



# Kvantová pole: z čeho je skutečně vystavěn náš vesmír?

Petr Kurfürst

Masarykova univerzita, U3V

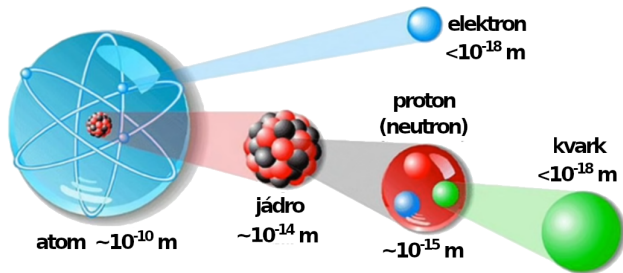
25. říjen 2022

# Matérie (Matter) - podle 19. století - prvky = konstituenty všeho v přírodě

R <sub>2</sub> O RH		RO RH <sub>2</sub>		R <sub>2</sub> O <sub>3</sub> RH <sub>3</sub>		RO <sub>2</sub> RH <sub>4</sub>		R <sub>2</sub> O <sub>5</sub> RH <sub>5</sub>		RO <sub>3</sub> H <sub>2</sub> R		R <sub>2</sub> O <sub>7</sub> HR																								
1	I. A												18	VIII. A																						
<h2>Periodická soustava prvků</h2>													13	14	15	16	17	18																		
1	1,0079 <b>1</b> H 1 Vodík	II. A										13 10,81 <b>5</b> B 5 Bor	14 12,01 <b>6</b> C 6 Uhlík	15 14,01 <b>7</b> N 7 Dusík	16 16,00 <b>8</b> O 8 Kyslík	17 19,00 <b>9</b> F 9 Fluor	18 4,00 <b>2</b> He 2 Helium																			
2	6,94 <b>3</b> Li 3 Lithium	9,01 <b>4</b> Be 4 Beryllium	alkalické kovy		kovy alkalických zemin		přechodné kovy		kovy		polokovy	nekovy	halogeny	vzácné plyny	10,81 <b>13</b> Al 13 Hliník	12,01 <b>14</b> Si 14 Křemík	14,01 <b>15</b> P 15 Fosfor	16,00 <b>16</b> S 16 Síra	19,00 <b>17</b> Cl 17 Chlór	20,18 <b>18</b> Ar 18 Argon																
3	22,99 <b>11</b> Na 11 Sodík	24,31 <b>12</b> Mg 12 Hořčík	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13 26,98 <b>13</b> Al 13 Hliník	14 28,09 <b>14</b> Si 14 Křemík	15 30,97 <b>15</b> P 15 Fosfor	16 32,06 <b>16</b> S 16 Síra	17 35,45 <b>17</b> Cl 17 Chlór	18 39,95 <b>18</b> Ar 18 Argon	39,10 <b>19</b> K 19 Draslík	40,08 <b>20</b> Ca 20 Vápník	44,96 <b>21</b> Sc 21 Skandium	47,88 <b>22</b> Ti 22 Titan	50,94 <b>23</b> V 23 Vanad	52,00 <b>24</b> Cr 24 Chrom	54,94 <b>25</b> Mn 25 Mangan	55,85 <b>26</b> Fe 26 Železo	58,93 <b>27</b> Co 27 Kobalt	58,69 <b>28</b> Ni 28 Nikl	63,55 <b>29</b> Cu 29 Měď	65,38 <b>30</b> Zn 30 Zinek	69,72 <b>31</b> Ga 31 Gallium	72,61 <b>32</b> Ge 32 Germanium	74,92 <b>33</b> As 33 Arzen	78,96 <b>34</b> Se 34 Selen	79,90 <b>35</b> Br 35 Brom	83,80 <b>36</b> Kr 36 Krypton
4	85,47 <b>37</b> Rb 37 Rubidium	87,62 <b>38</b> Sr 38 Stroncium	88,91 <b>39</b> Y 39 Yttrium	91,22 <b>40</b> Zr 40 Zirkonium	92,91 <b>41</b> Nb 41 Niobium	95,94 <b>42</b> Mo 42 Molybden	98 <b>43</b> Tc 43 Technecium	101,07 <b>44</b> Ru 44 Ruthenium	102,91 <b>45</b> Rh 45 Rhodium	106,42 <b>46</b> Pd 46 Palladium	107,87 <b>47</b> Ag 47 Stříbr	112,41 <b>48</b> Cd 48 Kadmium	114,82 <b>49</b> In 49 Indium	118,71 <b>50</b> Sn 50 Cín	121,75 <b>51</b> Sb 51 Antimon	127,60 <b>52</b> Te 52 Tellur	126,90 <b>53</b> I 53 Jod	131,29 <b>54</b> Xe 54 Xenon	132,91 <b>55</b> Rb 55 Rubidium	137,33 <b>56</b> Ba 56 Baryum	178,49 <b>72</b> Hf 72 Hafnium	180,95 <b>73</b> Ta 73 Tantal	183,85 <b>74</b> W 74 Wolfram	186,21 <b>75</b> Re 75 Rhenium	190,20 <b>76</b> Os 76 Osmium	192,22 <b>77</b> Ir 77 Iridium	195,08 <b>78</b> Pt 78 Platina	196,97 <b>79</b> Au 79 Zlato	200,59 <b>80</b> Hg 80 Rtuť	204,38 <b>81</b> Tl 81 Thallium	207,20 <b>82</b> Pb 82 Olovo	208,98 <b>83</b> Bi 83 Bismut	209 <b>84</b> Po 84 Polonium	210 <b>85</b> At 85 Astat	222 <b>86</b> Rn 86 Radon	
5	132,91 <b>55</b> Rb 55 Rubidium	137,33 <b>56</b> Ba 56 Baryum	178,49 <b>72</b> Hf 72 Hafnium	180,95 <b>73</b> Ta 73 Tantal	183,85 <b>74</b> W 74 Wolfram	186,21 <b>75</b> Re 75 Rhenium	190,20 <b>76</b> Os 76 Osmium	192,22 <b>77</b> Ir 77 Iridium	195,08 <b>78</b> Pt 78 Platina	196,97 <b>79</b> Au 79 Zlato	200,59 <b>80</b> Hg 80 Rtuť	204,38 <b>81</b> Tl 81 Thallium	207,20 <b>82</b> Pb 82 Olovo	208,98 <b>83</b> Bi 83 Bismut	209 <b>84</b> Po 84 Polonium	210 <b>85</b> At 85 Astat	222 <b>86</b> Rn 86 Radon	223 <b>87</b> Fr 87 Francium	226,03 <b>88</b> Ra 88 Radium	~267 <b>104</b> Rf 104 Rutherfordium	~268 <b>105</b> Db 105 Dubnium	~269 <b>106</b> Sg 106 Seaborgium	~270 <b>107</b> Bh 107 Bohrium	~271 <b>108</b> Hs 108 Hassium	~272 <b>109</b> Mt 109 Meitnerium	~278 <b>110</b> Ds 110 Darmstadtium	~281 <b>111</b> Rg 111 Roentgenium	~285 <b>112</b> Cn 112 Copernicium	~286 <b>113</b> Nh 113 Nihonium	~289 <b>114</b> Fl 114 Flerovium	~288 <b>115</b> Mc 115 Moscovium	~293 <b>116</b> Lv 116 Livermorium	~294 <b>117</b> Ts 117 Tennessine	~294 <b>118</b> Og 118 Oganesson		
6	138,91 <b>57</b> La 57 Lanthan	140,12 <b>58</b> Ce 58 Cer	140,91 <b>59</b> Pr 59 Praseodym	144,24 <b>60</b> Nd 60 Neodym	~145 <b>61</b> Pm 61 Promethium	150,36 <b>62</b> Sm 62 Samarium	151,96 <b>63</b> Eu 63 Europium	157,25 <b>64</b> Gd 64 Gadolinium	158,93 <b>65</b> Tb 65 Terbium	162,50 <b>66</b> Dy 66 Dysprosium	164,93 <b>67</b> Ho 67 Holmium	167,26 <b>68</b> Er 68 Erbium	168,93 <b>69</b> Tm 69 Thulium	173,04 <b>70</b> Yb 70 Ytterbium	174,04 <b>71</b> Lu 71 Lutetium																					
7	227,03 <b>89</b> Ac 89 Aktinium	232,04 <b>90</b> Th 90 Thorium	231,04 <b>91</b> Pa 91 Protaktinium	238,03 <b>92</b> U 92 Uran	237,05 <b>93</b> Np 93 Neptunium	[244] <b>94</b> Pu 94 Plutonium	~243 <b>95</b> Am 95 Americium	~247 <b>96</b> Cm 96 Curium	~247 <b>97</b> Bk 97 Berkelium	~251 <b>98</b> Cf 98 Kalfornium	~252 <b>99</b> Es 99 Einsteinium	~257 <b>100</b> Fm 100 Fermium	~258 <b>101</b> Md 101 Mendelevium	~259 <b>102</b> No 102 Nobelium	~260 <b>103</b> Lr 103 Lawrencium																					

- **Objev elektronu** - Joseph John Thomson
- **Objev atomového jádra** - Ernest Rutherford

## Struktura atomu



- **Objev „kvarku“** - 70. léta 20. století

## Pole (Field)



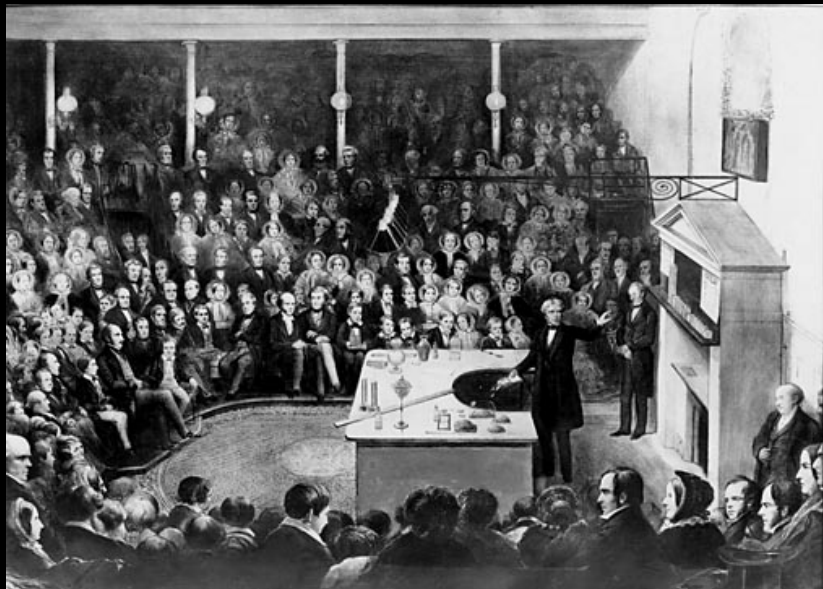


## Pole (Field)



- Fyzikální definice pole zcela odlišná:
- „něco“, co se rozprostírá přes „celý vesmír“
- nabírá v každém bodě prostoru určitou hodnotu a může se měnit v čase

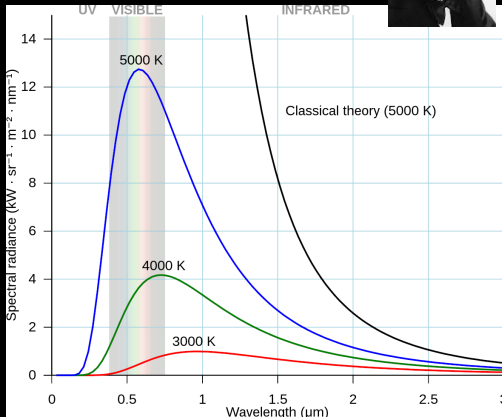
Cesta ke „kvantovým polím“:



# Cesta k relativitě (prostoru a času) a ke „kvantům“

## Fyzikální „revoluce“ z počátku 20. století:

- *Záření absolutně černého tělesa - vyzařování jen v určitých „balíčcích“ - kvantech (Max Planck - Nobelova cena 1918)*
- *Lidé jako Heisenberg nebo Schrödinger si uvědomovali, že na nejmenších prostorových škálách je svět zcela odlišný od našich „představ“*



# Cesta k relativitě (prostoru a času) a ke „kvantům“

## Epochální články Alberta Einsteina z roku 1905:

- *Über... die Erzeugung... des Lichts betreffenden heuristischen Gesichtspunkt* (vysvětlení fotoelektrického jevu - Nobelova cena 1921)
- *Über die... molekularkinetische Theorie...* (o Brownově pohybu)
- *Zur Elektrodynamik bewegter Körper* (o elektrodynamice pohybujících se těles)
- Princip fotoelektrického jevu:
- energie uvolněných elektronů nezávisí na intenzitě dopadajícího světla
- energie uvolněných elektronů je nepřímo úměrná vlnové délce světla

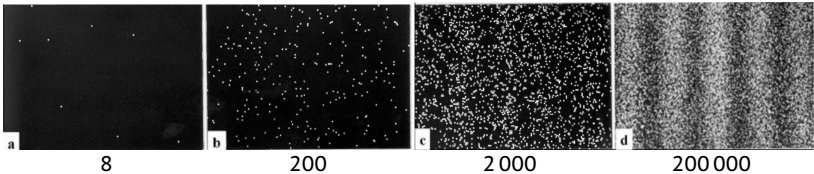
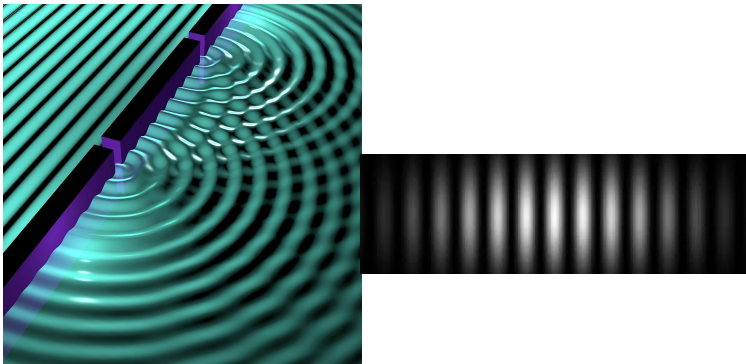


6. *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt; von A. Einstein.*

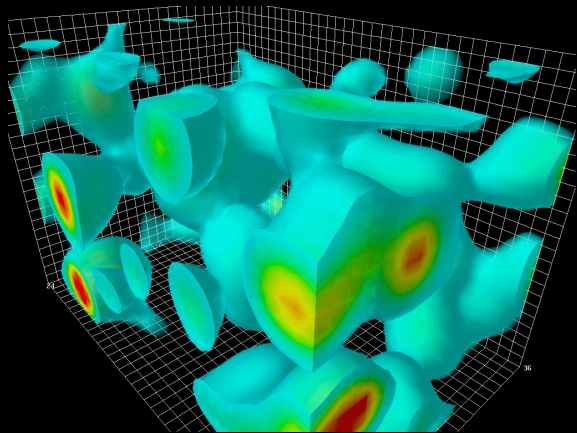
Zwischen den theoretischen Vorstellungen, welche sich die Physiker über die Gase und andere ponderable Körper gebildet haben, und der Maxwell'schen Theorie der elektromagnetischen Prozesse im sogenannten leeren Raume besteht ein tiefgreifender formaler Unterschied. Während wir uns nämlich den Zustand eines Körpers durch die Lagen und Geschwindigkeiten einer zwar sehr großen, jedoch endlichen Anzahl von Atomen und Elektronen für vollkommen bestimmt ansehen, bedienen wir uns zur Bestimmung des elektromagnetischen Zustandes eines Raumes kontinuierlicher räumlicher Funktionen, so daß also eine endliche Anzahl von Größen nicht als genügend anzusehen ist zur vollständigen Festlegung des elektromagnetischen Zustandes eines Raumes. Nach der Maxwell'schen Theorie ist bei allen rein elektromagnetischen Erscheinungen, also auch beim Licht, die Energie als kontinuierliche Raumfunktion aufzufassen, während die Energie eines ponderablen Körpers nach der gegenwärtigen Auffassung der Physiker als eine über die Atome und Elektronen erstreckte Summe darzustellen ist. Die Energie eines ponderablen Körpers kann nicht in beliebig viele, beliebig kleine Teile zerfallen, während sich die Energie eines von einer punktförmigen Lichtquelle ausgesandten Lichtstrahles nach der Maxwell'schen Theorie (oder Allgemeiner nach jeder Undulationstheorie) des Lichtes auf ein stets wachsendes Volumen sich kontinuierlich verteilt.

Die mit kontinuierlichen Raumfunktionen operierende Undulationstheorie des Lichtes hat sich zur Darstellung der rein optischen Phänomene vortrefflich bewährt und wird wohl nie durch eine andere Theorie ersetzt werden. Es ist jedoch im Auge zu behalten, daß sich die optischen Beobachtungen auf zeitliche Mittelwerte, nicht aber auf Momentanwerte beziehen, und es ist trotz der vollständigen Bestätigung der Theorie der Beugung, Reflexion, Brechung, Dispersion etc. durch das

# Dvoušterbinový jev (Double-slit effect)



## Pole (Field)



pole absolutního  
vakua

# Nová "periodická" tabulka

elektron


















neutrino

up kvark

down  
kvark

- tři „částice“ z nichž je vše vytvořeno - elektron a dva kvarky
- tyto „částice“ nejsou fundamentální - zásadní jsou jejich „pole“
- existuje čtvrtá částice - neutrino - která hraje také důležitou roli
- tyto čtyři částice tvoří podstatu světa

# Standardní model elementárních částic

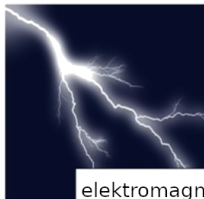
		tři generace částic látky (fermiony)			interakce / nosiče sil (bosony)	
		I	II	III		
hmotnost náboj spin	KVARKY	$\approx 2,2 \text{ MeV}$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$  <b>u</b> <b>up</b>	$\approx 1,28 \text{ GeV}$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$  <b>c</b> <b>charm</b>	$\approx 173,1 \text{ GeV}$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$  <b>t</b> <b>top</b>	$0$ $0$ $1$  <b>g</b> <b>gluon</b>	$\approx 124,97 \text{ GeV}$ $0$ $0$  <b>H</b> <b>higgs</b>
		$\approx 4,7 \text{ MeV}$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$  <b>d</b> <b>down</b>	$\approx 96 \text{ MeV}$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$  <b>s</b> <b>strange</b>	$\approx 4,18 \text{ GeV}$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$  <b>b</b> <b>bottom</b>	$0$ $0$ $1$  <b><math>\gamma</math></b> <b>foton</b>	
		$\approx 0,511 \text{ MeV}$ $-1$ $\frac{1}{2}$  <b>e</b> <b>elektron</b>	$\approx 105,66 \text{ MeV}$ $-1$ $\frac{1}{2}$  <b><math>\mu</math></b> <b>mion</b>	$\approx 1,7768 \text{ GeV}$ $-1$ $\frac{1}{2}$  <b><math>\tau</math></b> <b>tauon</b>	$\approx 91,19 \text{ GeV}$ $0$ $1$  <b>Z</b> <b>Z boson</b>	
		$< 1,0 \text{ eV}$ $0$ $\frac{1}{2}$  <b><math>\nu_e</math></b> <b>elektron. neutrino</b>	$< 0,17 \text{ MeV}$ $0$ $\frac{1}{2}$  <b><math>\nu_\mu</math></b> <b>mionové neutrino</b>	$< 18,2 \text{ MeV}$ $0$ $\frac{1}{2}$  <b><math>\nu_\tau</math></b> <b>tauonové neutrino</b>	$\approx 80,39 \text{ GeV}$ $\pm 1$ $1$  <b>W</b> <b>W boson</b>	
	LEPTONY				POLNÍ BOSONY VEKTOROVÉ BOSONY	SKALÁRNÍ BOSONY



# čtyři síly



gravitace



elektromagnetismus



silná jaderná interakce



slabá jaderná interakce

Rovnice „teorie všeho“ (dosud):

kvantová mechanika

prostorčas gravitace

$$W = \int_{k < \Lambda} [Dg][DA][D\psi][D\Phi] \exp \left\{ i \int d^4x \sqrt{-g} \left[ \frac{m_p^2}{2} R \right. \right.$$

$$\left. \left. - \frac{1}{4} F_{\mu\nu}^a F^{a\mu\nu} + i \bar{\psi}^i \gamma^\mu D_\mu \psi^i + \left( \bar{\psi}_L^i V_{ij} \Phi \psi_R^j + \text{h.c.} \right) - |D_\mu \Phi|^2 - V(\Phi) \right] \right\}$$

ostatní síly

hmota

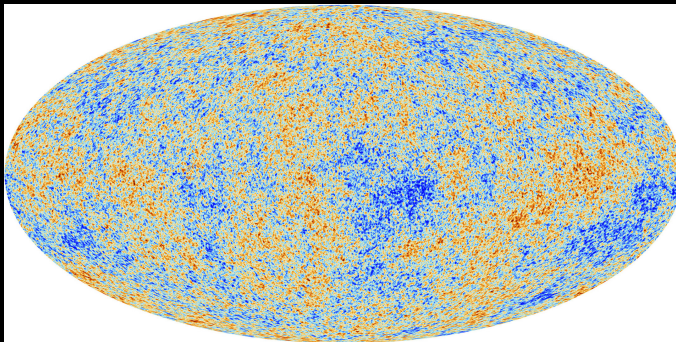
Higgs

„Hmota“, která chybí

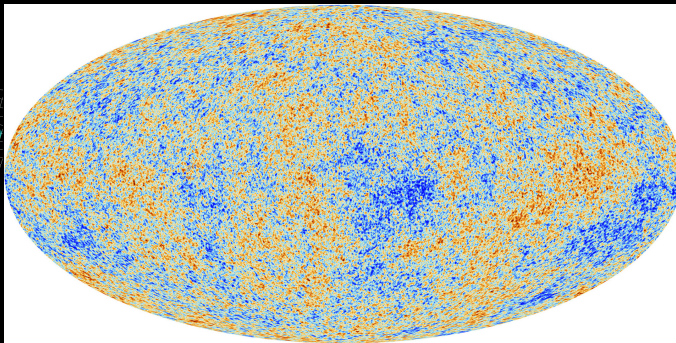
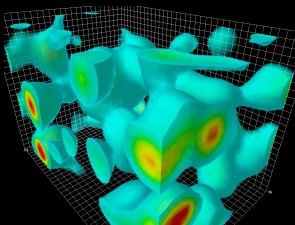


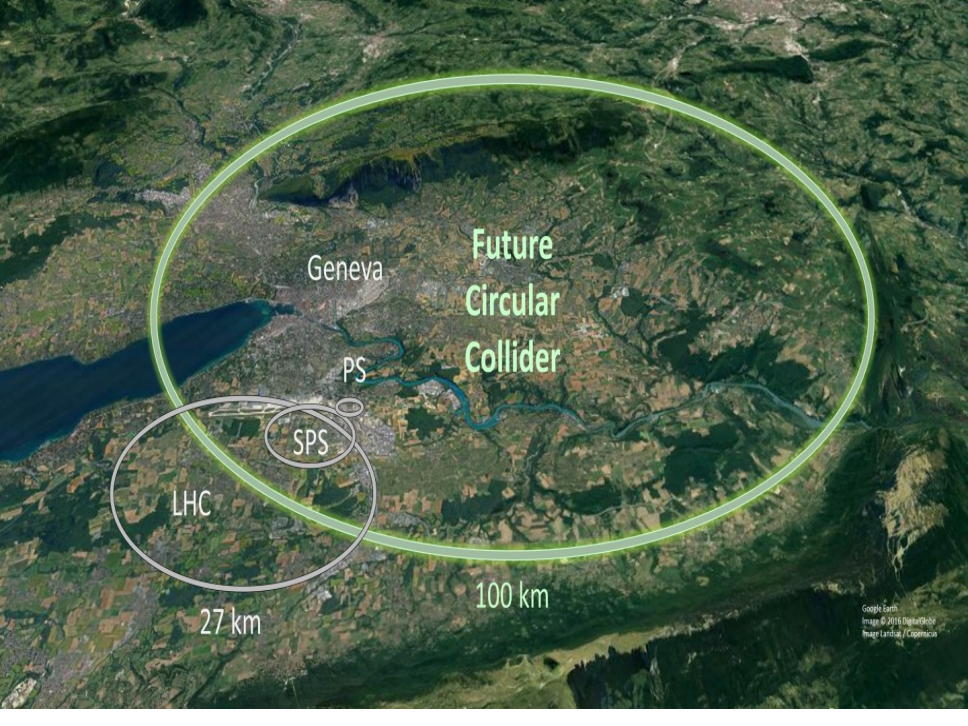
Temná hmota? Temná energie? Inlace?

Fluktuace kosmického mikrovlnného pozadí:



Fluktuace kosmického mikrovlnného pozadí:





Geneva

Future  
Circular  
Collider

PS

SPS

LHC

27 km

100 km

**Děkuji za pozornost!**