet gelijk zijn aan de oscillatie-frekwentie van het elektron rond de kern. Dit leidt tot een maat a_0 voor de baan van het elektron rond de kern:

$$a_0 = \left(\frac{4\pi\epsilon_0}{e^2} \right) \frac{\hbar^2}{m} = 0.529 \times 10^{-10} \text{ m.}$$

Atomaire stralen



Bohr nader bekeken (1913)

Bohr model leidt tot een straal voor de elektron beweging rond de kern:

$$a_0 = 0.529 \times 10^{-10} \text{ m}$$

Snelheid van het elektron rond de kern:

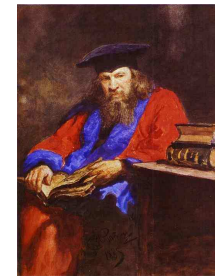
$$v = 2.19 \times 10^6 \text{ m/s}^2 \approx 0.01c,$$

met c de lichtsnelheid.

Baanimpulsmoment van het elektron rond de kern (quantisatie!):

$$|\vec{L}| = |\vec{p} \times \vec{r}| = n\hbar$$

Dimitri Mendeleev (1834–1907)

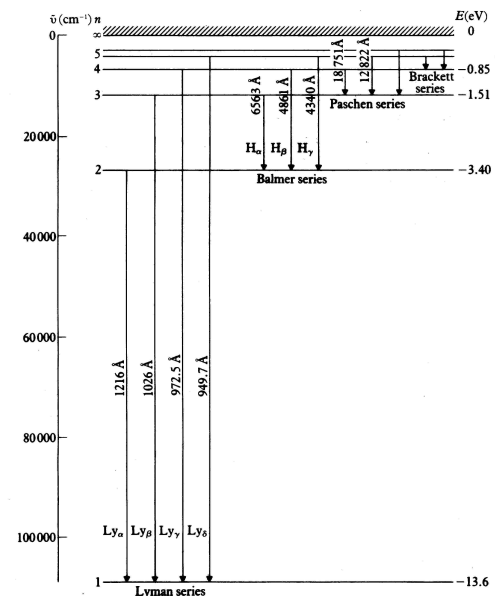


Reihen	Gruppe I. R ² O	Gruppe II. RO	Gruppe III. R ² O ³	Gruppe IV. RH ⁴ RO ²	Gruppe V. RH ³ R ² O ⁵	Gruppe VI. RH ² RO ³	Gruppe VII. RH R ² O ⁷	Gruppe VIII. RO ⁴
1	H = 1							
2	Li = 7	Be = 9,4	B = 11	C = 12	N = 14	O = 16	F = 19	
3	Na = 23	Mg = 24	Al = 27,3	Si = 28	P = 31	S = 32	Cl = 35,5	
4	K = 39	Ca = 40	- = 44	Ti = 48	V = 51	Cr = 52	Mn = 55	Fe = 56, Co = 59 Ni = 59, Cu = 63
5	(Cu = 63)	Zn = 65	- = 68	- = 72	As = 75	Se = 78	Br = 80	
6	Rb = 85	Sr = 87	?Yt = 88	Zr = 90	Nb = 94	Mo = 96	- = 100	Ru = 104, Rh = 104 Pd = 106, Ag = 108
7	Ag = 108	Cd = 112	In = 113	Sn = 118	Sb = 122	Te = 125	J = 127	
8	Cs = 133	Ba = 137	?Di = 138	?Ce = 140	-	-	-	- - - -
9	(-)	-	-	-	-	-	-	- - - -
10	-	-	?Er = 178	?La = 180	Ta = 182	W = 184	-	Os = 195, Ir = 197, Pt = 198, Au = 199
11	(Au = 199)	Hg = 200	Tl = 204	Pb = 207	Bi = 208	-	-	-
12	-	-	-	Th = 231	-	U = 240	-	- - - -

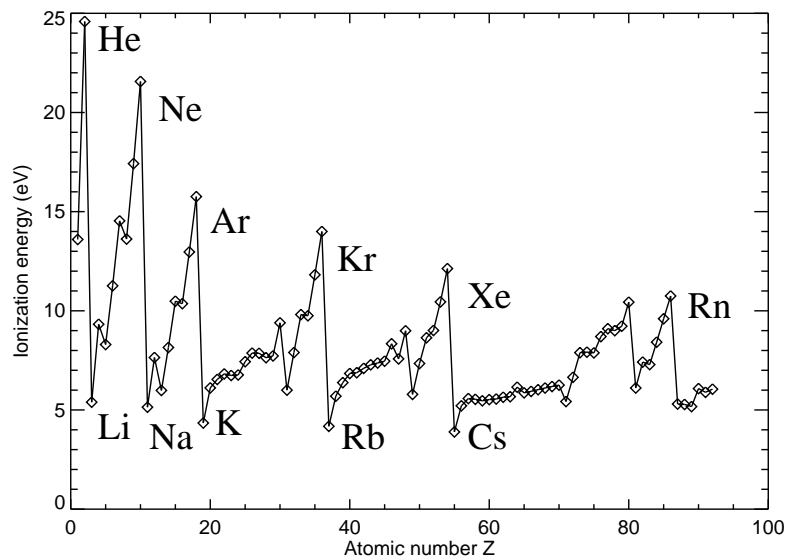
Periodiek systeem der elementen

1 H Hydrogen 1.00																	2 He Helium 4.00
3 Li Lithium 6.93	4 Be Beryllium 9.01											5 B Boron 10.81	6 C Carbon 12.01	7 N Nitrogen 14.00	8 O Oxygen 15.99	9 F Fluorine 18.99	10 Ne Neon 20.18
11 Na Sodium 22.99	12 Mg Magnesium 24.31											13 Al Aluminium 26.98	14 Si Silicon 28.08	15 P Phosphorus 30.97	16 S Sulphur 32.06	17 Cl Chlorine 35.45	18 Ar Argon 39.94
19 K Potassium 39.10	20 Ca Calcium 40.08	21 Sc Scandium 44.95	22 Ti Titanium 47.88	23 V Vanadium 50.94	24 Cr Chromium 51.99	25 Mn Manganese 54.93	26 Fe Iron 55.84	27 Co Cobalt 58.93	28 Ni Nickel 58.71	29 Cu Copper 63.54	30 Zn Zinc 65.37	31 Ga Gallium 69.72	32 Ge Germanium 72.59	33 As Arsenic 74.92	34 Se Selenium 78.96	35 Br Bromine 79.90	36 Kr Krypton 83.80
37 Rb Rubidium 85.47	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.90	40 Zr Zirconium 91.22	41 Nb Niobium 92.90	42 Mo Molybdenum 95.94	43 Tc Technetium 99	44 Ru Ruthenium 101.07	45 Rh Rhodium 102.91	46 Pd Palladium 106.4	47 Ag Silver 107.87	48 Cd Cadmium 112.40	49 In Indium 114.82	50 Sn Tin 118.69	51 Sb Antimony 121.75	52 Te Tellurium 127.60	53 I Iodine 126.90	54 Xe Xenon 131.30
55 Cs Cesium 132.91	56 Ba Barium 137.34	57 La Lanthanum 138.91	58 Ce Cerium 140.12	59 Pr Praseodymium 140.91	60 Nd Neodymium 144.24	61 Pm Promethium 145	62 Sm Samarium 150.35	63 Eu Europium 151.96	64 Gd Gadolinium 157.25	65 Tb Terbium 158.92	66 Dy Dysprosium 162.50	67 Ho Holmium 164.93	68 Er Erbium 167.26	69 Tm Thulium 168.93	70 Yb Ytterbium 173.04		
87 Fr Francium 223	88 Ra Radium 226	89 Ac Actinium 227	90 Th Thorium 232.04	91 Pa Protactinium 231	92 U Uranium 238.03	93 Np Neptunium 237	94 Pu Plutonium 244	95 Am Americium 243	96 Cm Curium 247	97 Bk Berkelium 247	98 Cf Californium 251	99 Es Einsteinium 254	100 Fm Fermium 257	101 Md Mendelevium 258	102 No Nobelium 254		

Spectrum van atomaire waterstof (H)



Ionisatie potentialen



Erwin Schrödinger (1887–1961)



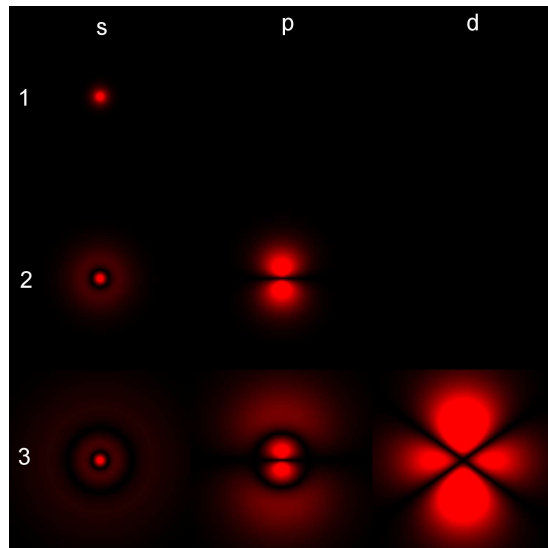
Hamiltoniaan:

$$H = \frac{-\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(r)$$

Schrödinger vergelijking voor het waterstof atoom:

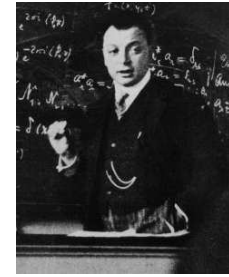
$$\left(\frac{-\hbar^2}{2m} \left\{ \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin^2 \theta \frac{\partial}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} \right\} + V(r) \right) \psi(r, \theta, \phi) = E \psi(r, \theta, \phi)$$

Orbitalen van elektronen in het waterstof atoom



Matter is atomic, Maart 2005: STU17 – p.19/37

Wolfgang Pauli (1900–58)



Het uitsluitings-principe van Pauli:

Twee identieke fermionen (elektronen, protonen, neutronen) mogen niet dezelfde quantum toestand bezetten

“Spin is the source of our individuality”

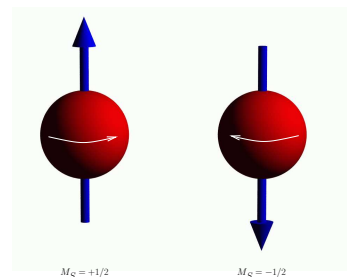
Matter is atomic, Maart 2005: STU19 – p.21/37

Eigenschappen van het elektron

Massa: $m_e = 9.1 \times 10^{-31}$ kg, d.w.z. $\approx 1/2000$ deel van de massa van het waterstof atoom.

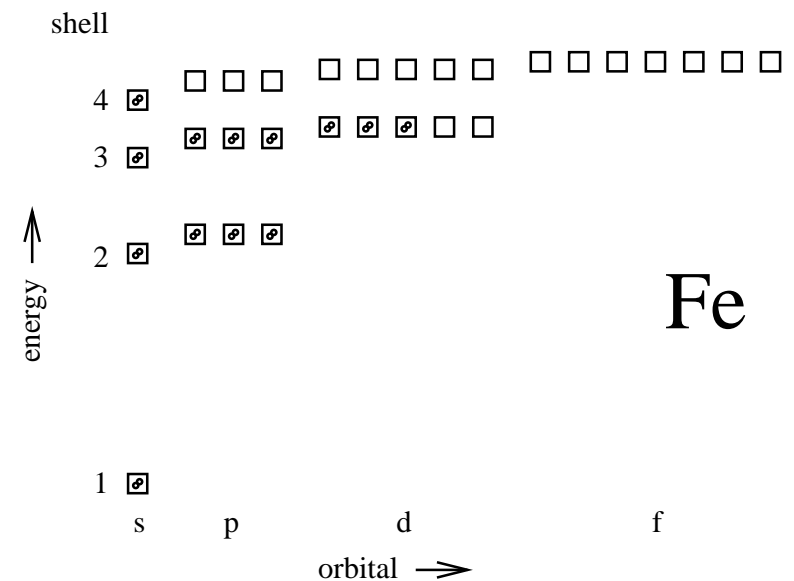
Lading: $e = -1.6 \times 10^{-19}$ C, d.w.z. precies het tegengestelde van de lading van de kern van het waterstof atoom (het waterstof atoom is neutraal!)

Spin:



Matter is atomic, Maart 2005: STU18 – p.20/37

Aufbau principle



Fe

Matter is atomic, Maart 2005: STU20 – p.22/37