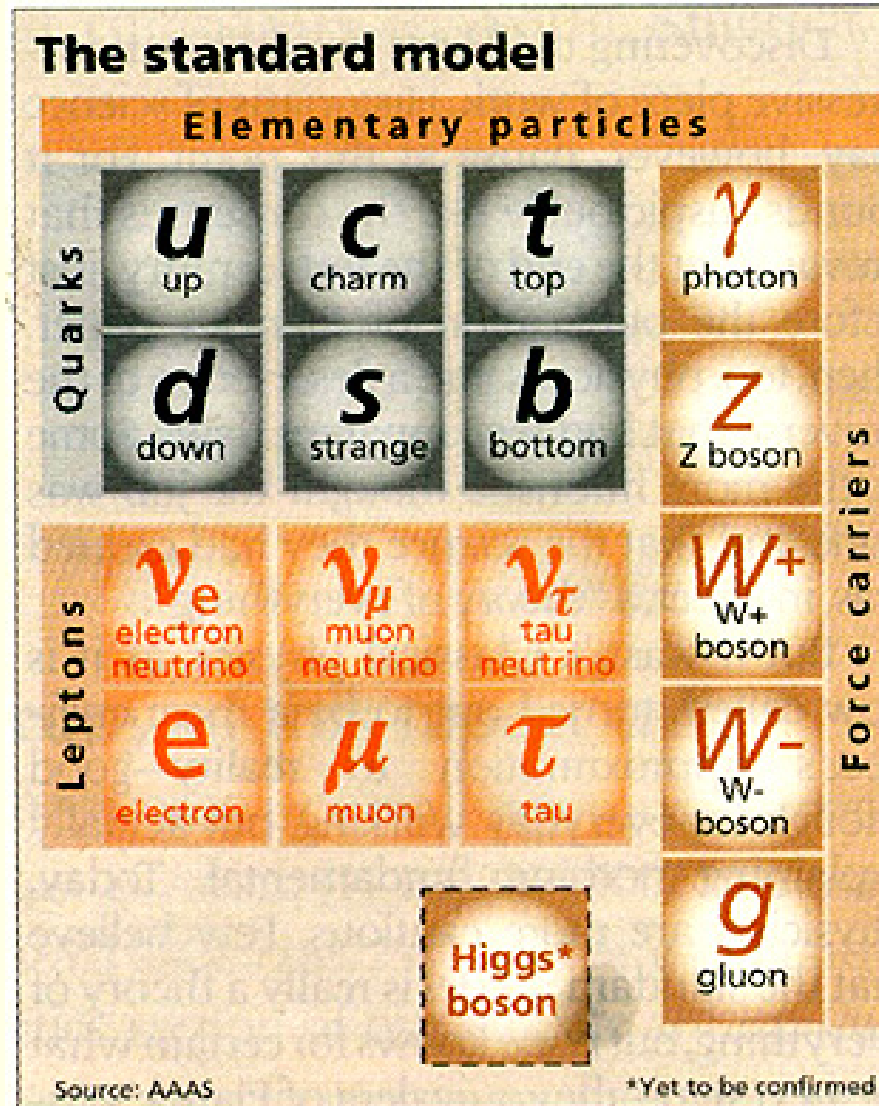


Atomoktól a csillagokig: 2009. október 8.

# Részecske vagy hullám: térelmélet az asztalon

Bajnok Zoltán

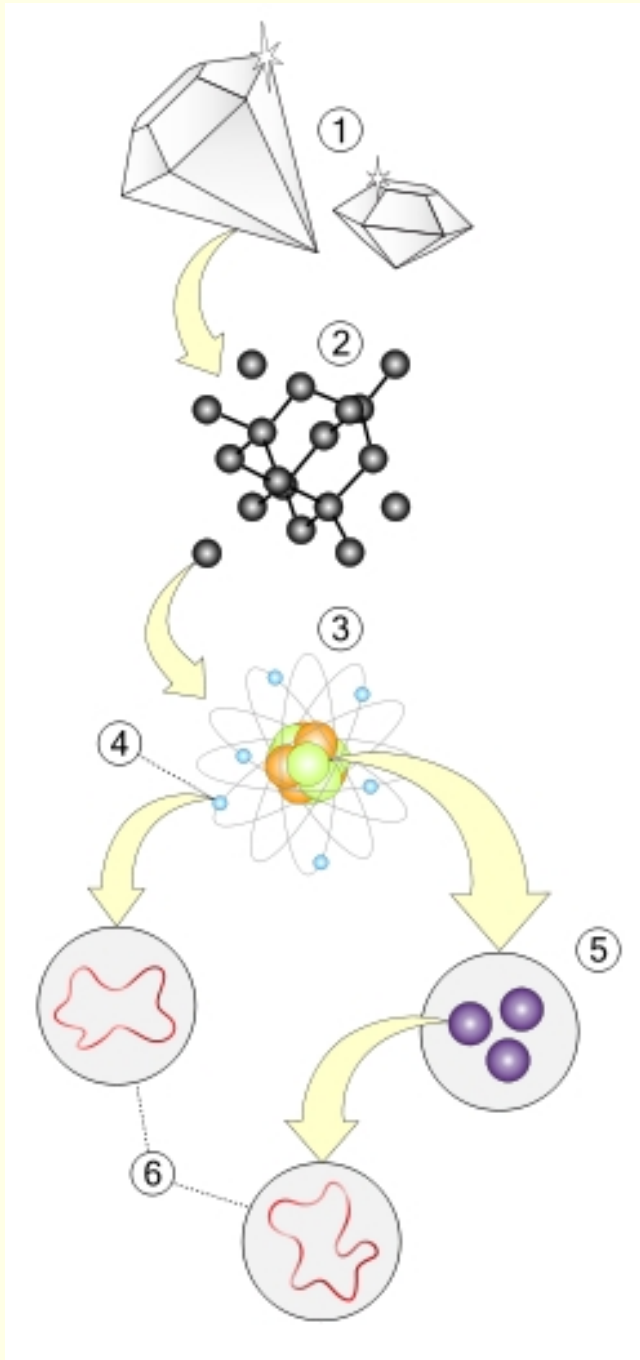
MTA, Elméleti Fizikai Kutatócsoport



## Vázlat

- 1. Az anyagrészecskék osztályozása
  - elemek periódusos rendszere
  - magok szerkezete, gyorsítók: elemi részecske állatkert
  - kvarkok és leptonok: a részecskefizika *periódusus rendszere*
- 2. Az elemi kölcsönhatások
  - gravitációs ,elektromos-mágneses, erős, gyenge
- 3. relativitáselmélet:
  - kölcsönhatás  $\leftrightarrow$  részecske
- 4. kvantummechanika
  - részecske  $\leftrightarrow$  hullám
- 5. Játékmodell: relativisztikus térelmélet az asztalon
  - lineáris rezgések: Higgs (fény) modellje
  - nemlineáris gerjesztések: részecskék modellje
  - relativisztikus effektusok: távolság kontrakció, idő dilatáció

## Anyagrészecskék osztályozása



Anyag: elemi részekből épül fel (Démokritosz)

Kémia: Atomok/molekulák, kémiai kötések

Atomfizika: atommag, elektron, elektromágneses erő

Magfizika: neutron, proton, magerők

Részecskefizika: kvarkok, leptonok,

Húrelmélet: hűrok

## Kémia: az elemek periódusos rendszere

**Periodic Table of the Elements** © www.elementsdatabase.com

- hydrogen
- alkali metals
- alkali earth metals
- transition metals

- poor metals
- nonmetals
- noble gases
- rare earth metals

H <sup>1</sup>																	He <sup>2</sup>
Li <sup>3</sup>	Be <sup>4</sup>											B <sup>5</sup>	C <sup>6</sup>	N <sup>7</sup>	O <sup>8</sup>	F <sup>9</sup>	Ne <sup>10</sup>
Na <sup>11</sup>	Mg <sup>12</sup>											Al <sup>13</sup>	Si <sup>14</sup>	P <sup>15</sup>	S <sup>16</sup>	Cl <sup>17</sup>	Ar <sup>18</sup>
K <sup>19</sup>	Ca <sup>20</sup>	Sc <sup>21</sup>	Ti <sup>22</sup>	V <sup>23</sup>	Cr <sup>24</sup>	Mn <sup>25</sup>	Fe <sup>26</sup>	Co <sup>27</sup>	Ni <sup>28</sup>	Cu <sup>29</sup>	Zn <sup>30</sup>	Ga <sup>31</sup>	Ge <sup>32</sup>	As <sup>33</sup>	Se <sup>34</sup>	Br <sup>35</sup>	Kr <sup>36</sup>
Rb <sup>37</sup>	Sr <sup>38</sup>	Y <sup>39</sup>	Zr <sup>40</sup>	Nb <sup>41</sup>	Mo <sup>42</sup>	Tc <sup>43</sup>	Ru <sup>44</sup>	Rh <sup>45</sup>	Pd <sup>46</sup>	Ag <sup>47</sup>	Cd <sup>48</sup>	In <sup>49</sup>	Sn <sup>50</sup>	Sb <sup>51</sup>	Te <sup>52</sup>	I <sup>53</sup>	Xe <sup>54</sup>
Cs <sup>55</sup>	Ba <sup>56</sup>	La <sup>57</sup>	Hf <sup>72</sup>	Ta <sup>73</sup>	W <sup>74</sup>	Re <sup>75</sup>	Os <sup>76</sup>	Ir <sup>77</sup>	Pt <sup>78</sup>	Au <sup>79</sup>	Hg <sup>80</sup>	Tl <sup>81</sup>	Pb <sup>82</sup>	Bi <sup>83</sup>	Po <sup>84</sup>	At <sup>85</sup>	Rn <sup>86</sup>
Fr <sup>87</sup>	Ra <sup>88</sup>	Ac <sup>89</sup>	Unq <sup>104</sup>	Unp <sup>105</sup>	Unh <sup>106</sup>	Uns <sup>107</sup>	Uno <sup>108</sup>	Une <sup>109</sup>	Unn <sup>110</sup>								

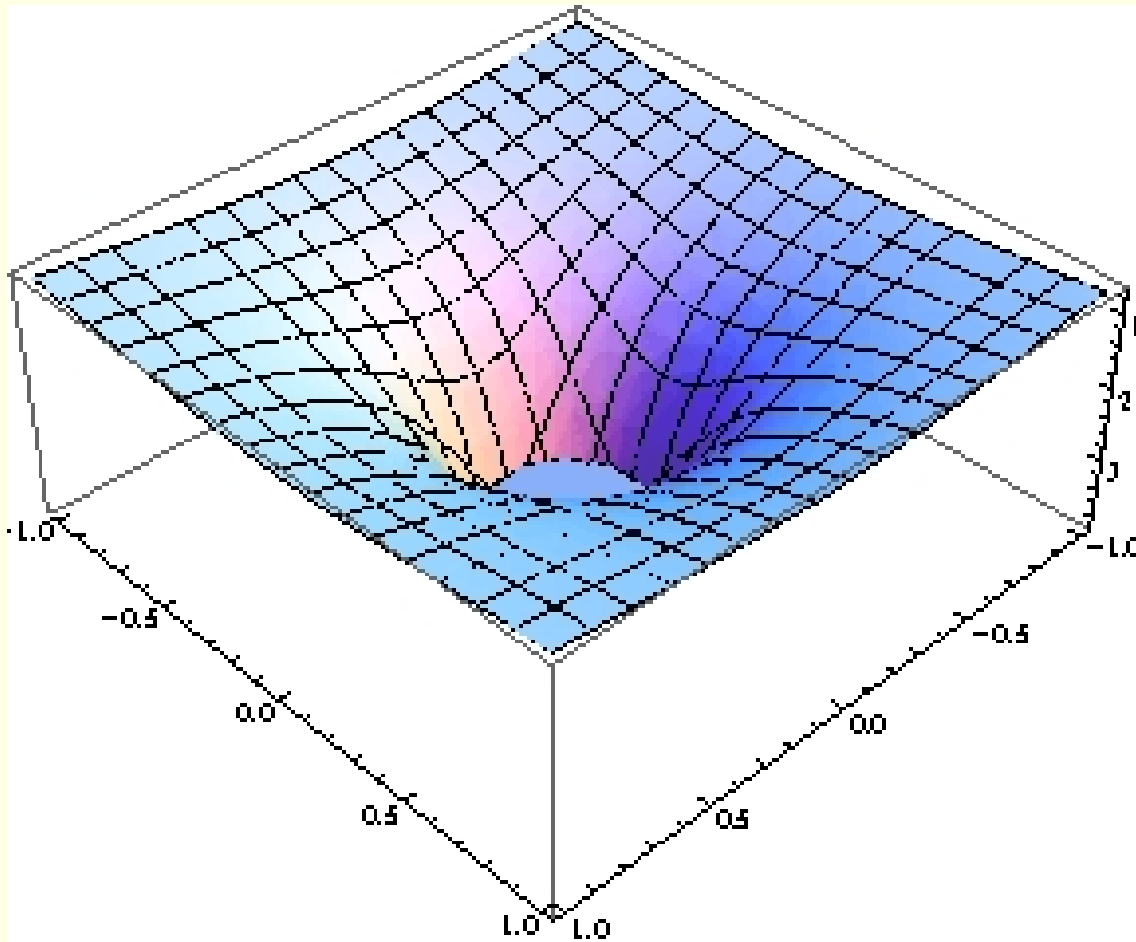
58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

## Atomfizika:

Elektromos kölcsönhatás (potenciális energia  $V(r) = k \frac{Zq}{r}$ )

## Atomfizika:

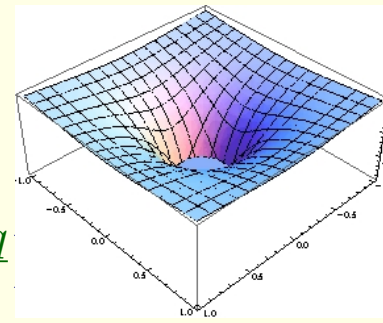
Elektromos kölcsönhatás (potenciális energia  $V(r) = k\frac{Zq}{r}$ )



## Atomfizika:

Elektromos kölcsönhatás (potenciális energia  $V(r) = k \frac{Zq}{r}$ )

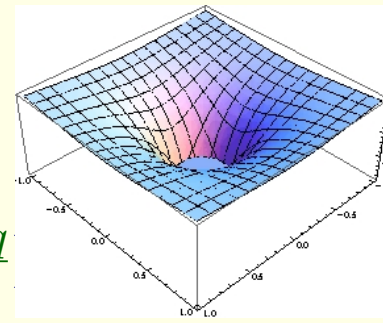
Kvantum mechanika (anyag is hullám)



## Atomfizika:

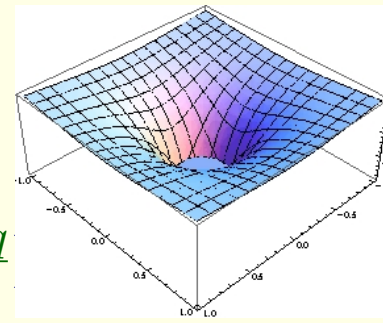
Elektromos kölcsönhatás (potenciális energia  $V(r) = k \frac{Zq}{r}$ )

Kvantum mechanika (anyag is hullám)  $H\Psi = \left(-\frac{(\hbar\nabla)^2}{2m} + V(r)\right)\Psi = E\Psi$



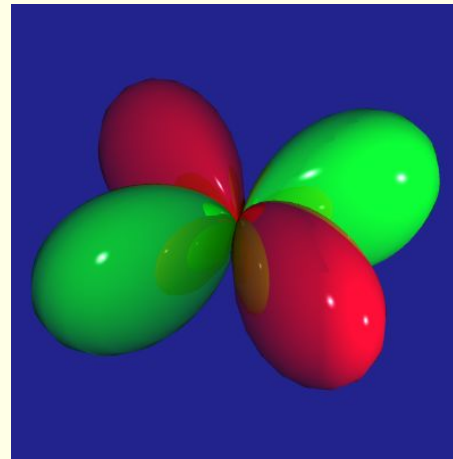
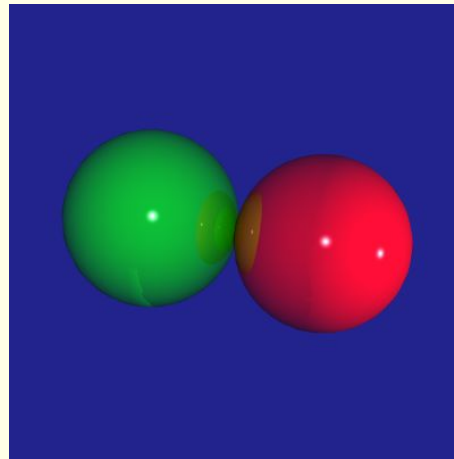
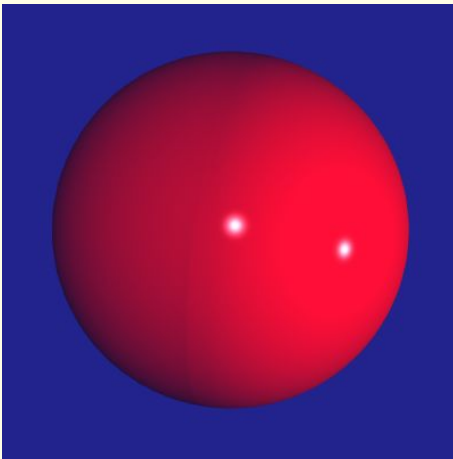


## Atomfizika:



Elektromos kölcsönhatás (potenciális energia  $V(r) = k \frac{Zq}{r}$ )

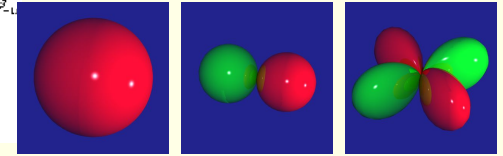
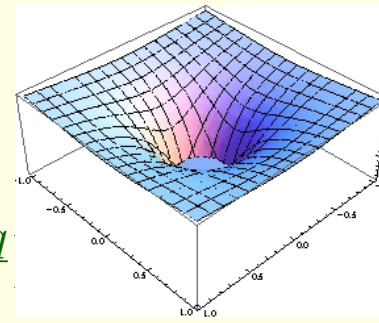
Kvantum mechanika (anyag is hullám)  $H\Psi = \left(-\frac{(\hbar\nabla)^2}{2m} + V(r)\right)\Psi = E\Psi$



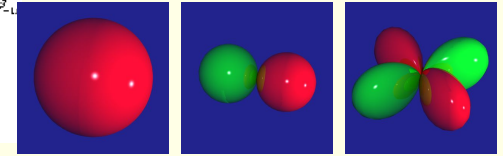
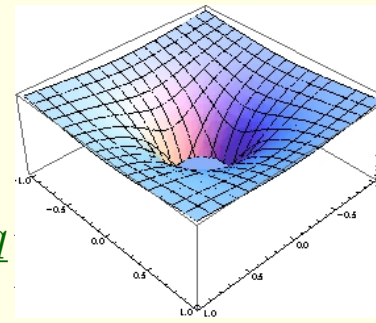
## Atomfizika:

Elektromos kölcsönhatás (potenciális energia  $V(r) = k \frac{Zq}{r}$ )

Kvantum mechanika (anyag is hullám)  $H\Psi = \left(-\frac{(\hbar\nabla)^2}{2m} + V(r)\right)\Psi = E\Psi$

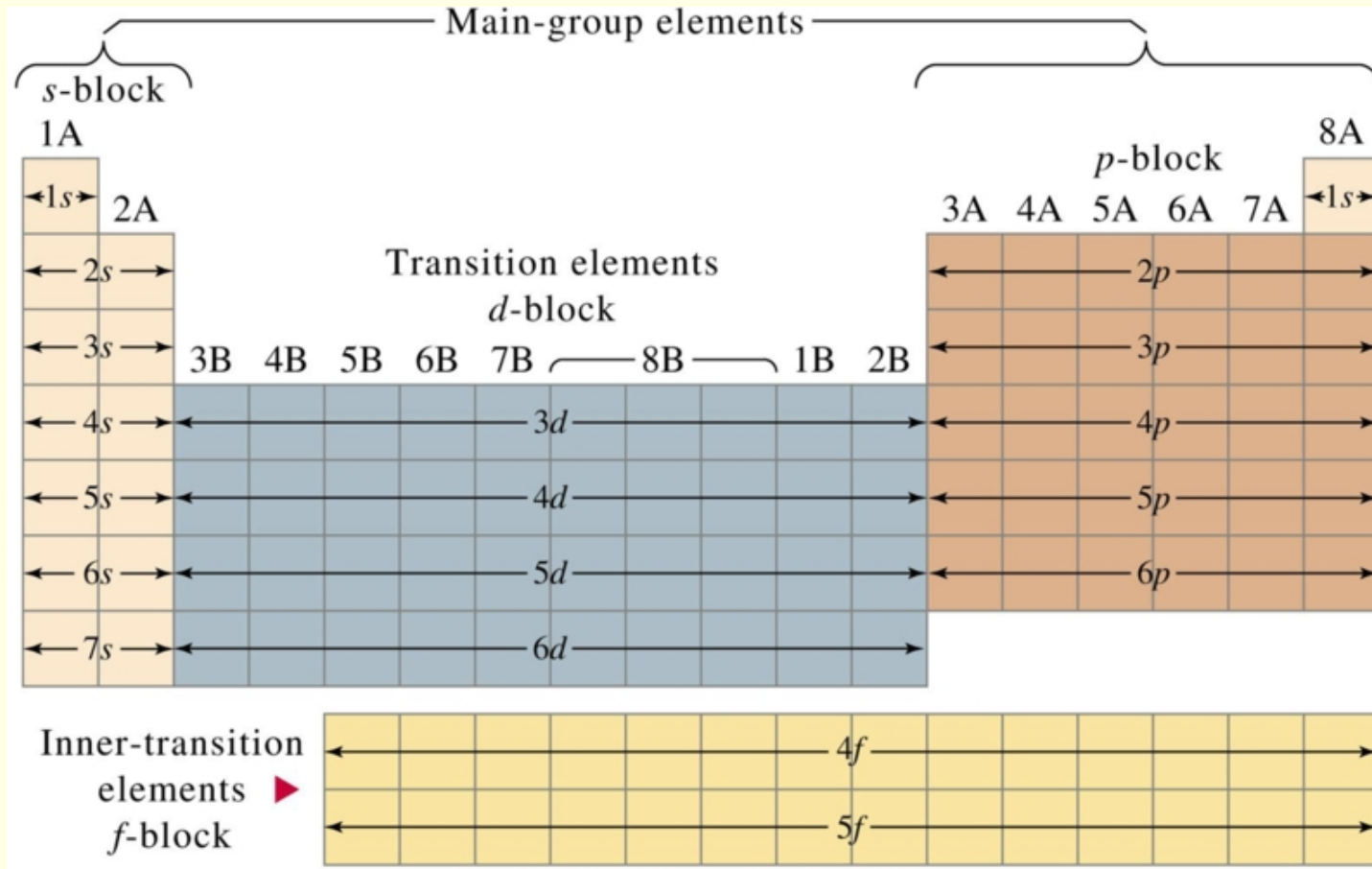


# Atomfizika:

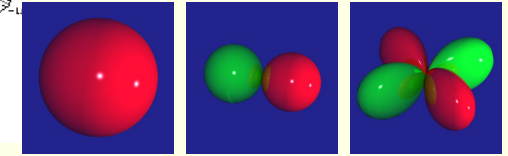
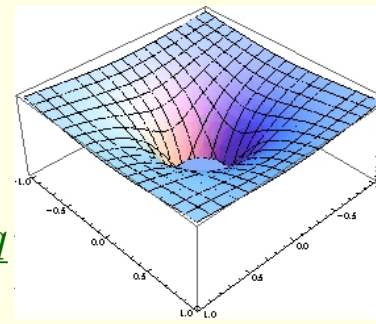


Elektromos kölcsönhatás (potenciális energia  $V(r) = k \frac{Zq}{r}$ )

Kvantum mechanika (anyag is hullám)  $H\Psi = \left(-\frac{(\hbar\nabla)^2}{2m} + V(r)\right)\Psi = E\Psi$

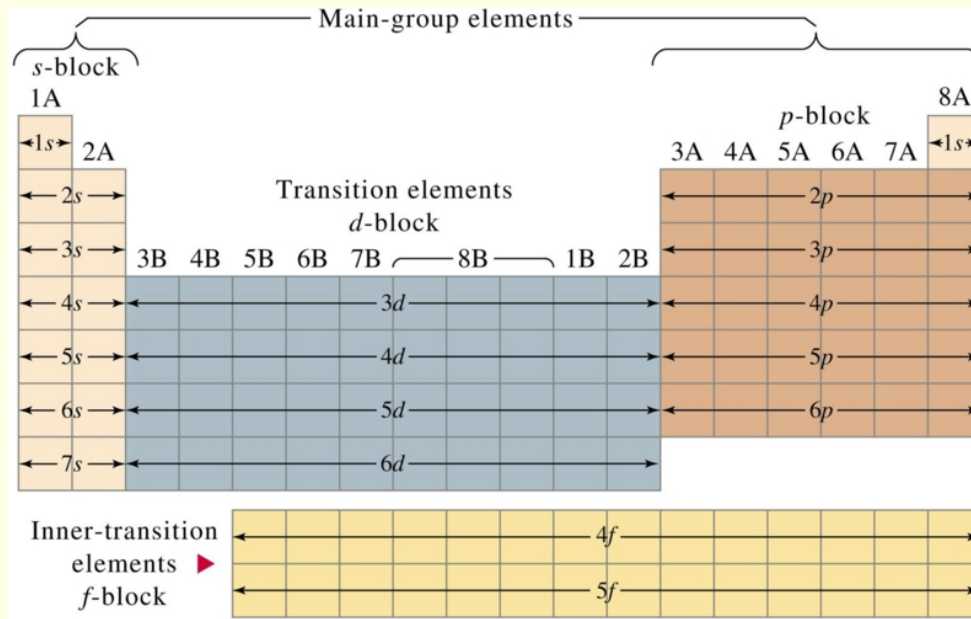


# Atomfizika:



Elektromos kölcsönhatás (potenciális energia  $V(r) = k \frac{Zq}{r}$ )

Kvantum mechanika (anyag is hullám)  $H\Psi = \left(-\frac{(\hbar\nabla)^2}{2m} + V(r)\right)\Psi = E\Psi$



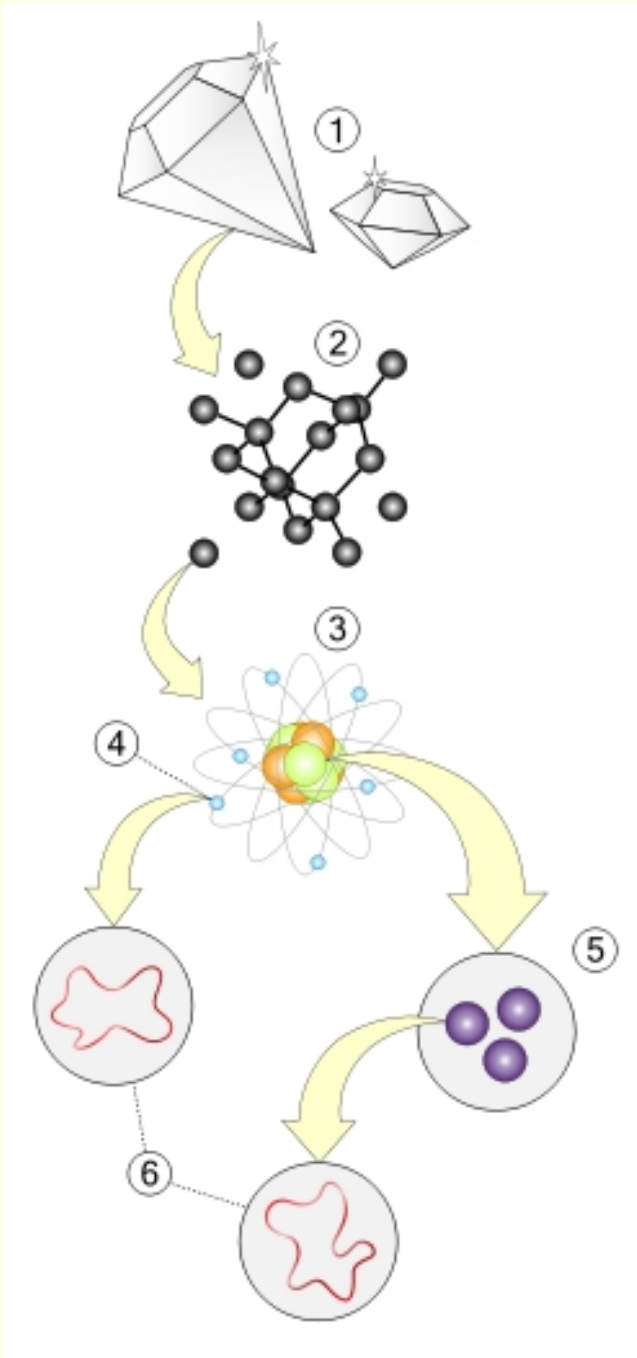
Periodic Table of the Elements © www.elementsdatabase.com

Legend:

- hydrogen (green)
- alkali metals (yellow)
- alkali earth metals (light blue)
- transition metals (orange)
- poor metals (blue)
- nonmetals (white)
- noble gases (red)
- rare earth metals (grey)

1																	2
H																	He
3	4											5	6	7	8	9	10
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
11	12											13	14	15	16	17	18
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
55	56	57	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
87	88	89	104	105	106	107	108	109	110								
Fr	Ra	Ac	Unq	Unp	Unh	Uns	Uno	Une	Unn								
		58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71		
		Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu		
		90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103		
		Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr		

## Anyagrészecskék osztályozása



Anyag: elemi részekből épül fel (Démokritosz)

Kémia: Atomok/molekulák, kémiai kötések

Atomfizika: atommag, elektron, elektromágneses erő

Magfizika: neutron, proton, magerők

Részecskefizika: kvarkok, leptonok,

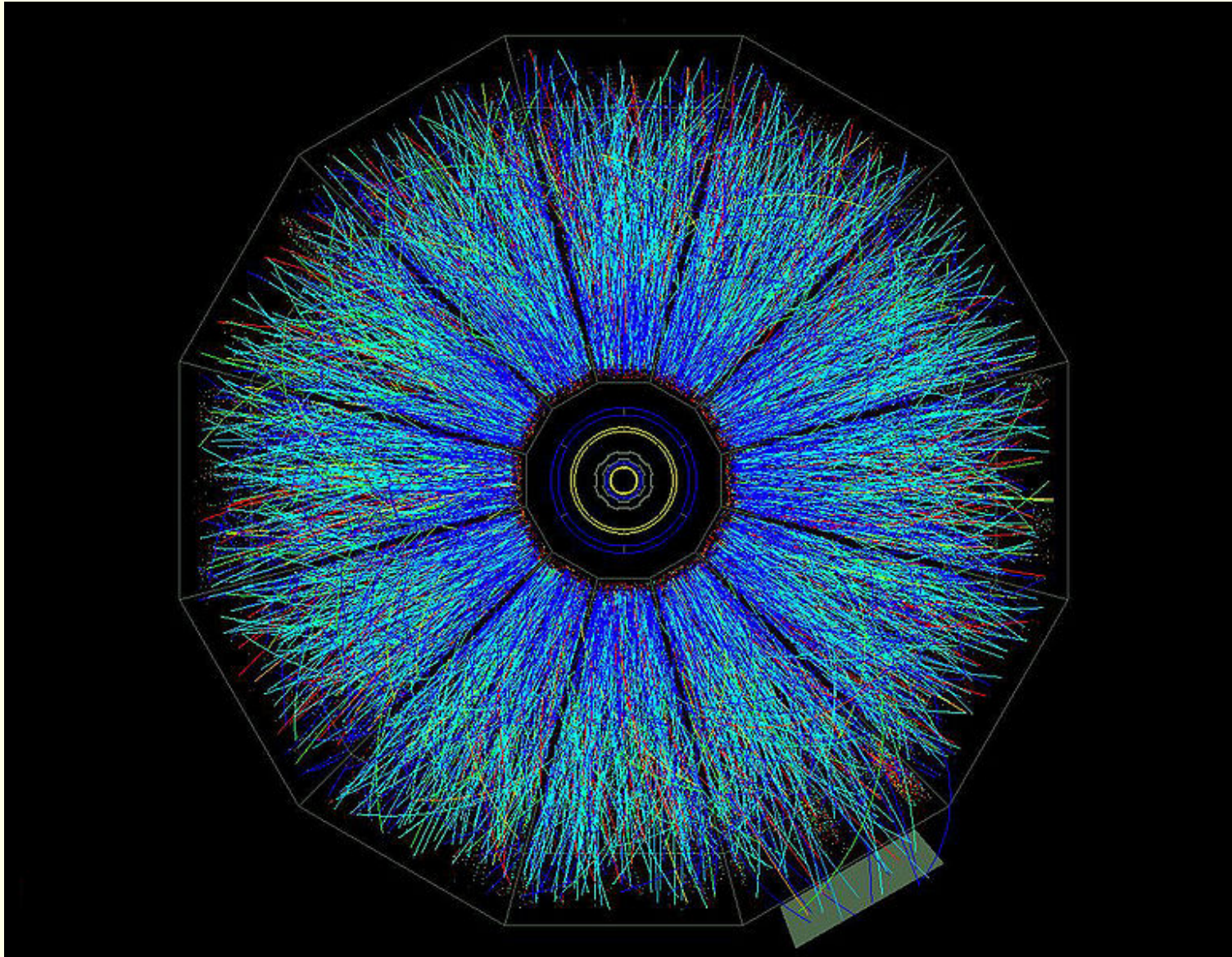
Húrelmélet: húrok

Magfizika: neutron, proton,..., magerők → Részecskefizika

Brookhaven: Relativisztikus nehéz ion ütköztető

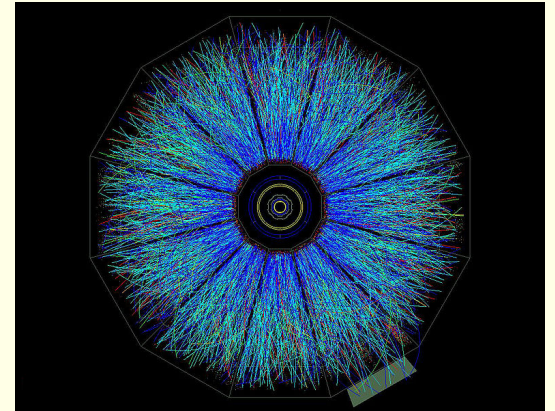
Magfizika: neutron, proton,..., magerők → Részecskefizika

Brookhaven: Relativisztikus nehéz ion ütköztető



Magfizika: neutron, proton,..., magerők → Részecskefizika

Brookhaven: Relativisztikus nehéz ion ütköztető

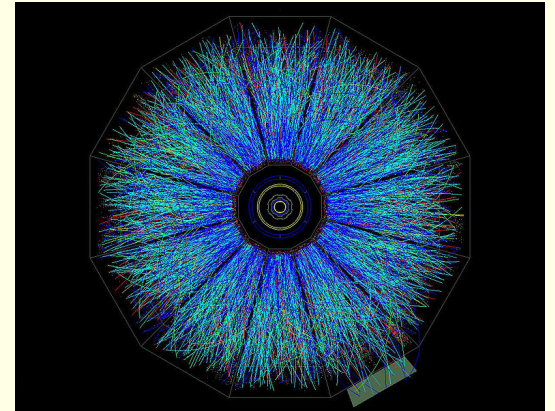




Magfizika: neutron, proton,..., magerők → Részecskefizika

Brookhaven: Relativisztikus nehéz ion ütköztető

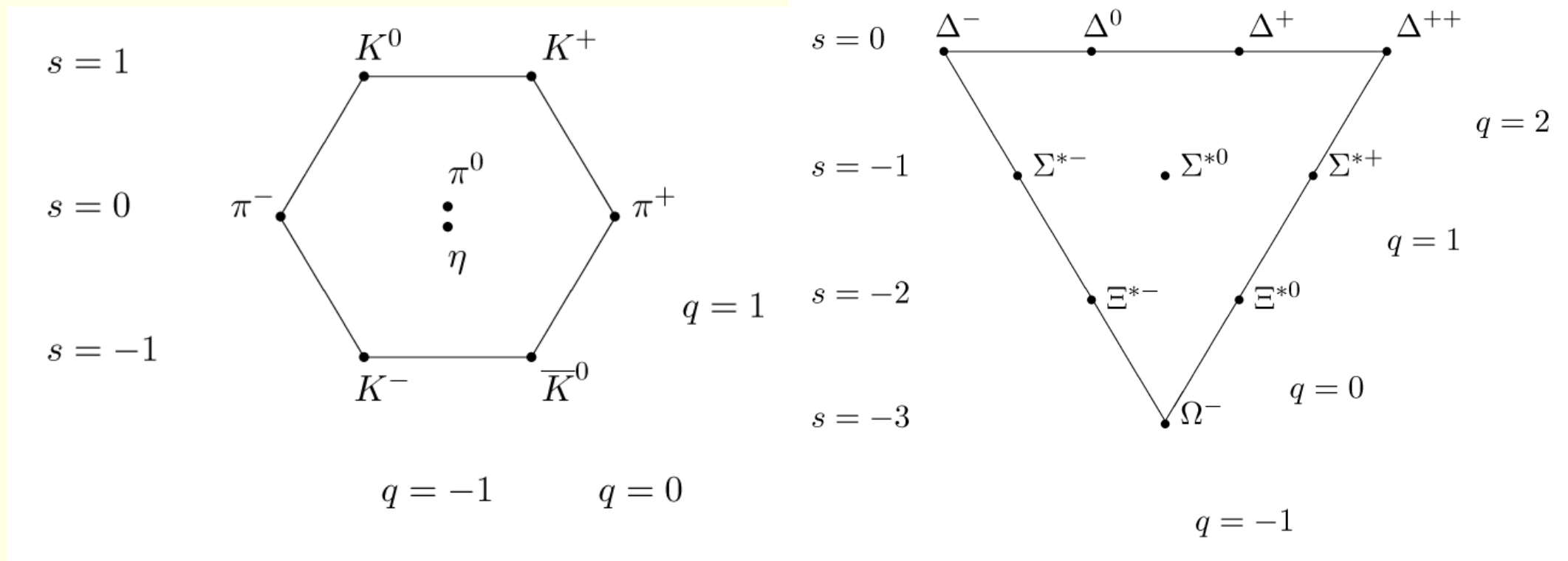
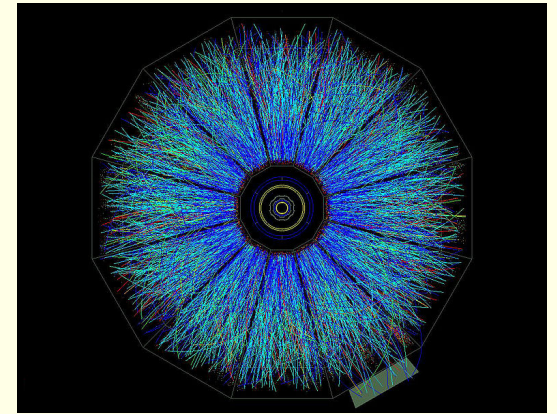
*Elemi részecskék száma* > atomok száma → osztályozás



Magfizika: neutron, proton,..., magerők → Részecskefizika

Brookhaven: Relativisztikus nehéz ion ütköztető

Elemi részecskék száma > atomok száma → osztályozás

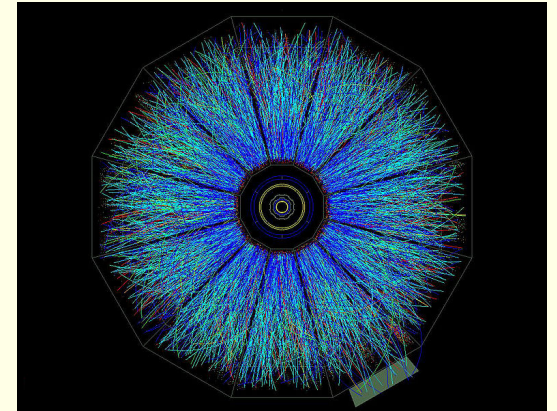


# Magfizika: neutron, proton,..., magerők → Részecskefizika

Brookhaven: Relativisztikus nehéz ion ütköztető

Elemi részecskék száma > atomok száma → osztályozás

Bomlás → erős, gyenge kölcsönhatás → Standard Modell



Three Generations of Matter (Fermions)				
	I	II	III	
mass→	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
charge→	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name→	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>γ</b> photon
Quarks	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>g</b> gluon
Leptons	<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV	91.2 GeV <sup>0</sup>
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	<b>ν<sub>e</sub></b> electron neutrino	<b>ν<sub>μ</sub></b> muon neutrino	<b>ν<sub>τ</sub></b> tau neutrino	<b>Z</b> weak force
	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV <sup>±</sup>
	-1	-1	-1	±1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	<b>e</b> electron	<b>μ</b> muon	<b>τ</b> tau	<b>W</b> weak force

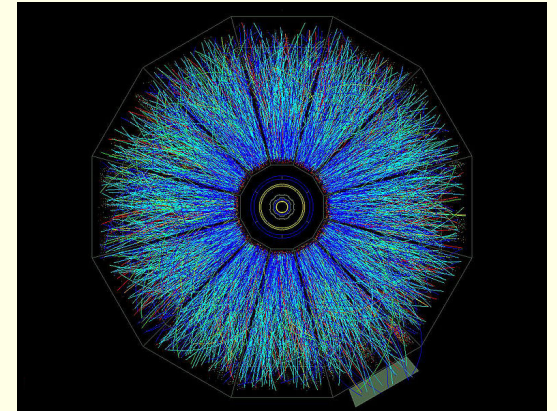
Bosons (Forces)

# Magfizika: neutron, proton,..., magerők → Részecskefizika

Brookhaven: Relativisztikus nehéz ion ütköztető

Elemi részecskék száma > atomok száma → osztályozás

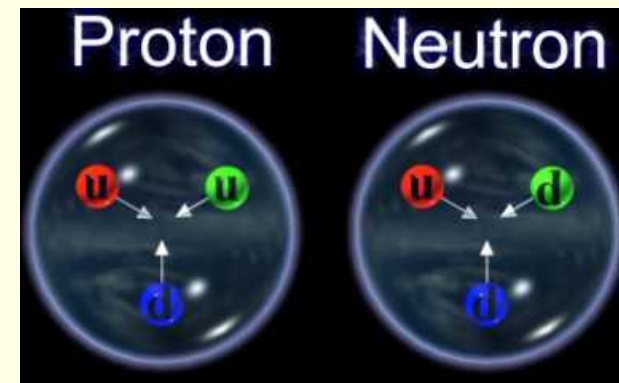
Bomlás → erős, gyenge kölcsönhatás → Standard Modell



Three Generations of Matter (Fermions)				
	I	II	III	
mass→	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
charge→	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name→	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>γ</b> photon
Quarks	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>g</b> gluon
Leptons	<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV	91.2 GeV <sup>0</sup>
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	<b>ν<sub>e</sub></b> electron neutrino	<b>ν<sub>μ</sub></b> muon neutrino	<b>ν<sub>τ</sub></b> tau neutrino	<b>Z</b> weak force
	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV <sup>±</sup>
	-1	-1	-1	$\pm 1$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	<b>e</b> electron	<b>μ</b> muon	<b>τ</b> tau	<b>W</b> weak force

Bosons (Forces)

közeltő módszerek



# Elemi részek periódusos rendszere

## Elemi részek periódusos rendszere

### Three Generations of Matter (Fermions)

	I	II	III	
mass →	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
charge →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name →	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>γ</b> photon
Quarks	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>g</b> gluon
Leptons	<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV	91.2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	<b>ν<sub>e</sub></b> electron neutrino	<b>ν<sub>μ</sub></b> muon neutrino	<b>ν<sub>τ</sub></b> tau neutrino	<b>Z<sup>0</sup></b> weak force
	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	$\pm 1$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	<b>e</b> electron	<b>μ</b> muon	<b>τ</b> tau	<b>W<sup>±</sup></b> weak force

Bosons (Forces)

## Elemi részek periódusos rendszere

### Three Generations of Matter (Fermions)

	I	II	III	
mass→	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
charge→	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name→	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>γ</b> photon
	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
<b>Quarks</b>	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>g</b> gluon
	<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV	91.2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	<b>ν<sub>e</sub></b> electron neutrino	<b>ν<sub>μ</sub></b> muon neutrino	<b>ν<sub>τ</sub></b> tau neutrino	<b>Z<sup>0</sup></b> weak force
	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	$\pm 1$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
<b>Leptons</b>	<b>e</b> electron	<b>μ</b> muon	<b>τ</b> tau	<b>W<sup>±</sup></b> weak force

Húrelmélet?



Bosons (Forces)



Nobel díj:

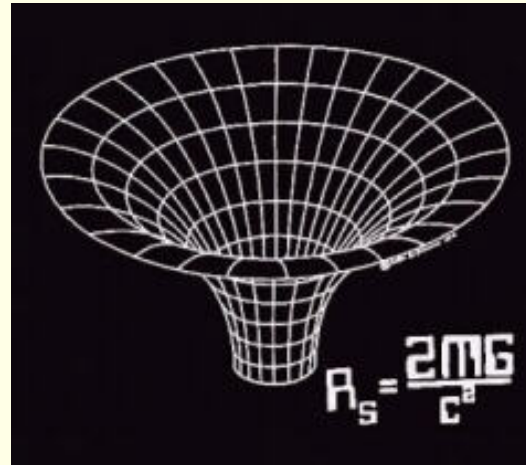
## Elemi kölcsönhatások: egyesítés

- gravitációs  $V(r) = -g \frac{Mm}{r}$
- elektromos  $V(r) = -k \frac{Qq}{r}$



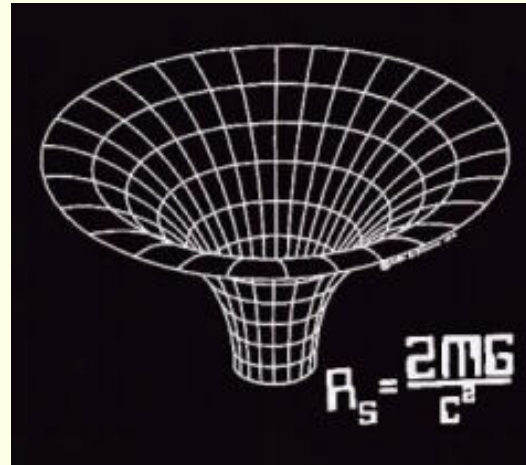
## Elemi kölcsönhatások: egyesítés

- gravitációs  $V(r) = -g \frac{Mm}{r}$
- elektromos  $V(r) = -k \frac{Qq}{r}$



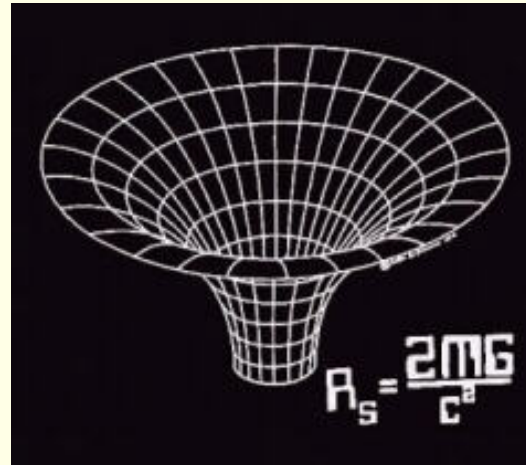
## Elemi kölcsönhatások: egyesítés

- gravitációs  $V(r) = -g \frac{Mm}{r}$
- elektromos  $V(r) = -k \frac{Qq}{r}$
- gyenge  $V(r) = -g \frac{e^{-mr}}{r}$
- erős  $V(r) = \sigma r$



## Elemi kölcsönhatások: egyesítés

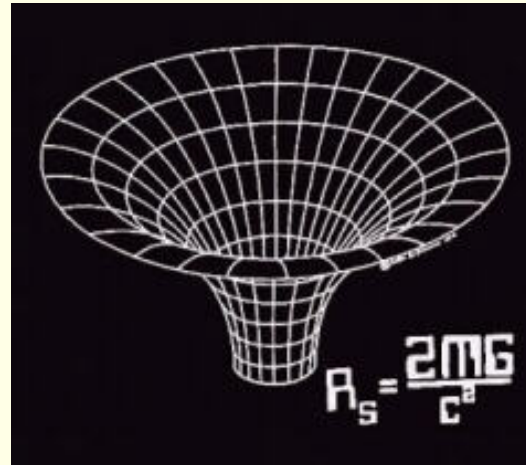
- gravitációs  $V(r) = -g \frac{Mm}{r}$
- elektromos  $V(r) = -k \frac{Qq}{r}$
- gyenge  $V(r) = -g \frac{e^{-mr}}{r}$
- erős  $V(r) = \sigma r$



Mágneses?

## Elemi kölcsönhatások: egyesítés

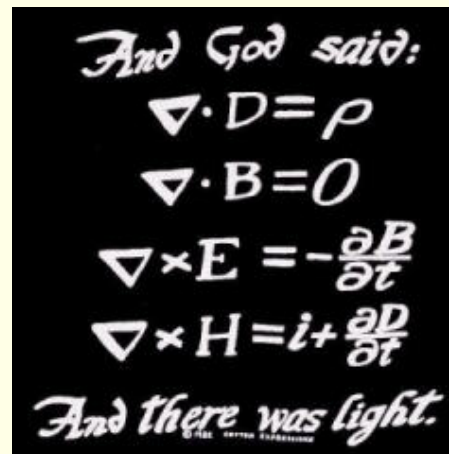
- gravitációs  $V(r) = -g \frac{Mm}{r}$
- elektromos  $V(r) = -k \frac{Qq}{r}$
- gyenge  $V(r) = -g \frac{e^{-mr}}{r}$
- erős  $V(r) = \sigma r$



Mágneses?

Maxwell:

elektromos  $\searrow$   
mágneses  $\nearrow$   $\implies$  elektromágneses



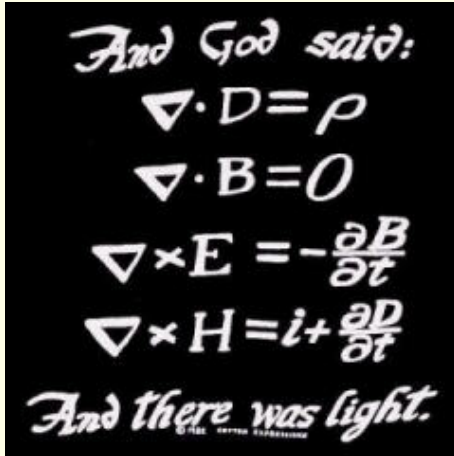
$$\ddot{E} - c^2 \nabla^2 E = 0$$

*And God said:*  
 $\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$   
 $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$   
 $\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$   
 $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$   
*And there was light.*

## Relativitás elve

$$\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} - c^2 \nabla^2 E = 0 \quad (x, y, z, t) \quad \leftrightarrow \quad \frac{\partial^2 E'}{\partial t'^2} - c^2 \nabla'^2 E' = 0 \quad (x', y', z', t')$$





## Relativitás elve



$$\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} - c^2 \nabla^2 E = 0 \quad (x, y, z, t) \quad \leftrightarrow \quad \frac{\partial^2 E'}{\partial t'^2} - c^2 \nabla'^2 E' = 0 \quad (x', y', z', t')$$

Galilei transzformáció  $x' = x + vt$ ;  $t' = t$   
Newton egyenlet kovariáns  $m \frac{d^2 x}{dt^2} = F$



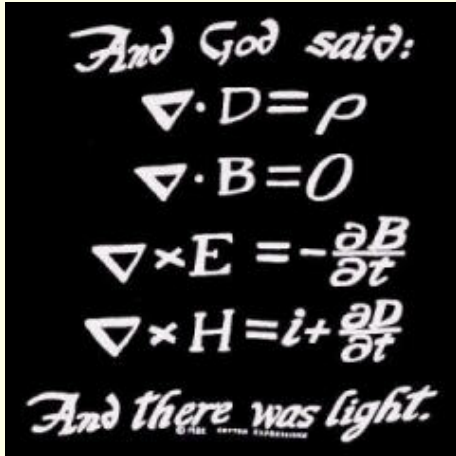
## Relativitás elve



$$\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} - c^2 \nabla^2 E = 0 \quad (x, y, z, t) \quad \leftrightarrow \quad \frac{\partial^2 E'}{\partial t'^2} - c^2 \nabla'^2 E' = 0 \quad (x', y', z', t')$$

Galilei transzformáció  $x' = x + vt; t' = t$   
 Newton egyenlet kovariáns  $m \frac{d^2 x}{dt^2} = F$

Lorentz transzformáció:  $x' = \frac{(x+vt)}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}; t' = \frac{(t+\frac{xv}{c^2})}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$   
 Maxwell egyenlet kovariáns  $\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} - c^2 \nabla^2 E = 0$



## Relativitás elve



$$\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} - c^2 \nabla^2 E = 0 \quad (x, y, z, t) \quad \leftrightarrow \quad \frac{\partial^2 E'}{\partial t'^2} - c^2 \nabla'^2 E' = 0 \quad (x', y', z', t')$$

Galilei transzformáció  $x' = x + vt$ ;  $t' = t$   
 Newton egyenlet kovariáns  $m \frac{d^2 x}{dt^2} = F$

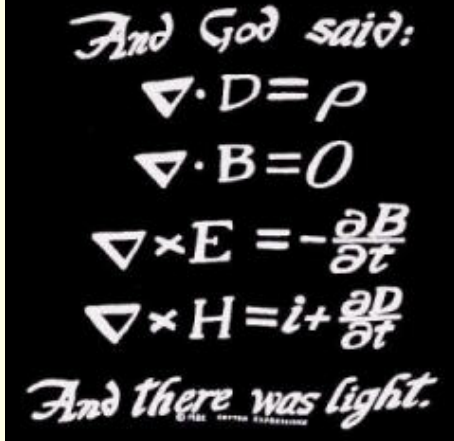
Lorentz transzformáció:  $x' = \frac{(x+vt)}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$ ;  $t' = \frac{(t+\frac{xv}{c^2})}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$   
 Maxwell egyenlet kovariáns  $\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} - c^2 \nabla^2 E = 0$

Következmények:

sebességösszeadás:  $\frac{u+v}{1+\frac{uv}{c^2}}$   
 tömegnövekedés  $m(v) = \frac{m}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$

távolság kontrakció  $l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$   
 idő dilatáció  $t = t_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$





## Relativitás elve



$$\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} - c^2 \nabla^2 E = 0 \quad (x, y, z, t) \quad \leftrightarrow \quad \frac{\partial^2 E'}{\partial t'^2} - c^2 \nabla'^2 E' = 0 \quad (x', y', z', t')$$

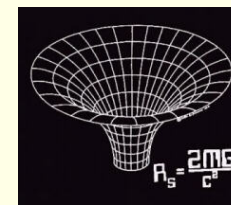
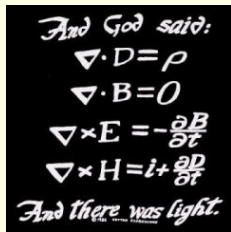
Galilei transzformáció  $x' = x + vt; t' = t$   
 Newton egyenlet kovariáns  $m \frac{d^2 x}{dt^2} = F$

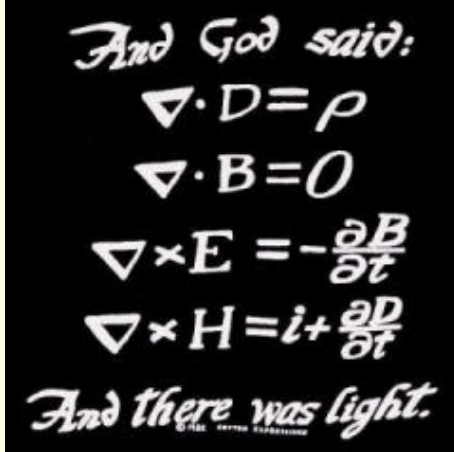
Lorentz transzformáció:  $x' = \frac{(x+vt)}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}; t' = \frac{(t+\frac{xv}{c^2})}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$   
 Maxwell egyenlet kovariáns  $\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} - c^2 \nabla^2 E = 0$

Következmények:

sebességösszeadás:  $\frac{u+v}{1+\frac{uv}{c^2}}$       távolság kontrakció  $l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$   
 tömegnövekedés  $m(v) = \frac{m}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$       idő dilatáció  $t = t_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$   
 elektromos  $V(r) = -k \frac{Qq}{r}$       gravitációs  $V(r) = -g \frac{Mm}{r}$

Potenciálkép nem használható:





## Relativitás elve



$$\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} - c^2 \nabla^2 E = 0 \quad (x, y, z, t) \quad \leftrightarrow \quad \frac{\partial^2 E'}{\partial t'^2} - c^2 \nabla'^2 E' = 0 \quad (x', y', z', t')$$

Galilei transzformáció  $x' = x + vt$ ;  $t' = t$   
 Newton egyenlet kovariáns  $m \frac{d^2 x}{dt^2} = F$

Lorentz transzformáció:  $x' = \frac{(x+vt)}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$ ;  $t' = \frac{(t+\frac{xv}{c^2})}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$   
 Maxwell egyenlet kovariáns  $\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} - c^2 \nabla^2 E = 0$

Következmények:

sebességösszeadás:  $\frac{u+v}{1+\frac{uv}{c^2}}$

távolság kontrakció  $l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$

tömegnövekedés  $m(v) = \frac{m}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$

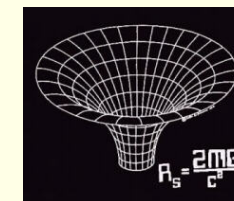
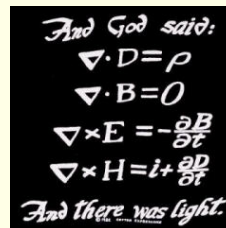
idő dilatáció  $t = t_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$

elektromos  $V(r) = -k \frac{Qq}{r}$

gravitációs  $V(r) = -g \frac{Mm}{r}$

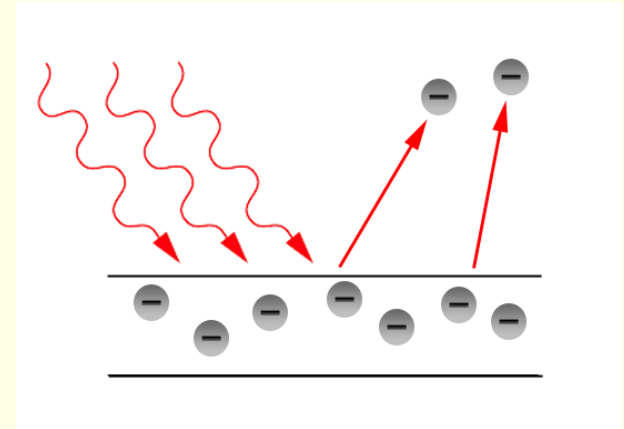
Potenciálkép nem használható:

Erős, Gyenge? → Kvantum mechanika



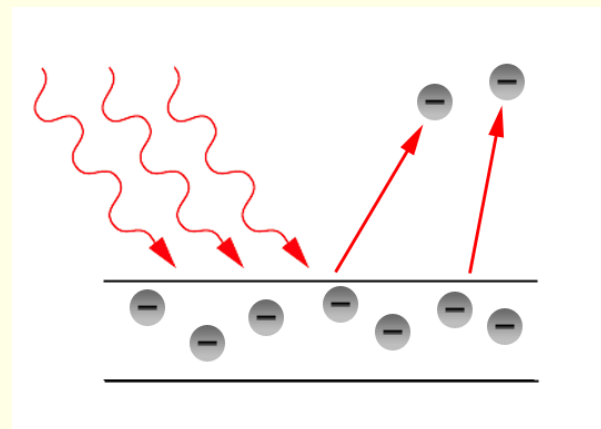
## Kvantum mechanika

Fényelektromos jelenség:  
a fény (elektromágneses hullám)  
részecske tulajdonságokkal rendelkezik  
foton

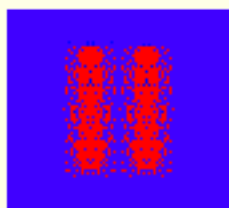
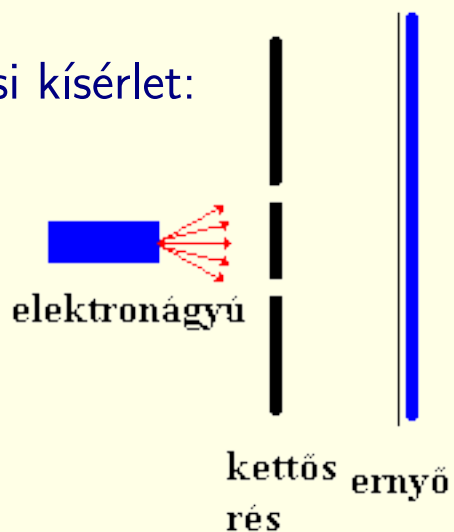


## Kvantum mechanika

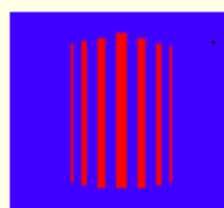
Fényelektromos jelenség:  
a fény (elektromágneses hullám)  
részecske tulajdonságokkal rendelkezik  
foton



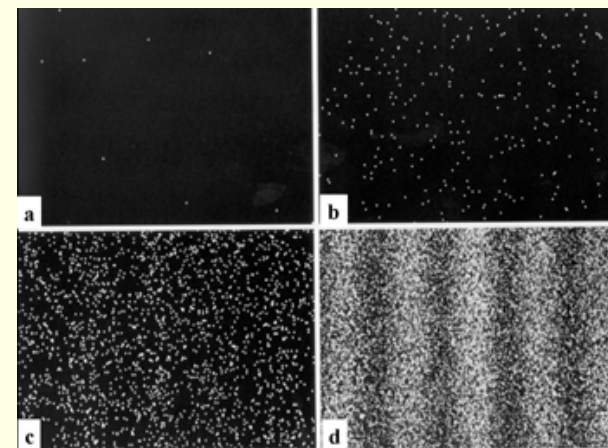
Elektron  
kétréses szórás kísérlet:



Ha felváltva  
nyitjuk ki a  
réseket, nincs  
interferencia



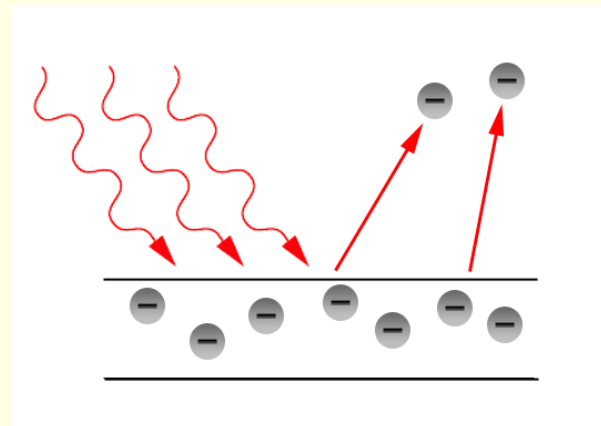
Ha mindkét rés  
egyszerre van  
nyitva, akkor van  
interferencia



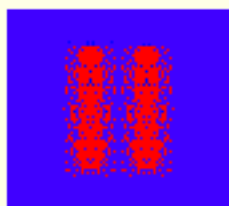
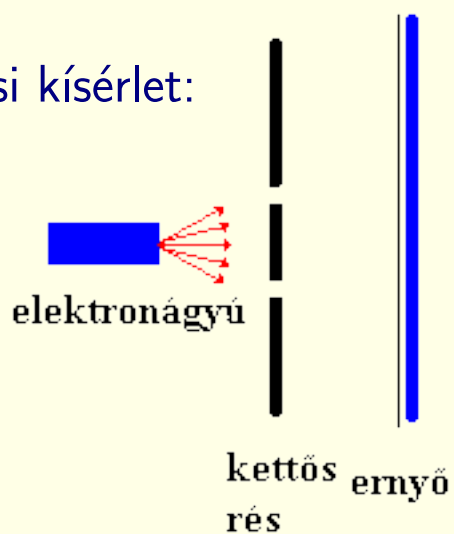
3. október 22. Dávid Gyula: Kvantumképek az alagútban

## Kvantum mechanika

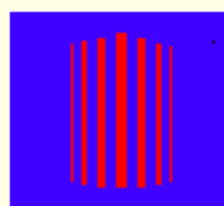
Fényelektromos jelenség:  
a fény (elektromágneses hullám)  
részecske tulajdonságokkal rendelkezik  
foton



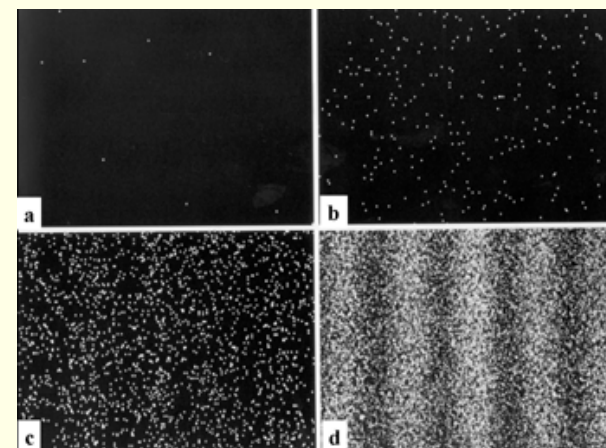
Elektron  
kétréses szórás kísérlet:



Ha felváltva  
nyitjuk ki a  
réseket, nincs  
interferencia



Ha mindkét rés  
egyszerre van  
nyitva, akkor van  
interferencia



3. október 22. Dávid Gyula: Kvantumképek az alagútban

Összefoglalva: anyag és kölcsönhatás, egyszerre részecske és hullám

# Részecskefizika standard modellje

Részecske fizika: írjuk le a részecskéket és a kölcsönhatásokat

		Three Generations of Matter (Fermions)			
		I	II	III	
mass=	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0	
charge=	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	$\gamma$
spin=	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	photon
name=	u up	c charm	t top		
Quarks	6.8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	104 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	4.2 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom	0 0 1 g gluon	
	<2.2 eV 0 $\frac{1}{2}$ v <sub>e</sub> electron neutrino	<0.17 MeV 0 $\frac{1}{2}$ v <sub>μ</sub> muon neutrino	<18.5 MeV 0 $\frac{1}{2}$ v <sub>τ</sub> tau neutrino	0 0 1 Z weak force	
Leptons	0.511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e electron	105.7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ μ muon	1.777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ τ tau	80.4 GeV + 1 W weak force	Bosons (Forces)



# Részecskefizika standard modellje

Részecske fizika: írjuk le a részecskéket és a kölcsönhatásokat

relativisztikus kvantumelmélettel: Nincs megoldás: **Nobel díj**



		Three Generations of Matter (Fermions)				
		I	II	III		
mass=	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0	0	0
charge=	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	1	0
spin=	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
name=	u up	c charm	t top	$\gamma$ photon		
Quarks	6.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0	0	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	1	0
	d down	s strange	b bottom	g gluon		
Leptons	<2.2 eV	<0.17 MeV	<18.5 MeV	0	0	0
	0	0	0	0	1	0
	$\nu_e$ electron neutrino	$\nu_\mu$ muon neutrino	$\nu_\tau$ tau neutrino	Z weak force		
0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV	+	+	+
$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	1	1	1	1
e electron	$\mu$ muon	$\tau$ tau	W weak force			



**Kvantumgravitáció?**

# Részecskefizika standard modellje

Részecske fizika: írjuk le a részecskéket és a kölcsönhatásokat

relativisztikus kvantumelmélettel: Nincs megoldás: **Nobel díj**

Gravitáció nélkül:

relativisztikus kvantumtérelmélet,

Standard modell

Probléma: túl bonyolult **protontömeg? Nobel díj**

Three Generations of Matter (Fermions)			
	I	II	III
mass	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
name	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom
	<b>e</b> electron	<b><math>\mu</math></b> muon	<b><math>\tau</math></b> tau
	<b><math>\nu_e</math></b> electron neutrino	<b><math>\nu_\mu</math></b> muon neutrino	<b><math>\nu_\tau</math></b> tau neutrino
	<b><math>\gamma</math></b> photon	<b>g</b> gluon	<b>Z</b> weak force
	<b>W<sup>+</sup></b> weak force	<b>W<sup>-</sup></b> weak force	<b>W<sup>0</sup></b> weak force



**Kvantumgravitáció?**

$$\mathcal{L}_{SM} = \mathcal{L}_{Dirac} + \mathcal{L}_{mass} + \mathcal{L}_{gauge} + \mathcal{L}_{gauge/\psi} \quad (1)$$

Here,

$$\mathcal{L}_{Dirac} = i\bar{e}_L^i \not{\partial} e_L^i + i\bar{\nu}_L^i \not{\partial} \nu_L^i + i\bar{e}_R^i \not{\partial} e_R^i + i\bar{\nu}_L^i \not{\partial} \nu_L^i + i\bar{u}_L^i \not{\partial} u_L^i + i\bar{d}_L^i \not{\partial} d_L^i + i\bar{u}_R^i \not{\partial} u_R^i + i\bar{d}_R^i \not{\partial} d_R^i; \quad (2)$$

$$\mathcal{L}_{mass} = -v \left( \lambda_e^i \bar{e}_L^i e_R^i + \lambda_\nu^i \bar{\nu}_L^i \nu_R^i + \lambda_d^i \bar{u}_L^i d_R^i + \text{h.c.} \right) - M_W^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{M_Z^2}{2 \cos^2 \theta_W} Z_\mu Z_\mu; \quad (3)$$

$$\mathcal{L}_{gauge} = -\frac{1}{4} (G_{\mu\nu}^a)^2 - \frac{1}{2} W_{\mu\nu}^+ W^{-\mu\nu} - \frac{1}{4} Z_{\mu\nu} Z^{\mu\nu} - \frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \mathcal{L}_{WZA}, \quad (4)$$

where

$$\begin{aligned} G_{\mu\nu}^a &= \partial_\mu A_\nu^a - \partial_\nu A_\mu^a - g_3 f^{abc} A_\mu^b A_\nu^c \\ W_{\mu\nu}^\pm &= \partial_\mu W_\nu^\pm - \partial_\nu W_\mu^\pm \\ Z_{\mu\nu} &= \partial_\mu Z_\nu - \partial_\nu Z_\mu \\ F_{\mu\nu} &= \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu, \end{aligned} \quad (5)$$

and

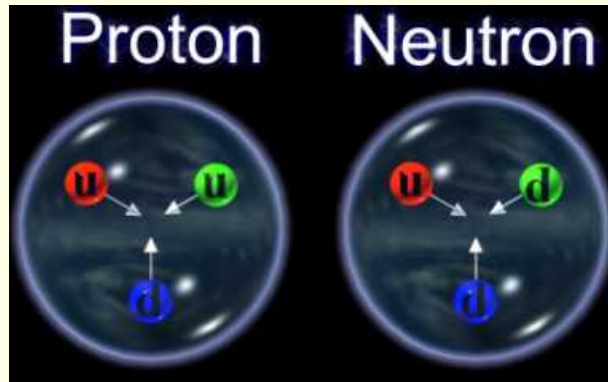
$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{WZA} &= ig_2 \cos \theta_W \left[ (W_\mu^- W_\nu^+ - W_\nu^- W_\mu^+) \partial^\mu Z^\nu + W_{\mu\nu}^+ W^{-\mu\nu} Z^\nu - W_{\mu\nu}^- W^{+\mu\nu} Z^\nu \right] \\ &+ ie \left[ (W_\mu^- W_\nu^+ - W_\nu^- W_\mu^+) \partial^\mu A^\nu + W_{\mu\nu}^+ W^{-\mu\nu} A^\nu - W_{\mu\nu}^- W^{+\mu\nu} A^\nu \right] \\ &+ g_2^2 \cos^2 \theta_W \left( W_\mu^+ W_\nu^- Z^\mu Z^\nu - W_\mu^+ W^{-\mu\nu} Z_\nu Z^\nu \right) \\ &+ g_2^2 \left( W_\mu^+ W_\nu^- A^\mu A^\nu - W_\mu^+ W^{-\mu\nu} A_\nu A^\nu \right) \\ &+ g_2 e \cos \theta_W \left[ W_\mu^+ W_\nu^- (Z^\mu A^\nu + Z^\nu A^\mu) - 2W_\mu^+ W^{-\mu\nu} Z_\nu A^\nu \right] \\ &+ \frac{1}{2} g_2^2 (W_\mu^+ W_\nu^-) (W^{+\mu\nu} W^{-\nu\mu} - W^{+\nu\mu} W^{-\mu\nu}); \end{aligned} \quad (6)$$

and

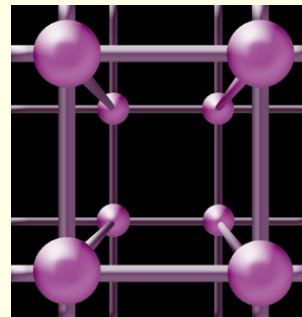
$$\mathcal{L}_{gauge/\psi} = -g_3 A_\mu^a J_{(3)}^{\mu a} - g_2 (W_\mu^+ J_{W^+}^\mu + W_\mu^- J_{W^-}^\mu + Z_\mu J_Z^\mu) - e A_\mu J_A^\mu, \quad (7)$$

where

$$\begin{aligned} J_{(3)}^{\mu a} &= \bar{u}^i \gamma^\mu T_{(3)}^a u^i + \bar{d}^j \gamma^\mu T_{(3)}^a d^j \\ J_{W^+}^\mu &= \frac{1}{\sqrt{2}} (\bar{\nu}_L^i \gamma^\mu e_L^i + V^{ij} \bar{u}_L^i \gamma^\mu d_L^j) \\ J_{W^-}^\mu &= (J_{W^+}^\mu)^* \\ J_Z^\mu &= \frac{1}{\cos \theta_W} \left[ \frac{1}{2} \bar{\nu}_L^i \gamma^\mu \nu_L^i + \left( -\frac{1}{2} + \sin^2 \theta_W \right) \bar{e}_L^i \gamma^\mu e_L^i + (\sin^2 \theta_W) \bar{e}_R^i \gamma^\mu e_R^i \right. \\ &+ \left( \frac{1}{2} - \frac{2}{3} \sin^2 \theta_W \right) \bar{u}_L^i \gamma^\mu u_L^i + \left( -\frac{2}{3} \sin^2 \theta_W \right) \bar{u}_R^i \gamma^\mu u_R^i \\ &+ \left. \left( -\frac{1}{2} + \frac{1}{3} \sin^2 \theta_W \right) \bar{d}_L^i \gamma^\mu d_L^i + \left( \frac{1}{3} \sin^2 \theta_W \right) \bar{d}_R^i \gamma^\mu d_R^i \right] \\ J_A^\mu &= (-1) \bar{e}^i \gamma^\mu e^i + \left( \frac{2}{3} \right) \bar{u}^i \gamma^\mu u^i + \left( -\frac{1}{3} \right) \bar{d}^i \gamma^\mu d^i. \end{aligned} \quad (8)$$



világ: 32<sup>4</sup>



14. április 22. Katz Sándor: A látható világegyetem tömege és a részecskefizika



## Játékmodell

1 dimenzió-  $(x, t)$

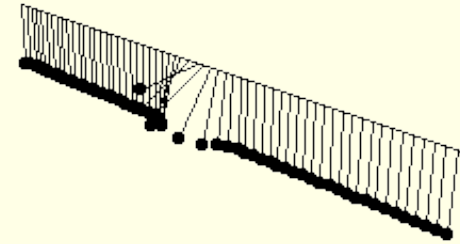
Elvárásaink:

legyen relativisztikus  $\ddot{E} - c^2 \nabla^2 E = 0$

írjon le kölcsönható részecskéket

legyenek kötött állapotok

legyen megoldható



$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} = -m^2 \sin \phi$$

## Játékmodell

1 dimenzió-  $(x, t)$

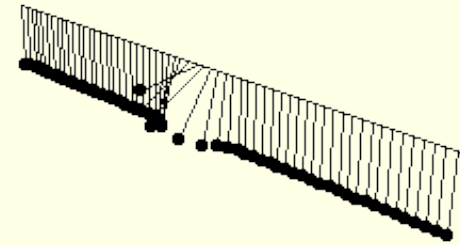
Elvárásaink:

legyen relativisztikus  $\ddot{E} - c^2 \nabla^2 E = 0$

írjon le kölcsönható részecskéket

legyenek kötött állapotok

legyen megoldható



$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} = -m^2 \sin \phi$$

Klasszikus

Részecskék:	szoliton	anti-szoliton	szuszogó $u$
tömeg	$8m$	$8m$	$16m \sin u$
töltés	$+1$	$-1$	$0$
szélesség	$(8m)^{-1}$	$(8m)^{-1}$	
periódus			$2\pi \sqrt{1 + u^2}$

# Játékmodell

1 dimenzió-  $(x, t)$

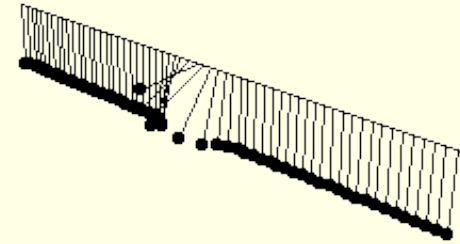
Elvárásaink:

legyen relativisztikus  $\ddot{E} - c^2 \nabla^2 E = 0$

írjon le kölcsönható részecskéket

legyenek kötött állapotok

legyen megoldható



$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} = -m^2 \sin \phi$$

Klasszikus

Részecskék:	szoliton	anti-szoliton	szuszogó $u$
tömeg	$8m$	$8m$	$16m \sin u$
töltés	$+1$	$-1$	$0$
szélesség	$(8m)^{-1}$	$(8m)^{-1}$	
periódus			$2\pi \sqrt{1 + u^2}$

mozgó részecskék:	szoliton	anti-szoliton	szuszogó $u$	
tömeg	$\frac{8m}{\sqrt{1-v^2}}$	$\frac{8m}{\sqrt{1-v^2}}$	$\frac{16m \sin u}{\sqrt{1-v^2}}$	tömegnövekedés
szélesség	$(8m)^{-1} \sqrt{1-v^2}$	$(8m)^{-1} \sqrt{1-v^2}$		távolságkontrakció
periódus			$2\pi \sqrt{1 + u^2} \sqrt{1 - v^2}$	idődilatáció

## Játékmodell

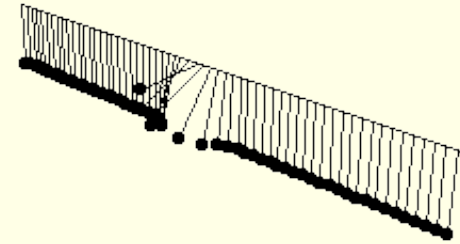
Elvárásaink:

legyen relativisztikus  $\ddot{E} - c^2 \nabla^2 E = 0$ 

írjon le kölcsönható részecskéket

legyenek kötött állapotok

legyen megoldható



$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} = -m^2 \sin \phi$$

Részecskék:	szoliton	anti-szoliton	szuszogó $u$
tömeg	$8m$	$8m$	$16m \sin u$
töltés	$+1$	$-1$	$0$
szélesség	$(8m)^{-1}$	$(8m)^{-1}$	
periódus			$2\pi \sqrt{1 + u^2}$

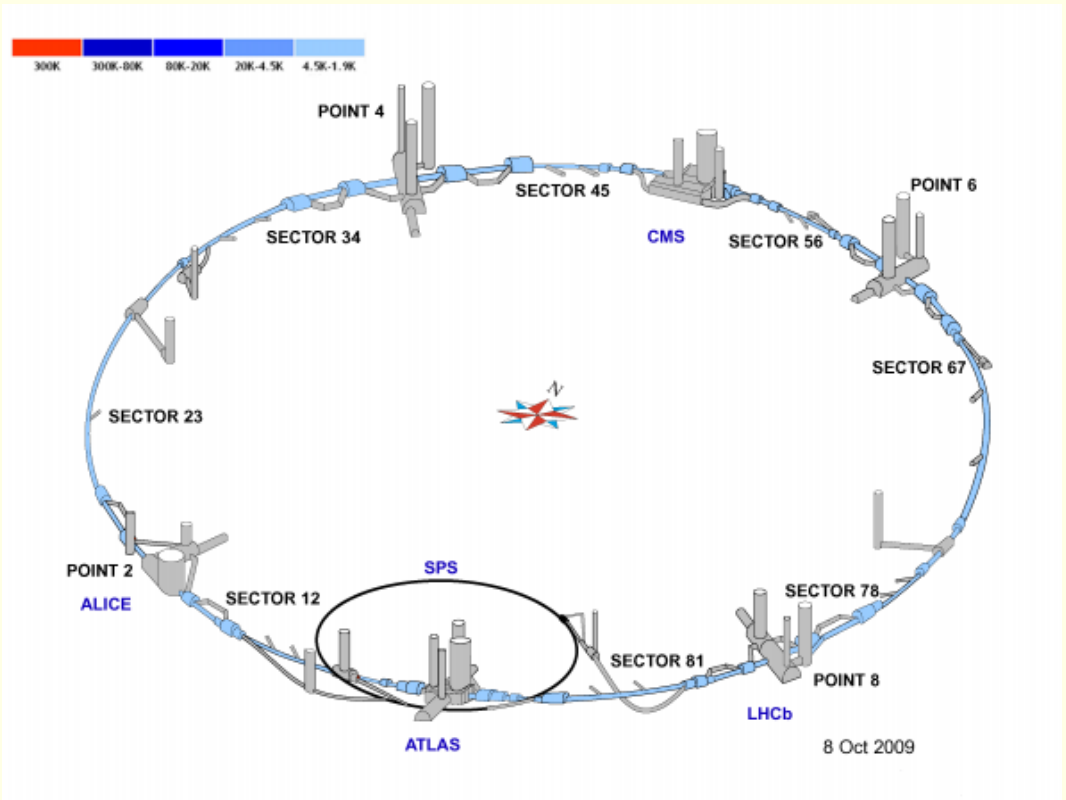
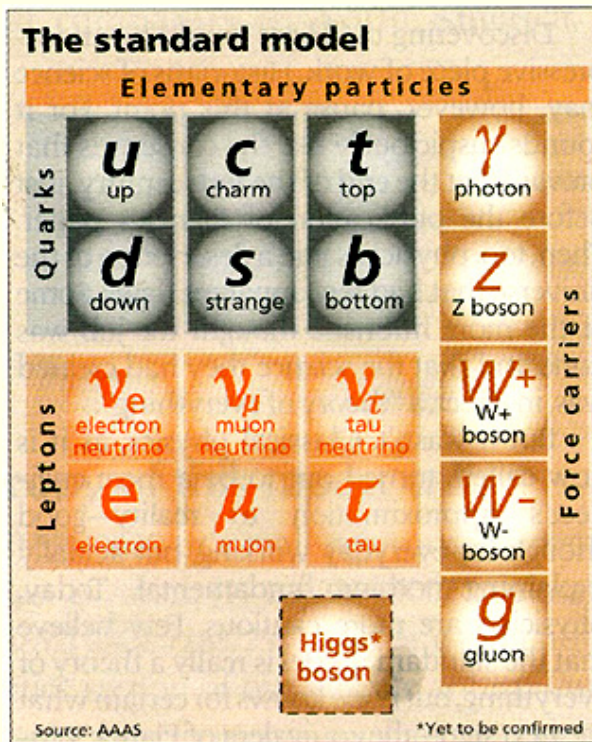
Klasszikus

mozgó részecskék:	szoliton	anti-szoliton	szuszogó $u$	
tömeg	$\frac{8m}{\sqrt{1-v^2}}$	$\frac{8m}{\sqrt{1-v^2}}$	$\frac{16m \sin u}{\sqrt{1-v^2}}$	tömegnövekedés
szélesség	$(8m)^{-1} \sqrt{1-v^2}$	$(8m)^{-1} \sqrt{1-v^2}$		távolságkontrakció
periódus			$2\pi \sqrt{1 + u^2} \sqrt{1 - v^2}$	idődilatáció

Kvantumos: „proton tömeg”, szórás kísérletek, részecske bomlás ...

Kitekintés:

$$\text{Higgs } \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} - c^2 \nabla^2 \phi = - \frac{dV(\phi)}{d\phi}$$



Indul az LHC!!!