

A FÍSICA DO INFINITAMENTE PEQUENO

Masterclasses Internacionais de Física de Partículas
Universidade dos Açores – 18 de março de 2022

Ricardo Gonçalo
Universidade de Coimbra / LIP

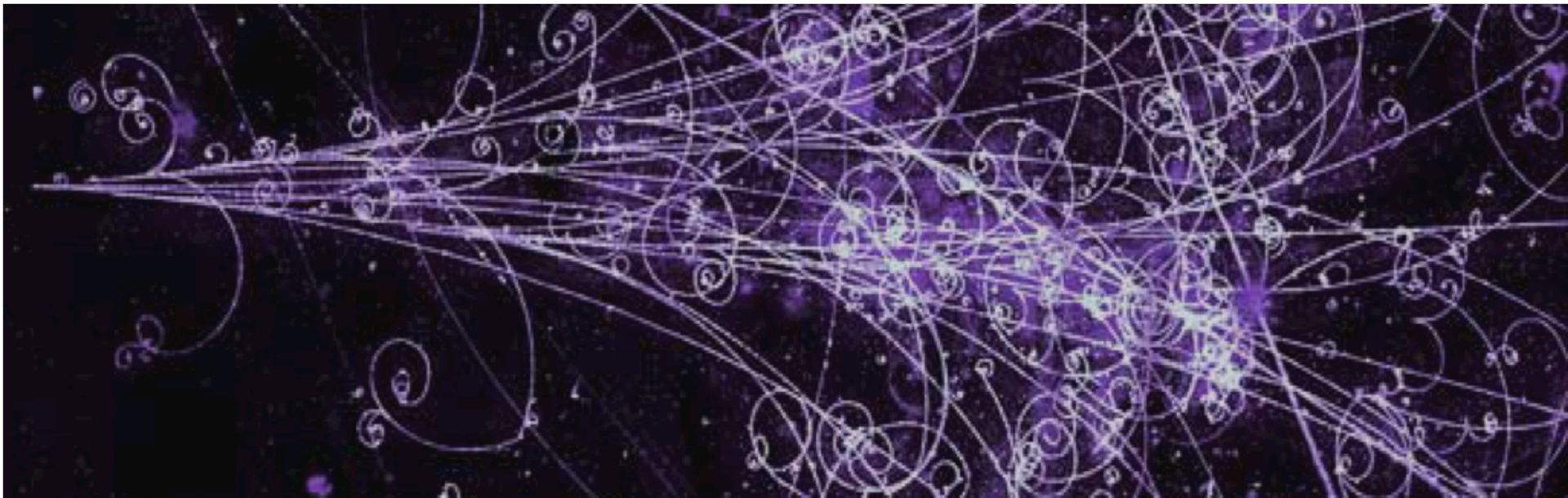
Sumário

- A física de partículas
 - De que são feitas as coisas?
 - Partículas e forças fundamentais
 - Como ver partículas invisíveis!
 - O que não sabemos?
- Benefícios para a sociedade
 - Terapia com radiação ionizante: partículas para a saúde



Diagram illustrating particle interactions (Feynman diagram) within a thought bubble. The diagram shows a vertical wavy line representing a photon or gluon exchange. On the left, an electron (e^-) and a muon (μ^-) interact. On the right, a positron (e^+) and a muon (μ^+) interact. Momenta are labeled: p, p' for electrons, k, k' for muons, and q for the exchanged particle. The equation $q = p + p' = k + k'$ is written in the center. Below the diagram, the mathematical expression $\langle \text{final state} | H_I | \text{initial state} \rangle$ is shown, followed by $M \sim \langle u' u' | H_I | \gamma \rangle^u \langle \gamma | H_I | e^+ e^- \rangle_u$.

A física de partículas



De que são feitas as coisas???

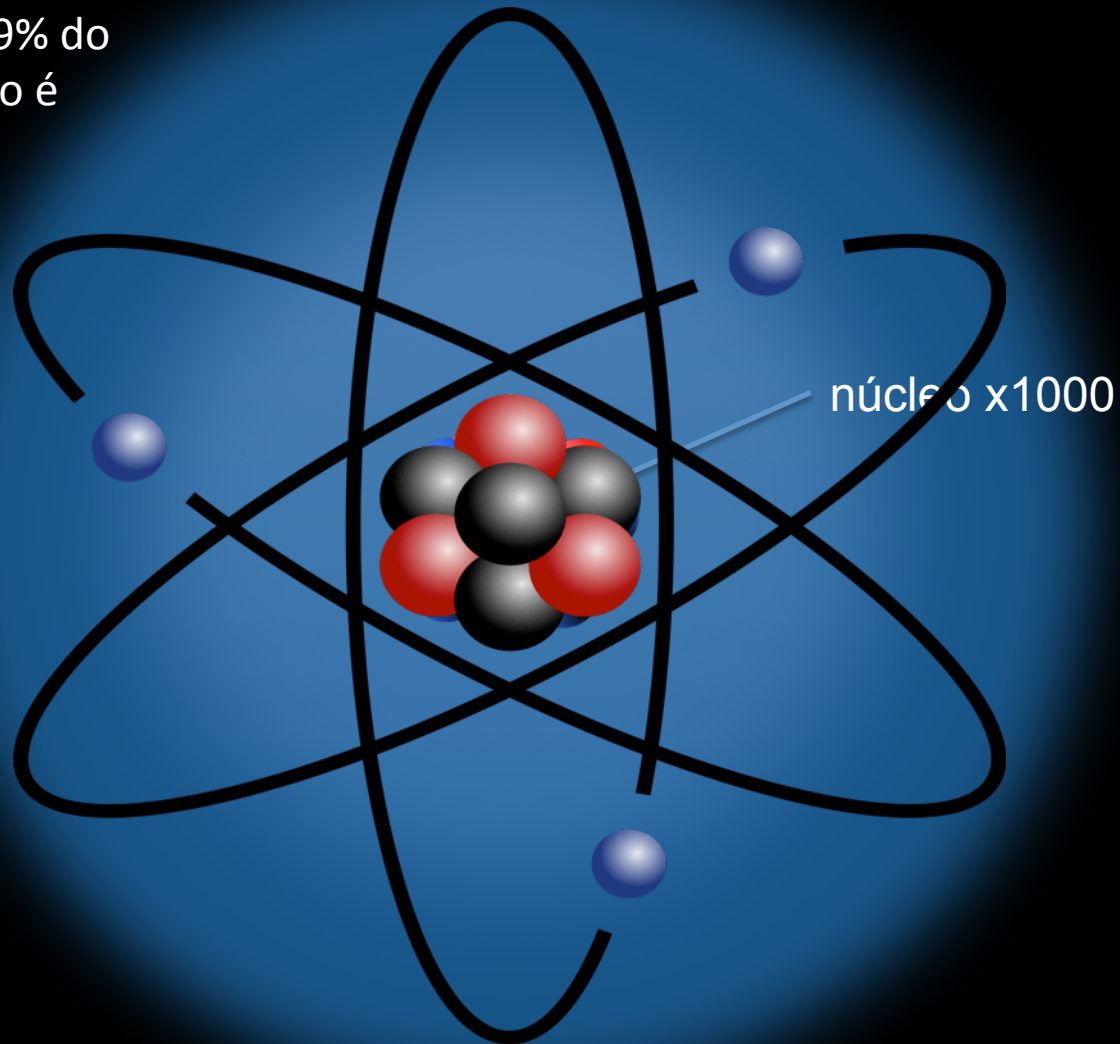


Periodic Table of the Elements

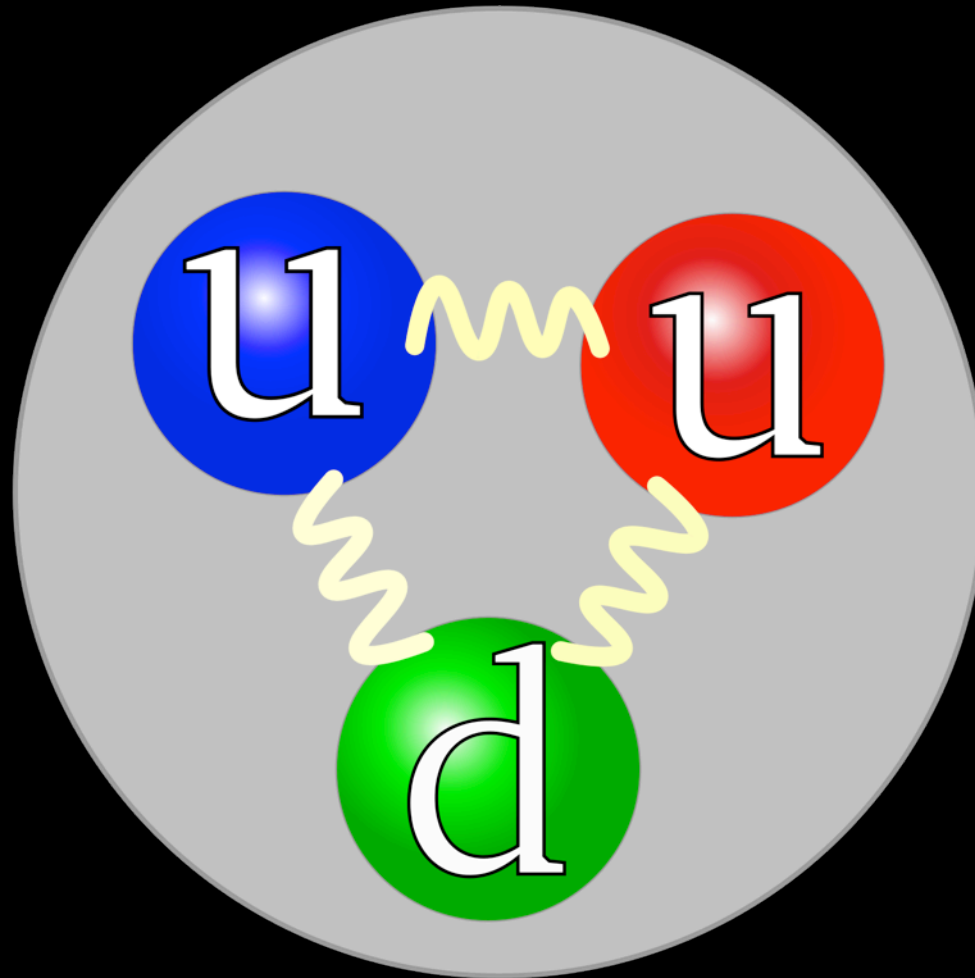
1 1A 11A	2 IIA 2A											13 IIIA 3A	14 IVA 4A	15 VA 5A	16 VIA 6A	17 VIIA 7A	18 VIIIA 8A
1 H Hydrogen 1.0079	2 He Helium 4.00260											5 B Boron 10.811	6 C Carbon 12.011	7 N Nitrogen 14.00674	8 O Oxygen 15.9994	9 F Fluorine 18.998403	10 Ne Neon 20.1797
3 Li Lithium 6.941	4 Be Beryllium 9.01218											13 Al Aluminum 26.981539	14 Si Silicon 28.0855	15 P Phosphorus 30.973762	16 S Sulfur 32.066	17 Cl Chlorine 35.4527	18 Ar Argon 39.948
11 Na Sodium 22.989768	12 Mg Magnesium 24.305	3 IIIB 3B	4 IVB 4B	5 VB 5B	6 VIB 6B	7 VIIB 7B	8 VIII 8	9 VIII 8	10 VIII 8	11 IB 1B	12 IIB 2B	13 Al Aluminum 26.981539	14 Si Silicon 28.0855	15 P Phosphorus 30.973762	16 S Sulfur 32.066	17 Cl Chlorine 35.4527	18 Ar Argon 39.948
19 K Potassium 39.0983	20 Ca Calcium 40.078	21 Sc Scandium 44.95591	22 Ti Titanium 47.88	23 V Vanadium 50.9415	24 Cr Chromium 51.9961	25 Mn Manganese 54.938	26 Fe Iron 55.847	27 Co Cobalt 58.9332	28 Ni Nickel 58.6934	29 Cu Copper 63.546	30 Zn Zinc 65.39	31 Ga Gallium 69.732	32 Ge Germanium 72.64	33 As Arsenic 74.92159	34 Se Selenium 78.96	35 Br Bromine 79.904	36 Kr Krypton 83.80
37 Rb Rubidium 85.4678	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.90585	40 Zr Zirconium 91.224	41 Nb Niobium 92.90638	42 Mo Molybdenum 95.94	43 Tc Technetium 98.9072	44 Ru Ruthenium 101.07	45 Rh Rhodium 102.9055	46 Pd Palladium 106.42	47 Ag Silver 107.8682	48 Cd Cadmium 112.411	49 In Indium 114.818	50 Sn Tin 118.71	51 Sb Antimony 121.760	52 Te Tellurium 127.6	53 I Iodine 126.90447	54 Xe Xenon 131.29
55 Cs Cesium 132.90543	56 Ba Barium 137.327	57-71 Lanthanide Series	72 Hf Hafnium 178.49	73 Ta Tantalum 180.9479	74 W Tungsten 183.85	75 Re Rhenium 186.207	76 Os Osmium 190.23	77 Ir Iridium 192.22	78 Pt Platinum 195.08	79 Au Gold 196.9665	80 Hg Mercury 200.59	81 Tl Thallium 204.3833	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 208.98037	84 Po Polonium [209]	85 At Astatine 209	86 Rn Radon 222
87 Fr Francium 223	88 Ra Radium 226	89-103 Actinide Series	104 Rf Rutherfordium [261]	105 Db Dubnium [262]	106 Sg Seaborgium [266]	107 Bh Bohrium [264]	108 Hs Hassium [269]	109 Mt Meitnerium [268]	110 Ds Darmstadtium [289]	111 Rg Roentgenium [272]	112 Cn Copernicium [277]	113 Uut Ununtrium [288]	114 Uuq Ununquadium [289]	115 Uup Ununpentium [288]	116 Uuh Ununhexium [288]	117 Uus Ununseptium [288]	118 Uuo Ununoctium [288]
		57 La Lanthanum 138.9055	58 Ce Cerium 140.115	59 Pr Praseodymium 140.90765	60 Nd Neodymium 144.24	61 Pm Promethium 144.9127	62 Sm Samarium 150.36	63 Eu Europium 151.9655	64 Gd Gadolinium 157.25	65 Tb Terbium 158.92534	66 Dy Dysprosium 162.50	67 Ho Holmium 164.93032	68 Er Erbium 167.26	69 Tm Thulium 168.93421	70 Yb Ytterbium 173.04	71 Lu Lutetium 174.967	
		89 Ac Actinium 227	90 Th Thorium 232.0381	91 Pa Protactinium 231.03588	92 U Uranium 238.0289	93 Np Neptunium 237.0482	94 Pu Plutonium 244.0642	95 Am Americium 243.0614	96 Cm Curium 247.0703	97 Bk Berkelium 247.0703	98 Cf Californium 251.0796	99 Es Einsteinium [254]	100 Fm Fermium 257.0951	101 Md Mendelevium 258.1	102 No Nobelium 259.1009	103 Lr Lawrencium [262]	
		Alkali Metal	Alkaline Earth	Transition Metal	Basic Metal	Semimetals	Nonmetals	Halogens	Noble Gas	Lanthanides	Actinides						

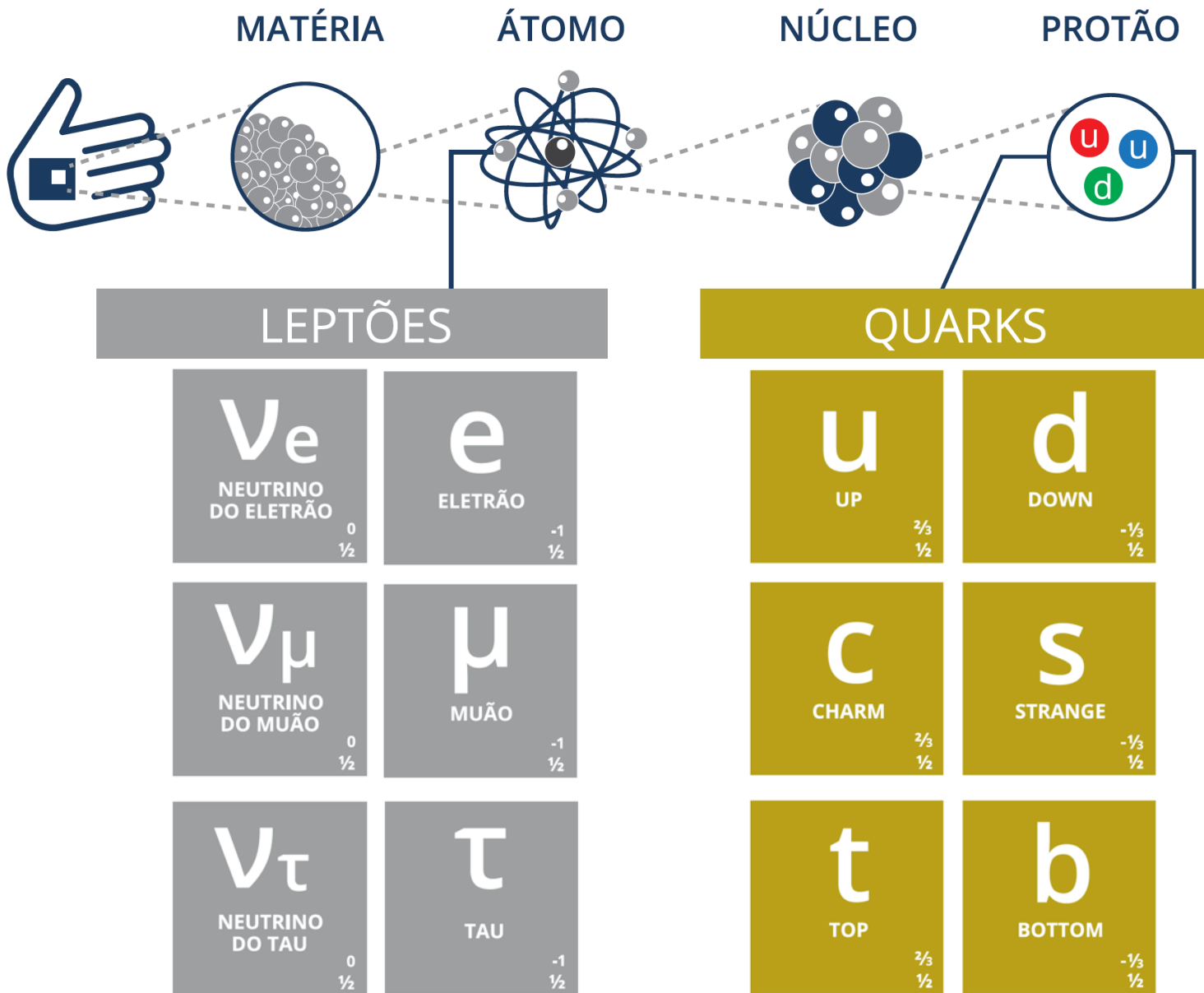
O átomo

99.999 999 999 9% do
volume do átomo é
vazio!

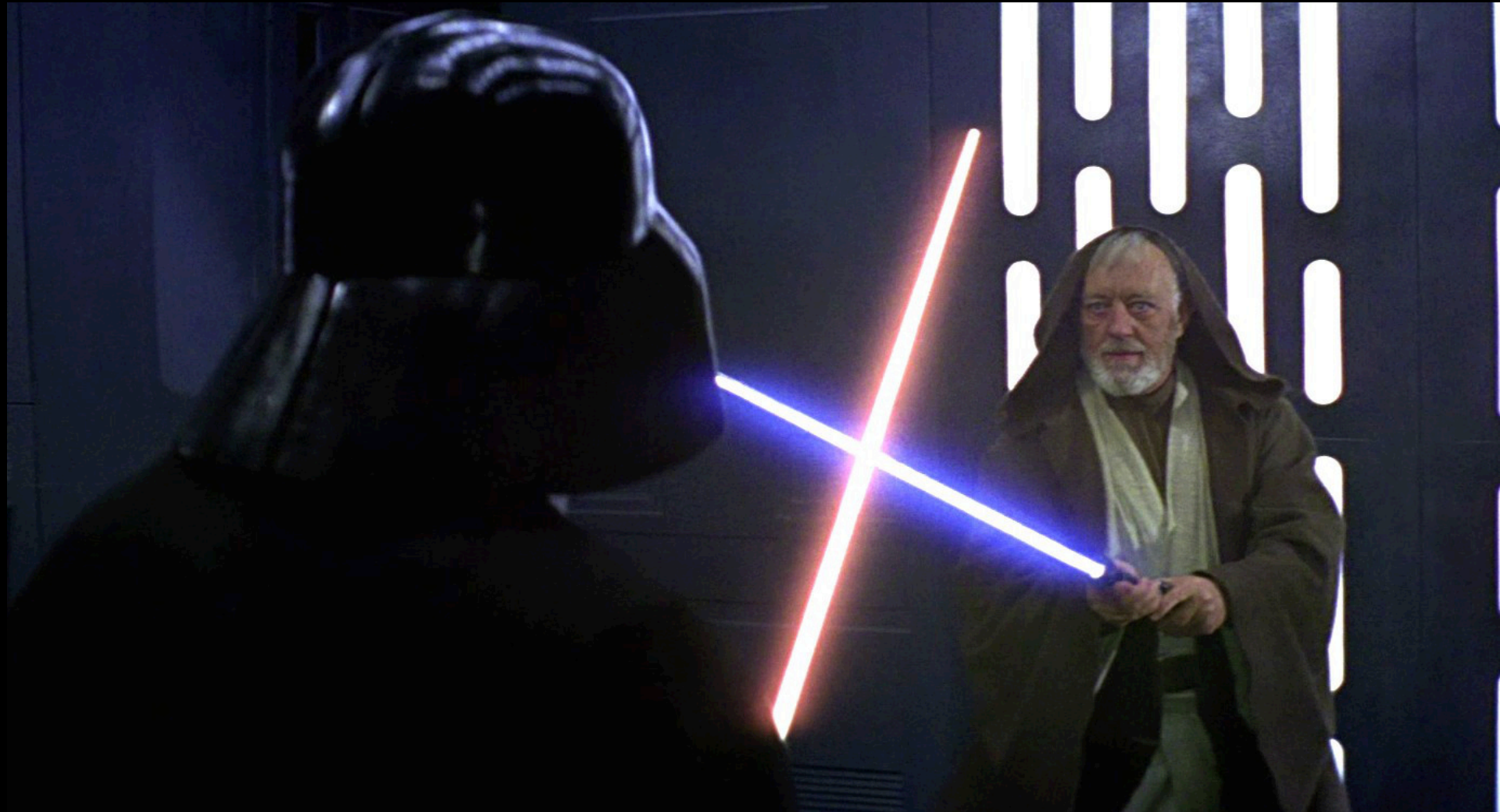


O protão no modelo dos quarks



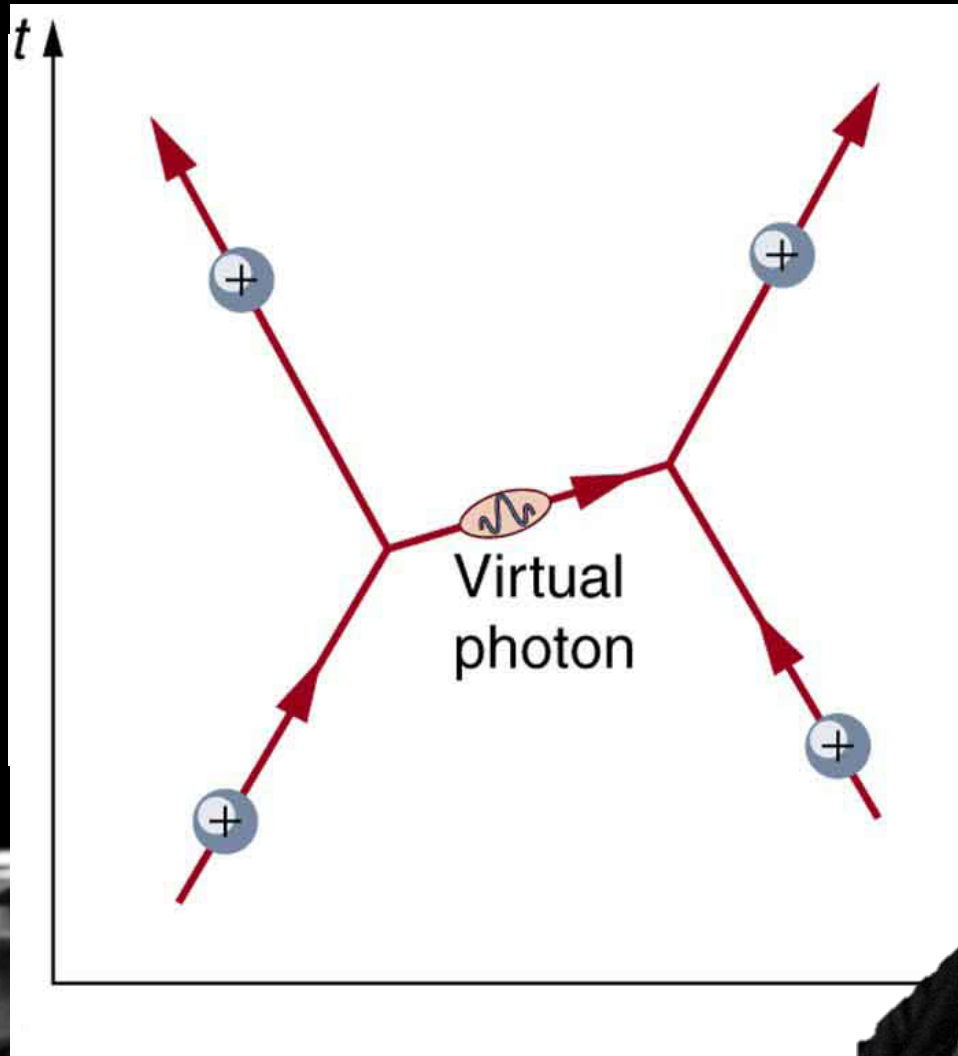


E as forças fundamentais?

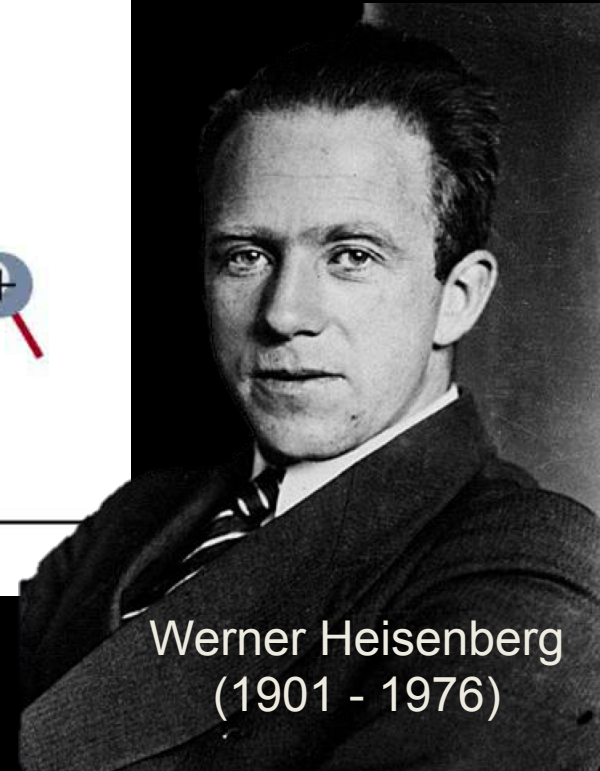


$$\Delta E \cdot \Delta t = h/4\pi$$

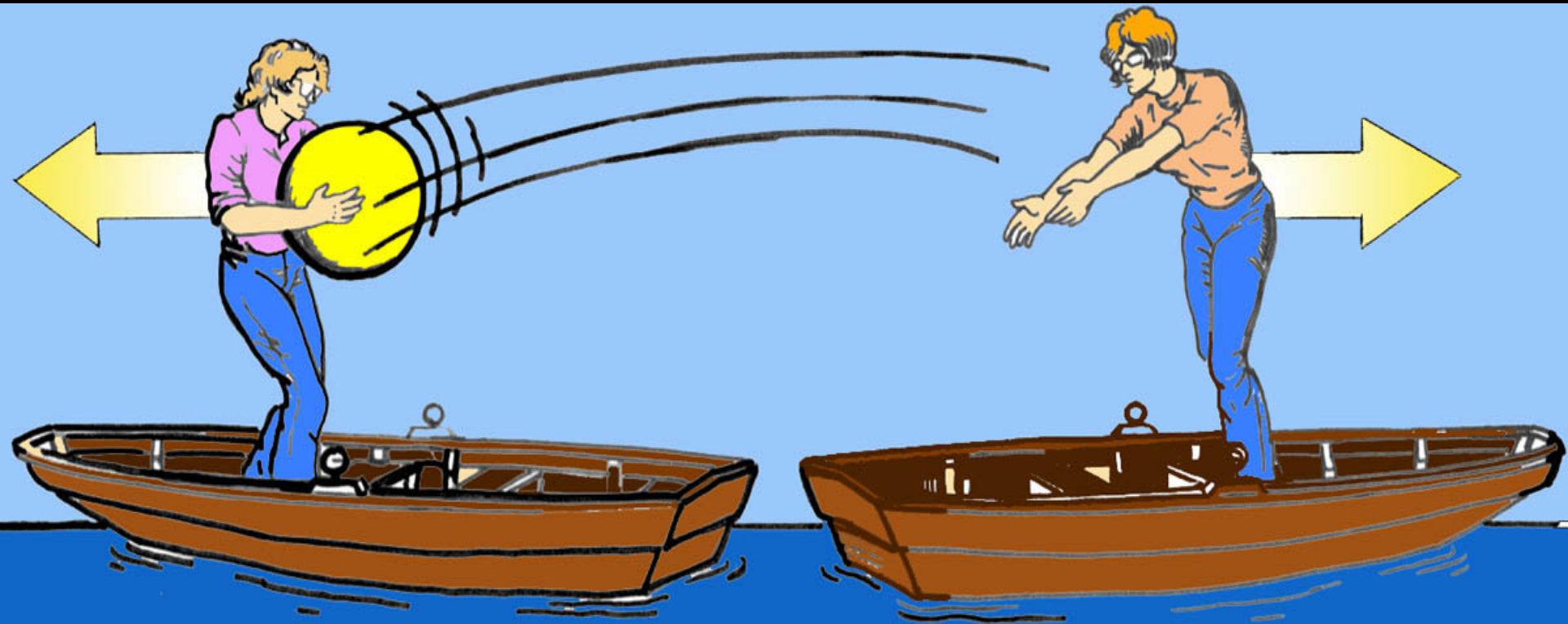
Richard Feynman
(1918 - 1988)

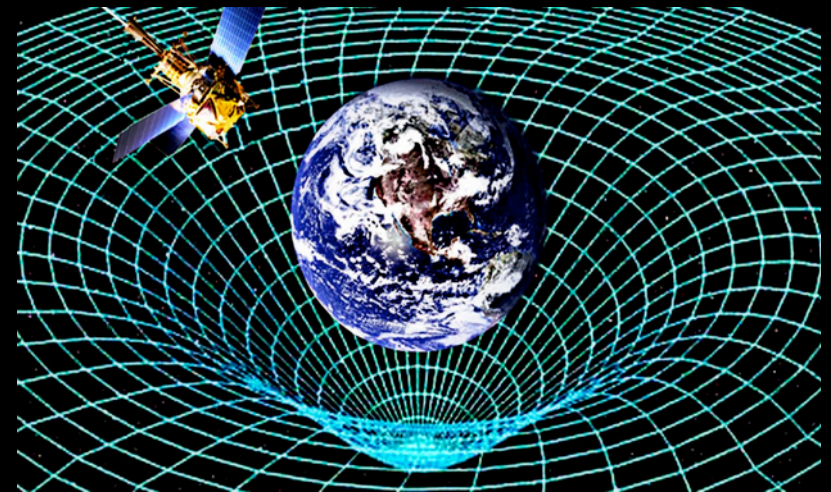
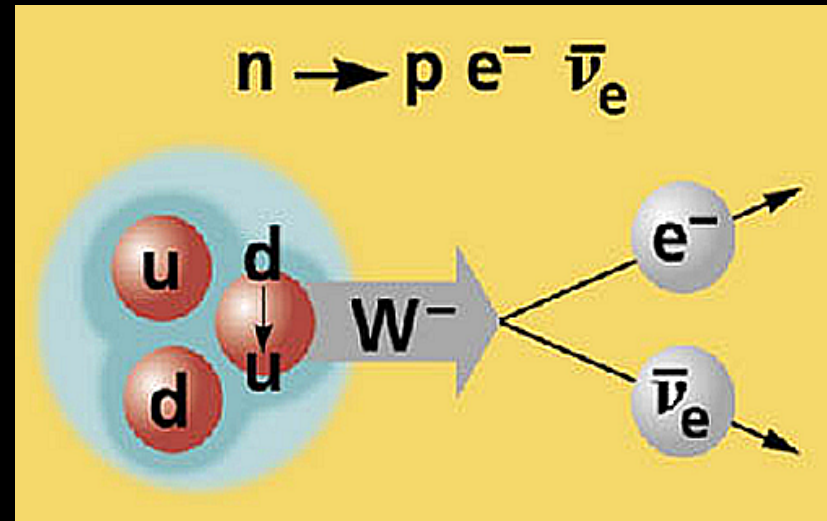
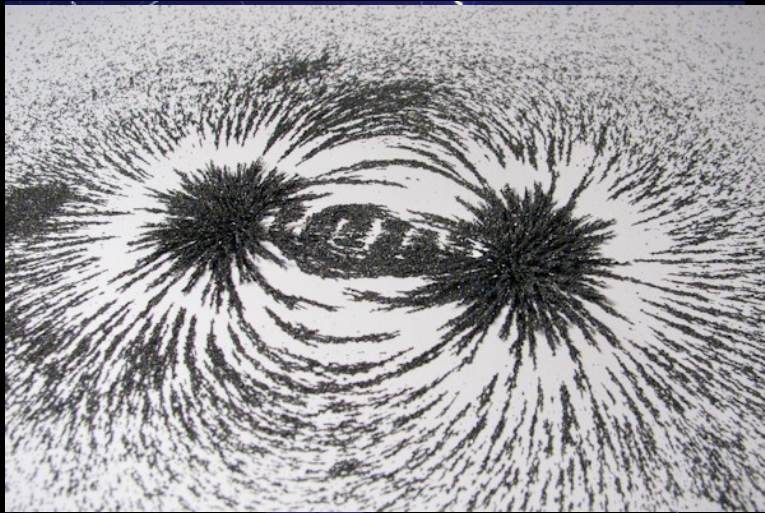


Werner Heisenberg
(1901 - 1976)



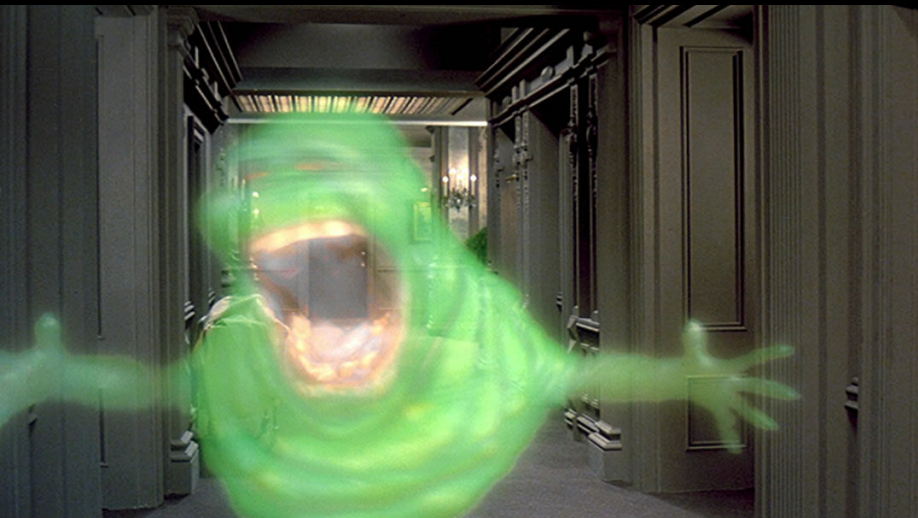
As forças fundamentais





Teste intercalar:

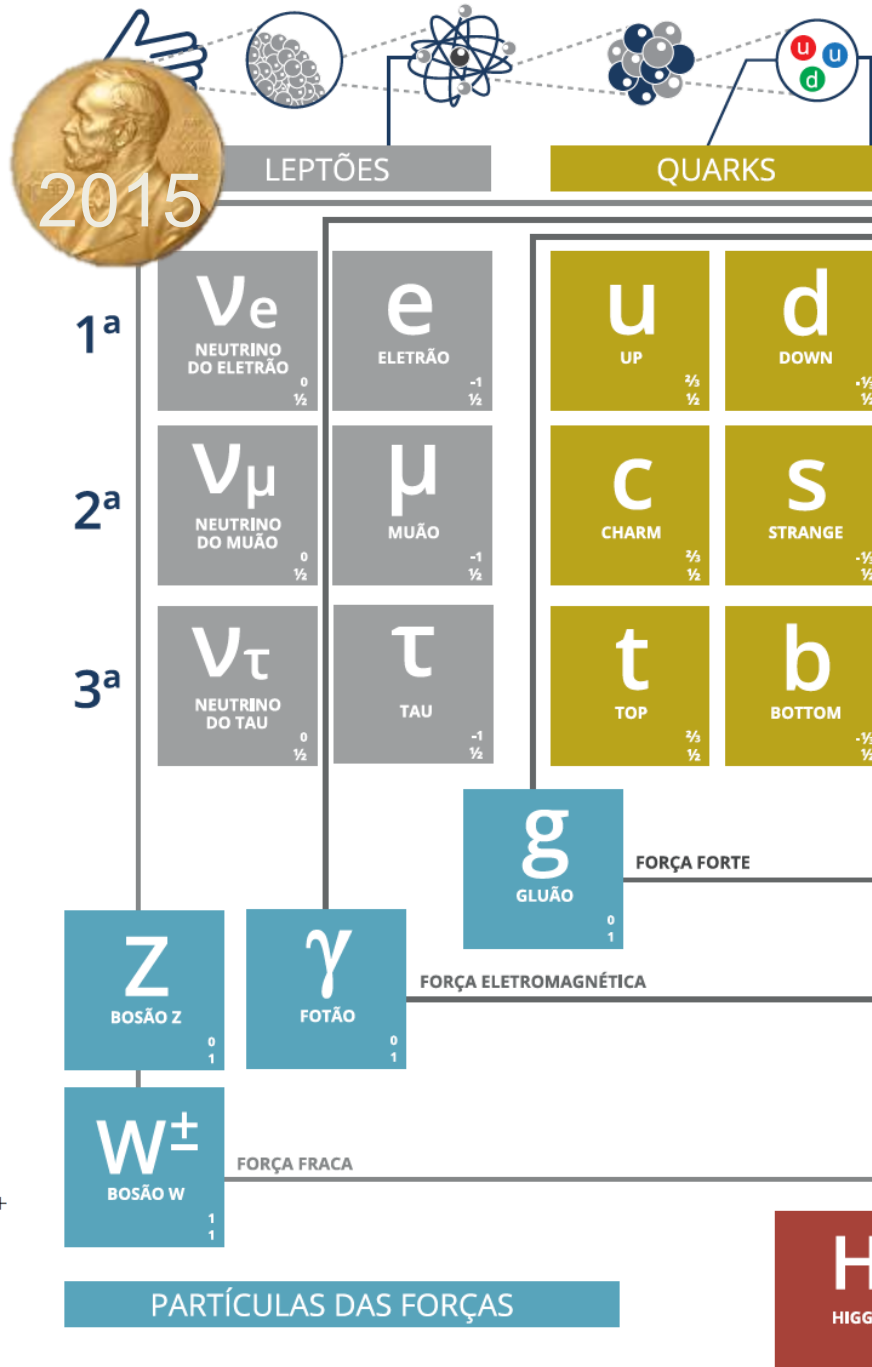
O Que está errado nestas imagens?



Ricardo Gonçalves

O Modelo Padrão da Física de Partículas

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{SM} = & -\frac{1}{2}\partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^a g_\mu^b g_\nu^c - \frac{1}{4}g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^b g_\nu^c g_\mu^d g_\nu^e - \partial_\nu W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\ & M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2}\partial_\nu Z_\mu^0 \partial_\nu Z_\mu^0 - \frac{1}{2c_w^2} M^2 Z_\mu^0 Z_\mu^0 - \frac{1}{2}\partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - ig_c Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\mu^- - \\ & W_\mu^- W_\mu^+) - Z_\mu^0 (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + Z_\mu^0 (W_\nu^+ \partial_\mu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\mu W_\mu^+) - \\ & ig_s w (\partial_\nu A_\mu (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - A_\nu (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + A_\mu (W_\nu^+ \partial_\mu W_\mu^- - \\ & W_\nu^- \partial_\mu W_\mu^+)) - \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- W_\nu^+ W_\nu^- + \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\mu^- W_\nu^+ + g^2 c_w^2 (Z_\mu^0 W_\mu^+ Z_\nu^0 W_\nu^- - \\ & Z_\mu^0 Z_\nu^0 W_\mu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w^2 (A_\mu W_\nu^+ A_\nu W_\mu^- - A_\mu A_\nu W_\nu^+ W_\mu^-) + g^2 s_w c_w (A_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\ & W_\nu^+ W_\mu^-) - 2A_\mu Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^-) - \frac{1}{2}\partial_\mu H \partial_\mu H - 2M^2 \alpha_h H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - \frac{1}{2}\partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \\ & \beta_h \left(\frac{2M^2}{g^2} + \frac{2M}{g} H + \frac{1}{2}(H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-) \right) + \frac{2M^4}{g^2} \alpha_h - \\ & g \alpha_h M (H^3 + H \phi^0 \phi^0 + 2H \phi^+ \phi^-) - \\ & \frac{1}{8}g^2 \alpha_h (H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+ \phi^-)^2 + 4(\phi^0)^2 \phi^+ \phi^- + 4H^2 \phi^+ \phi^- + 2(\phi^0)^2 H^2) - \\ & g M W_\mu^+ W_\mu^- H - \frac{1}{2}g \frac{M}{c_w^2} Z_\mu^0 H - \\ & \frac{1}{2}ig (W_\mu^+ (\phi^0 \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^0) - W_\mu^- (\phi^0 \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu \phi^0)) + \\ & \frac{1}{2}g (W_\mu^+ (H \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu H) + W_\mu^- (H \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu H)) + \frac{1}{2}g \frac{1}{c_w} (Z_\mu^0 (H \partial_\mu \phi^0 - \phi^0 \partial_\mu H) + \\ & M (\frac{1}{c_w} Z_\mu^0 \partial_\mu \phi^0 + W_\mu^+ \partial_\mu \phi^- + W_\mu^- \partial_\mu \phi^+)) - ig \frac{s_w^2}{c_w} M Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + ig s_w M A_\mu (W_\mu^+ \phi^- - \\ & W_\mu^- \phi^+) - ig \frac{1-2c_w^2}{2c_w} Z_\mu^0 (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) + ig s_w A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \\ & \frac{1}{4}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- (H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^-) - \frac{1}{8}g^2 \frac{1}{c_w} Z_\mu^0 (H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^-) - \\ & \frac{1}{2}g^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2}ig^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}g^2 s_w A_\mu \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\ & W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}ig^2 s_w A_\mu H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - g^2 \frac{s_w^2}{c_w} (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 A_\mu \phi^+ \phi^- - \\ & g^2 s_w^2 A_\mu A_\nu \phi^+ \phi^- + \frac{1}{2}ig_s \lambda_{ij}^a (g_{ij}^2 \gamma^\mu q_j^a) g_\mu^a - \bar{e}^\lambda (\gamma^\mu + m_e^\lambda) e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda (\gamma^\mu + m_\nu^\lambda) \nu^\lambda - \bar{u}_j^\lambda (\gamma^\mu + \\ & m_u^\lambda) u_j^\lambda - \bar{d}_j^\lambda (\gamma^\mu + m_d^\lambda) d_j^\lambda + ig s_w A_\mu (-\bar{e}^\lambda \gamma^\mu e^\lambda + \frac{2}{3}(\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu u_j^\lambda) - \frac{1}{3}(\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu d_j^\lambda)) + \\ & \frac{ig}{4c_w} Z_\mu^0 \{ (\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (4s_w^2 - 1 - \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu (\frac{2}{3}s_w^2 - 1 - \gamma^5) d_j^\lambda) + \\ & (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 - \frac{2}{3}s_w^2 + \gamma^5) u_j^\lambda) \} + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^+ ((\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) U^{lep}_{\lambda\kappa} e^\kappa) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) C_{\lambda\kappa} d_j^\kappa)) + \\ & \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^- ((\bar{e}^\kappa U^{lep\dagger}_{\kappa\lambda} \nu^\lambda (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_j^\kappa C_{\kappa\lambda}^\dagger \gamma^\mu (1 + \gamma^5) u_j^\lambda)) + \\ & \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ (-m_e^\kappa (\bar{\nu}^\lambda U^{lep}_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) e^\kappa) + m_\nu^\kappa (\bar{\nu}^\lambda U^{lep}_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) e^\kappa) + \\ & \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- (m_e^\lambda (\bar{e}^\lambda U^{lep\dagger}_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) \nu^\kappa) - m_\nu^\kappa (\bar{e}^\lambda U^{lep\dagger}_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) \nu^\kappa) - \frac{g}{2} \frac{m_\lambda}{M} H (\bar{\nu}^\lambda \nu^\lambda) - \\ & \frac{g}{2} \frac{m_\lambda}{M} H (\bar{e}^\lambda e^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda}{M} \phi^0 (\bar{\nu}^\lambda \gamma^5 \nu^\lambda) - \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda}{M} \phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^5 e^\lambda) - \frac{1}{4} \bar{\nu}_\lambda M_{\lambda\kappa}^R (1 - \gamma_5) \bar{\nu}_\kappa - \\ & \frac{1}{4} \bar{\nu}_\lambda M_{\lambda\kappa}^R (1 - \gamma_5) \bar{\nu}_\kappa + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ (-m_u^\kappa (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) d_j^\kappa) + m_d^\kappa (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) d_j^\kappa) + \\ & \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- (m_d^\lambda (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 + \gamma^5) u_j^\kappa) - m_u^\kappa (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 - \gamma^5) u_j^\kappa) - \frac{g}{2} \frac{m_\lambda}{M} H (\bar{u}_j^\lambda u_j^\lambda) - \\ & \frac{g}{2} \frac{m_\lambda}{M} H (\bar{d}_j^\lambda d_j^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda}{M} \phi^0 (\bar{u}_j^\lambda \gamma^5 u_j^\lambda) - \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda}{M} \phi^0 (\bar{d}_j^\lambda \gamma^5 d_j^\lambda) + \bar{G}^a \partial^2 G^a + g_s f^{abc} \partial_\mu \bar{G}^a G_\mu^b g_\mu^c + \\ & \bar{X}^+ (\partial^2 - M^2) X^+ + \bar{X}^- (\partial^2 - M^2) X^- + \bar{X}^0 (\partial^2 - \frac{M^2}{c_w^2}) X^0 + \bar{Y} \partial^2 Y + ig_c w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{X}^0 X^- - \\ & \partial_\mu \bar{X}^+ X^0) + ig s_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{Y} X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ Y) + ig c_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- X^0 - \\ & \partial_\mu \bar{X}^0 X^+) + ig s_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- Y - \partial_\mu \bar{Y} X^+) + ig c_w Z_\mu^0 (\partial_\mu \bar{X}^+ X^- - \\ & \partial_\mu \bar{X}^- X^+) + ig s_w A_\mu (\partial_\mu \bar{X}^+ X^- - \\ & \partial_\mu \bar{X}^- X^+) - \frac{1}{2}gM (\bar{X}^+ X^+ H + \bar{X}^- X^- H + \frac{1}{c_w^2} \bar{X}^0 X^0 H) + \frac{1-2c_w^2}{2c_w} igM (\bar{X}^+ X^0 \phi^+ - \bar{X}^- X^0 \phi^-) + \\ & \frac{1}{2c_w} igM (\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-) + igM s_w (\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-) + \\ & \frac{1}{2}igM (\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0) . \end{aligned}$$



Para cada uma destas partículas, existe uma antipartícula de carga oposta (antimatéria)

PARTÍCULAS DE MATÉRIA

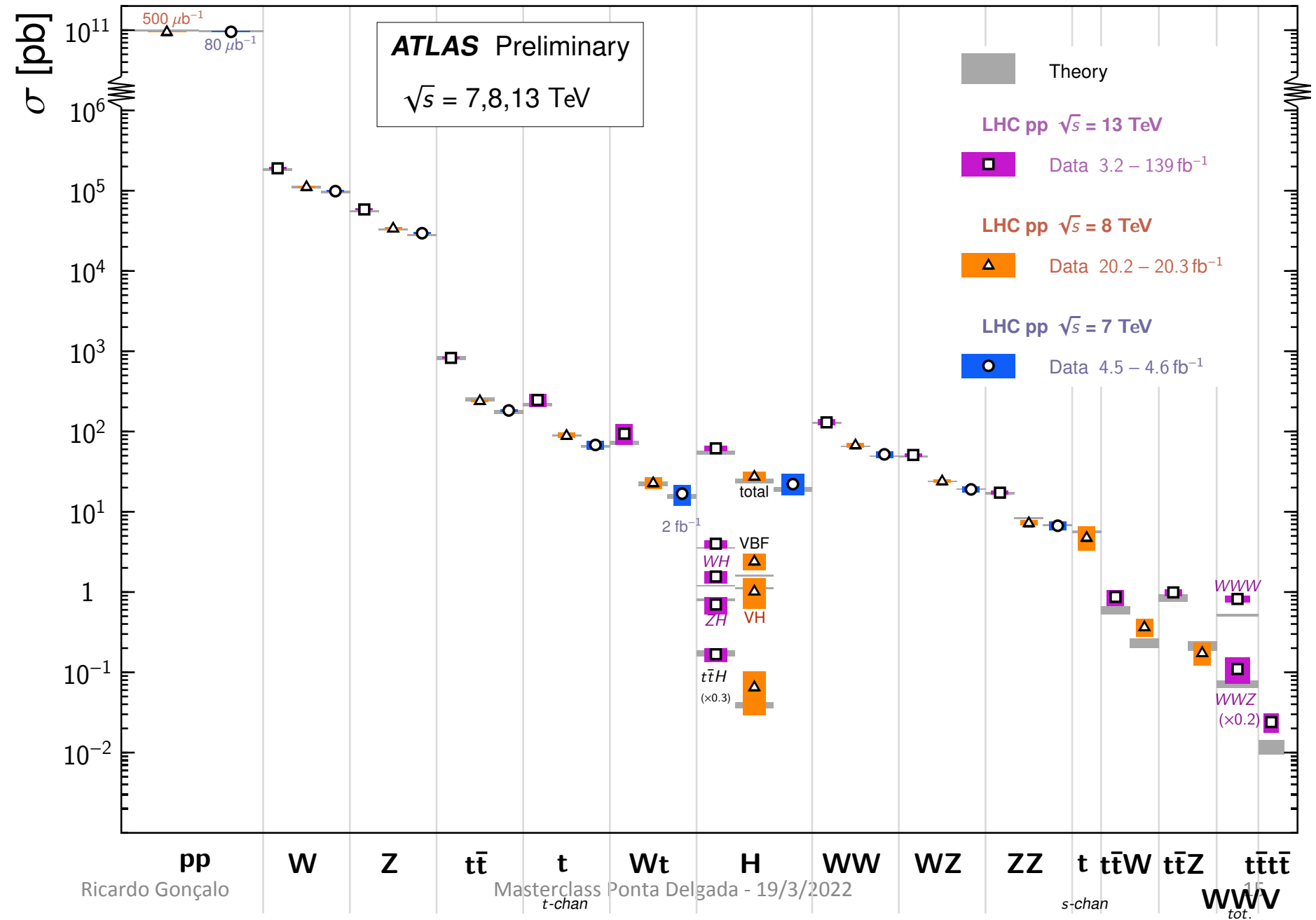
Legenda



PARTÍCULAS DAS FORÇAS

Standard Model Total Production Cross Section Measurements

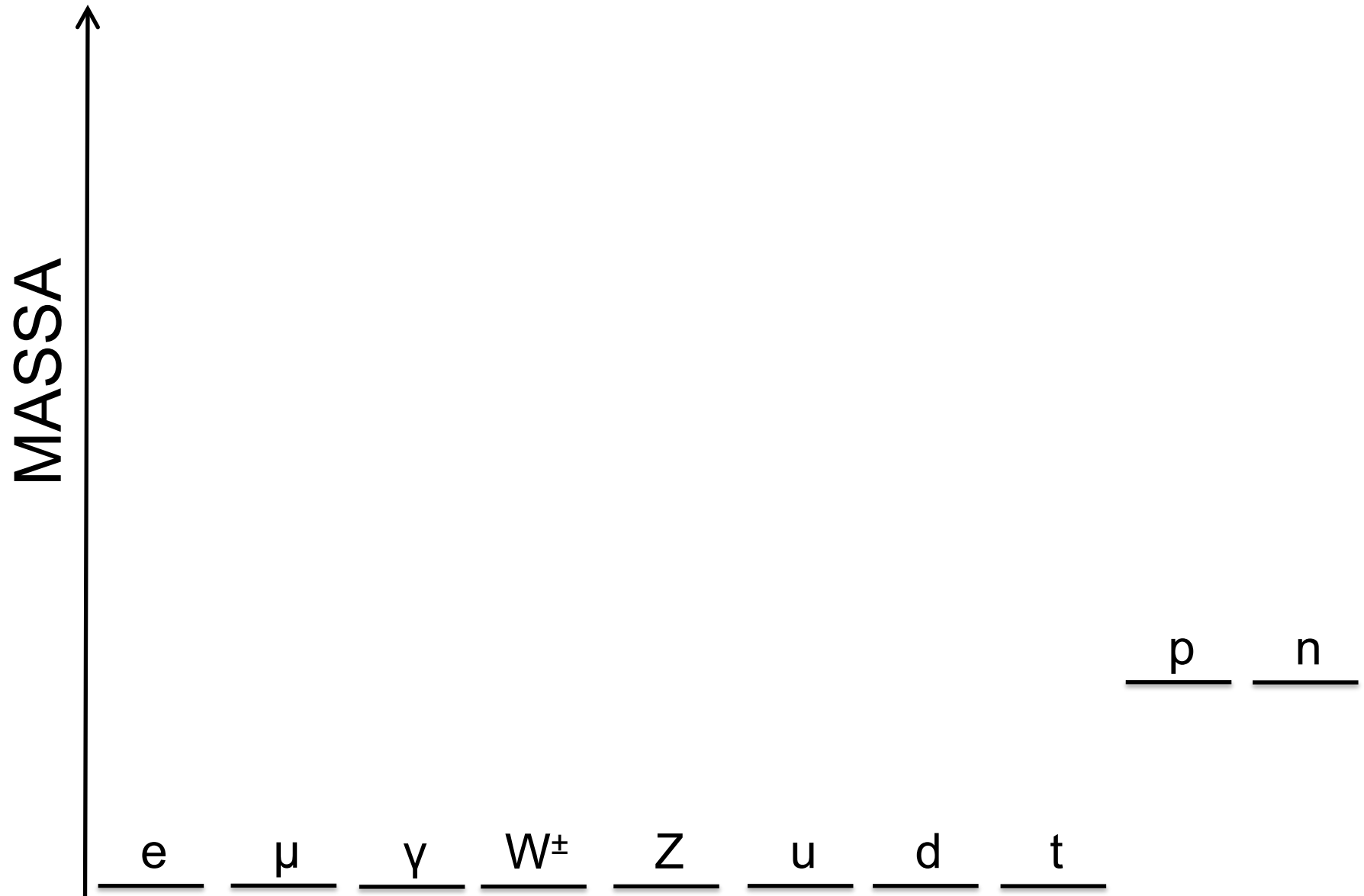
Status: February 2022



Agora os problemas...



Isto não devia funcionar!...



O Mecanismo de Higgs

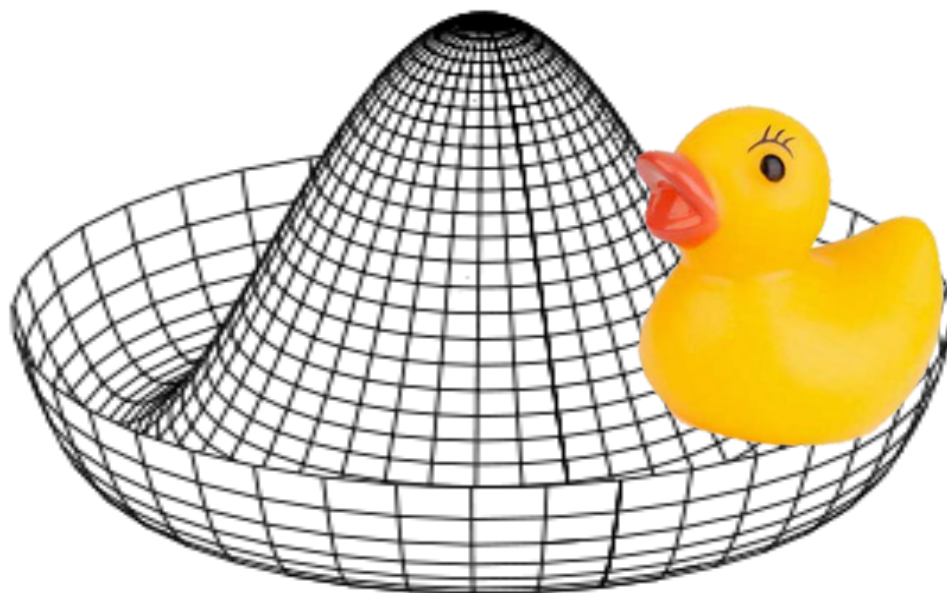
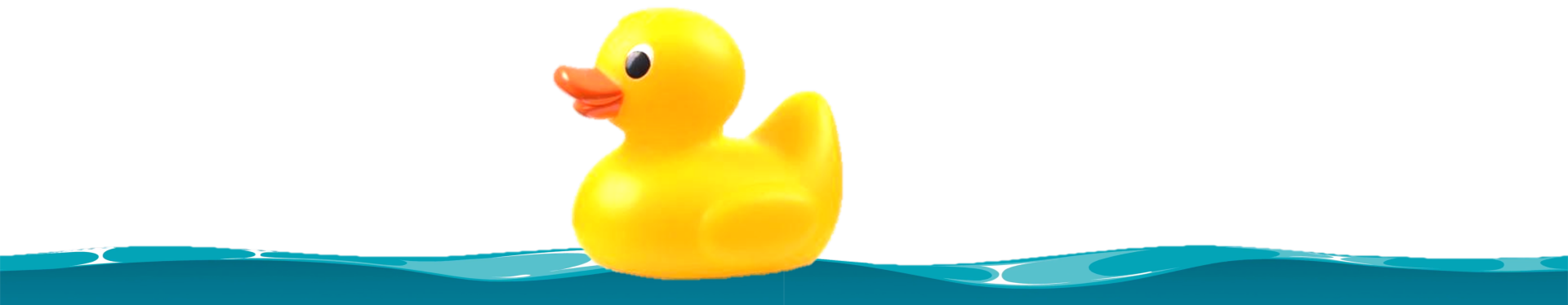


Robert Brout (1928 – 2011)

Peter Higgs (b. 1929)

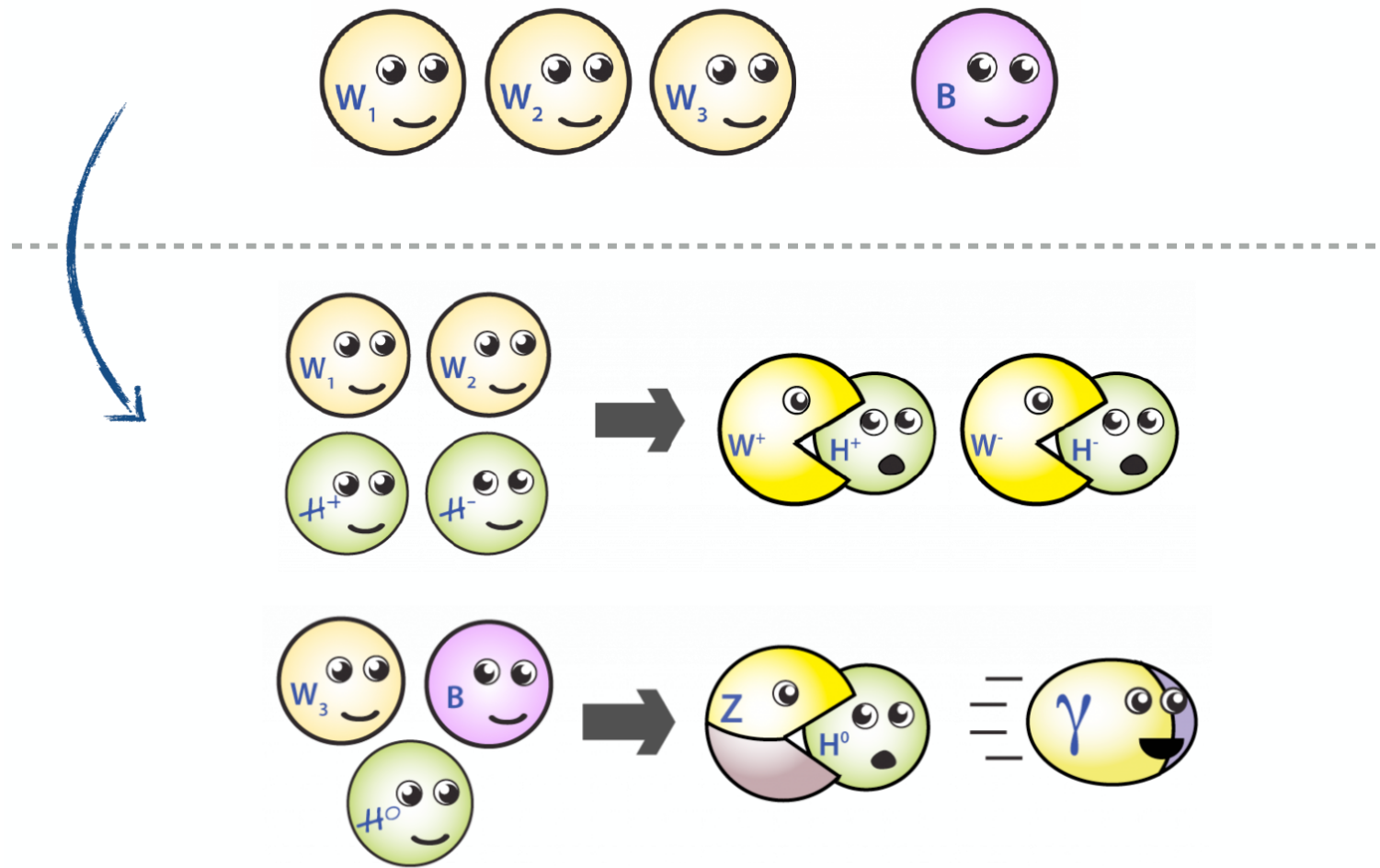
François Englert
(b. 1932)

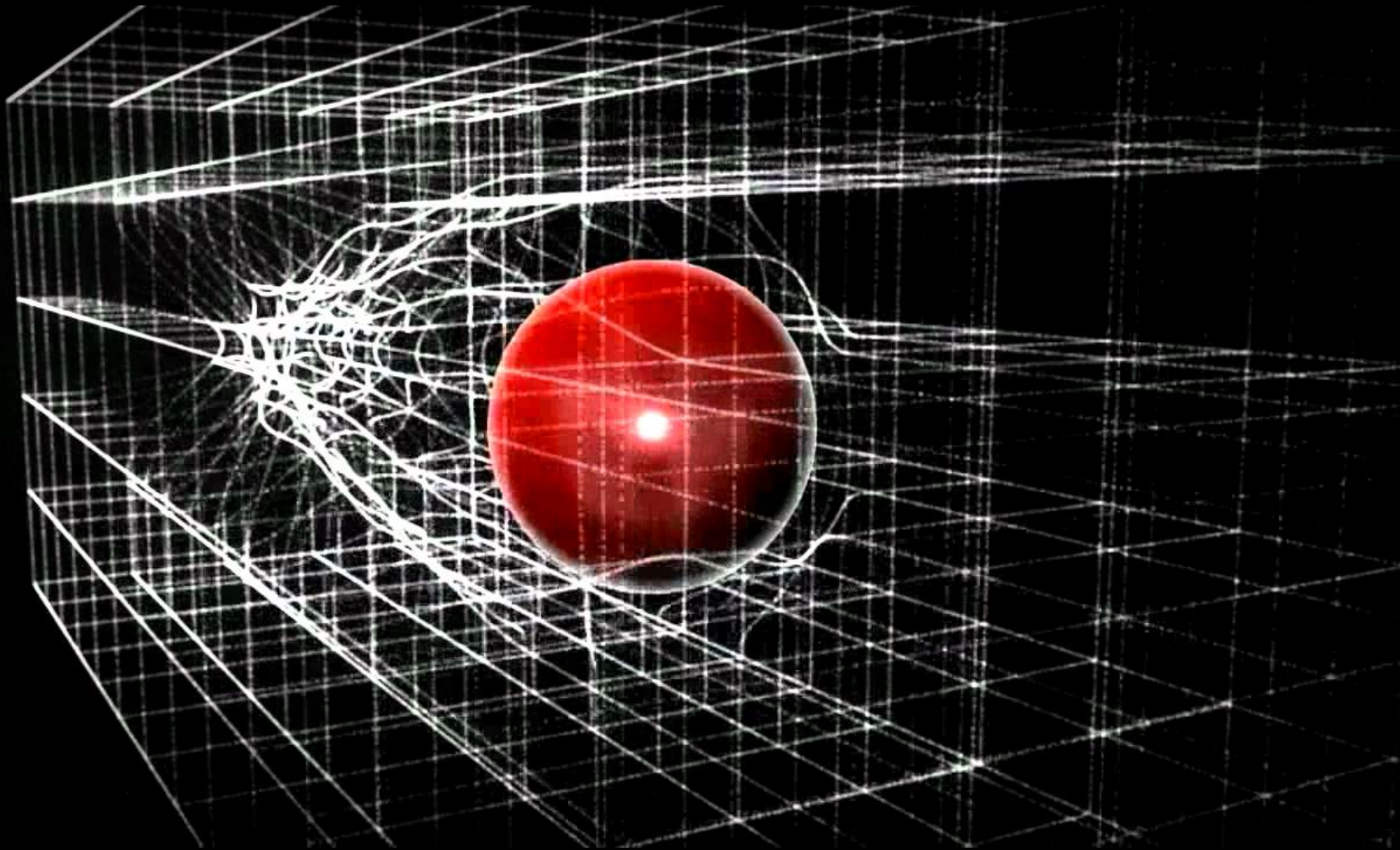




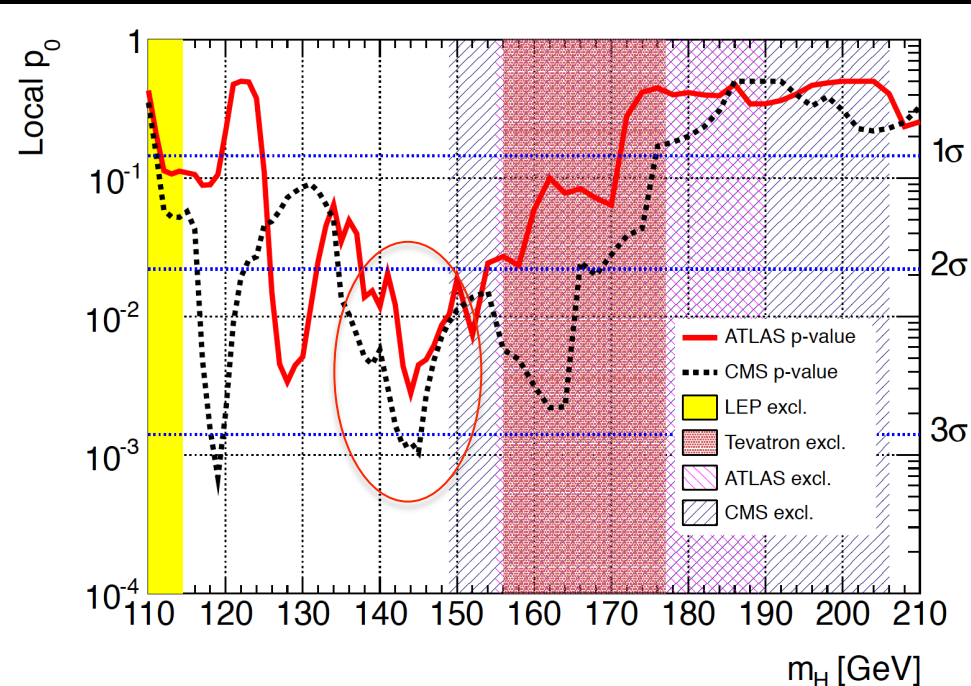
$$V(\phi) = \mu^2 \phi^\dagger \phi + \lambda (\phi^\dagger \phi)^2 \quad \phi = \begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \phi_1 + i\phi_2 \\ \phi_3 + i\phi_4 \end{pmatrix}$$





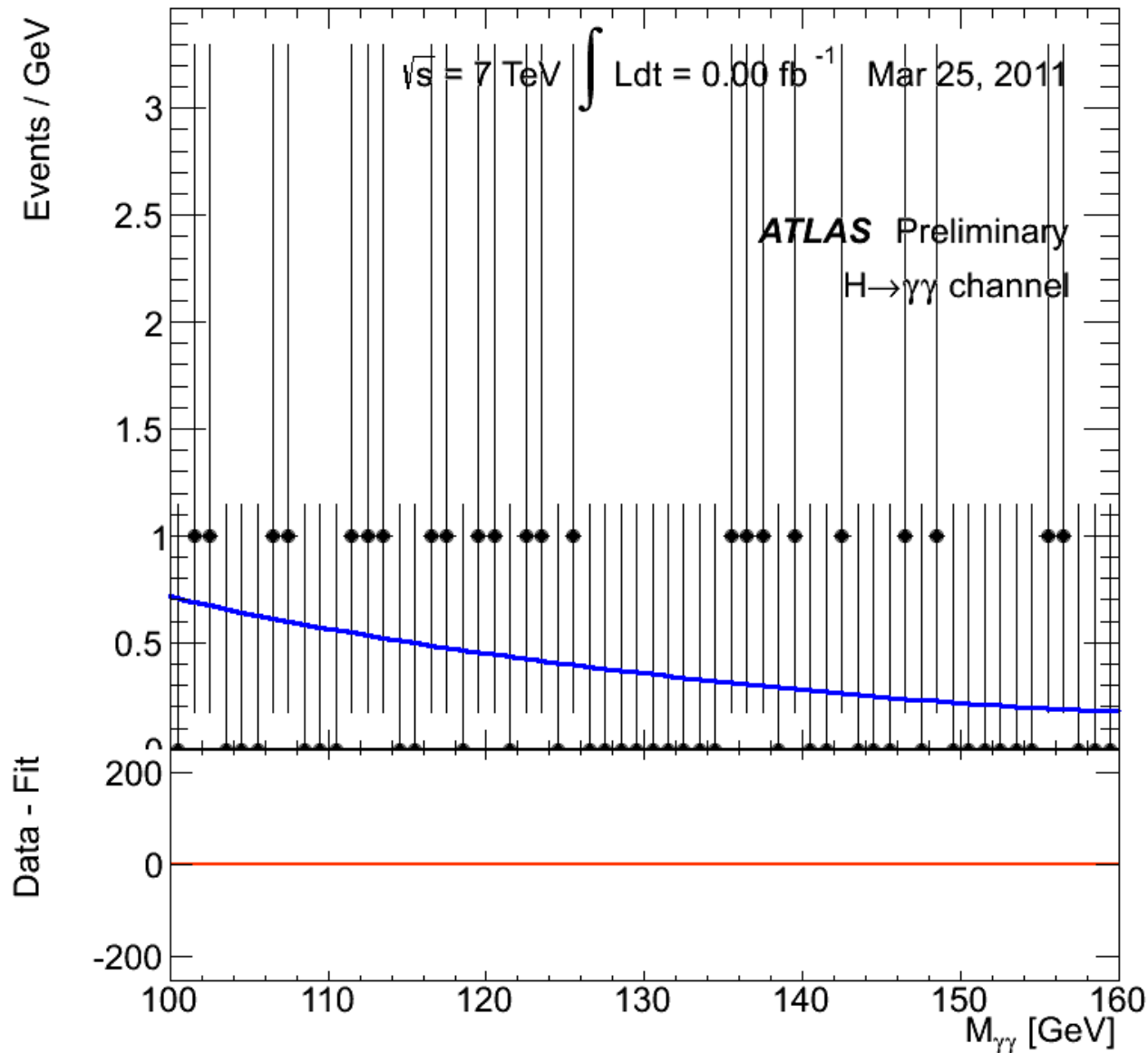


Nem sempre se acerta à primeira...



Conferência europeia de Física de
Partículas (EPS-HEP) 2011

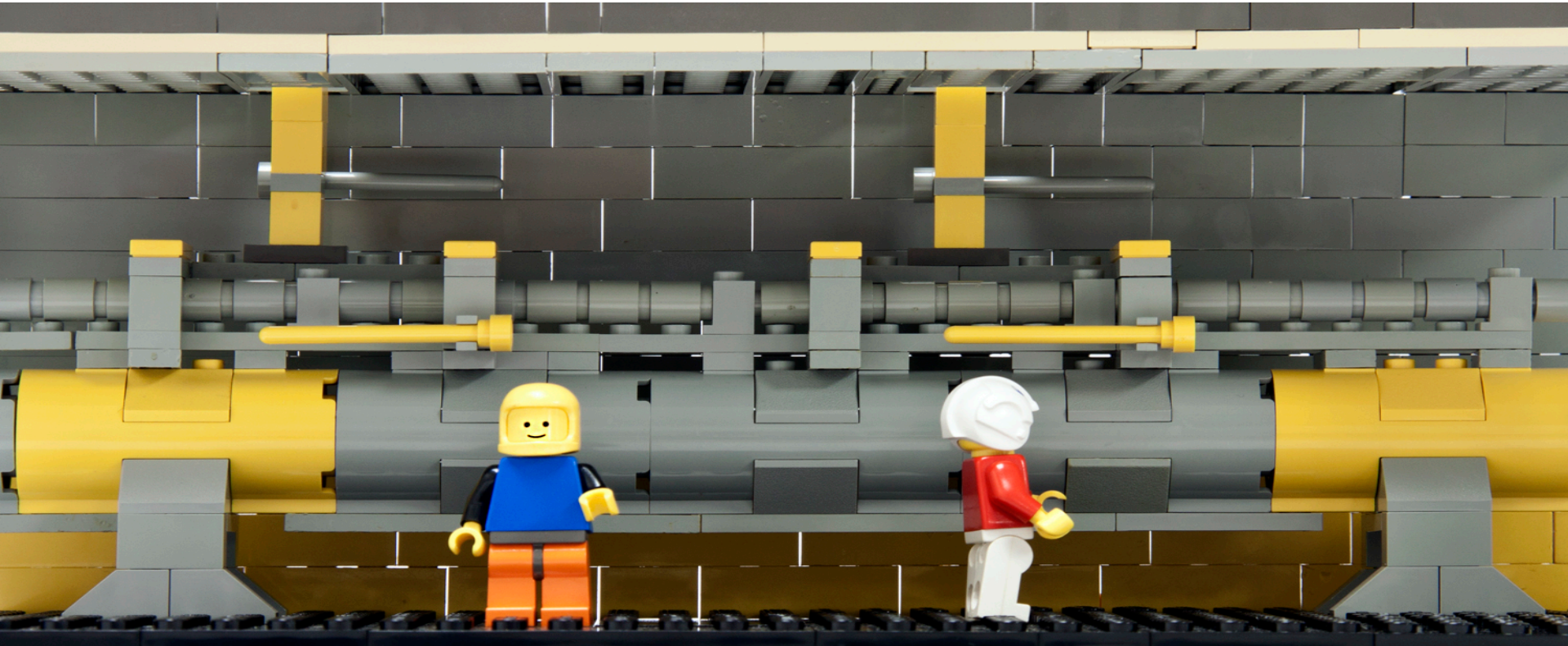
2012: Descoberta do bóson de Higgs: $H \rightarrow \gamma\gamma$



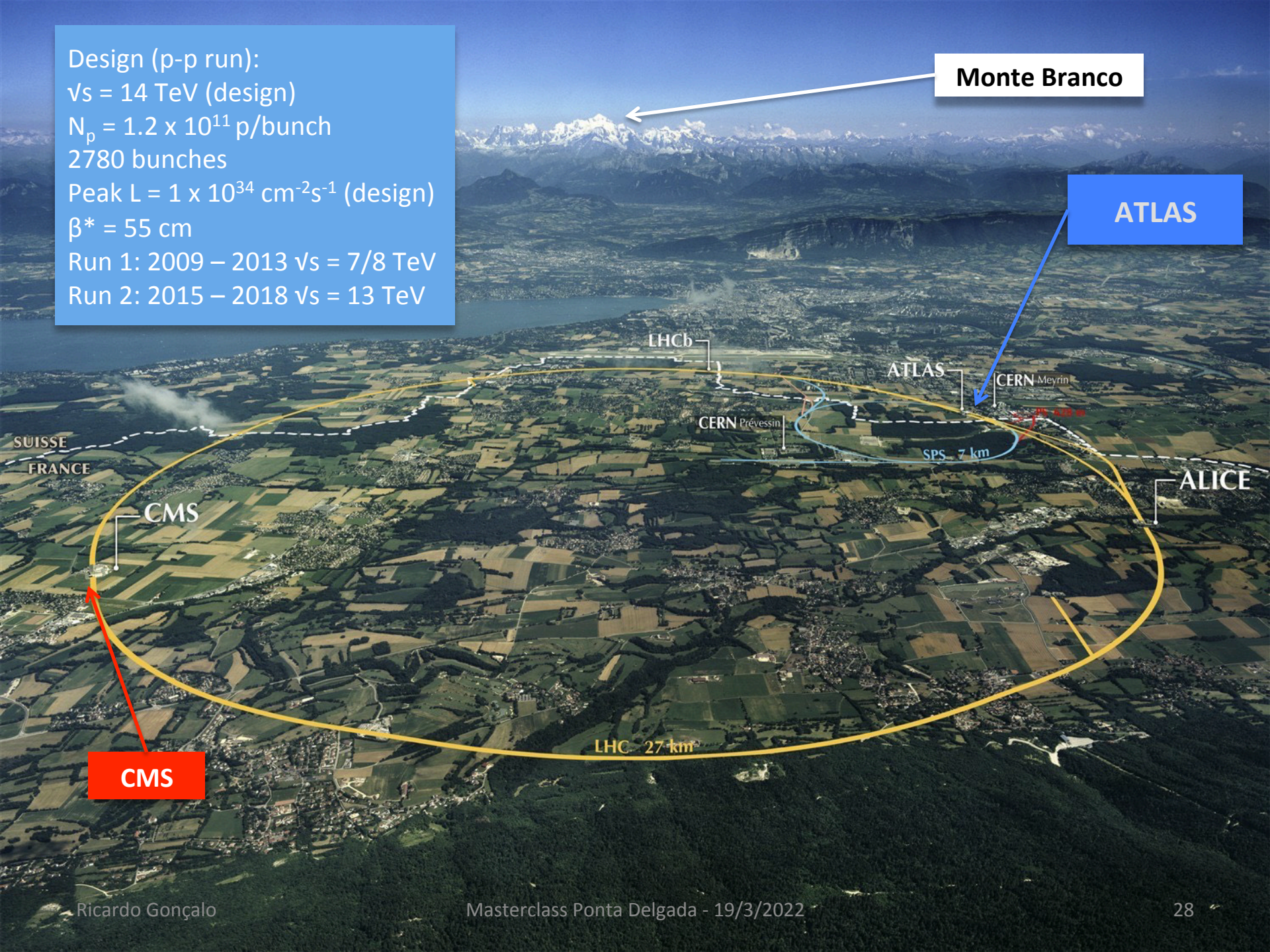
A Descoberta do bóson de Higgs



Experiências para ver o invisível



Design (p-p run):
 $\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}$ (design)
 $N_p = 1.2 \times 10^{11} \text{ p/bunch}$
2780 bunches
Peak $L = 1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ (design)
 $\beta^* = 55 \text{ cm}$
Run 1: 2009 – 2013 $\sqrt{s} = 7/8 \text{ TeV}$
Run 2: 2015 – 2018 $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$



Monte Branco

ATLAS

ALICE

CMS

LHCb

ATLAS

CERN Meyrin

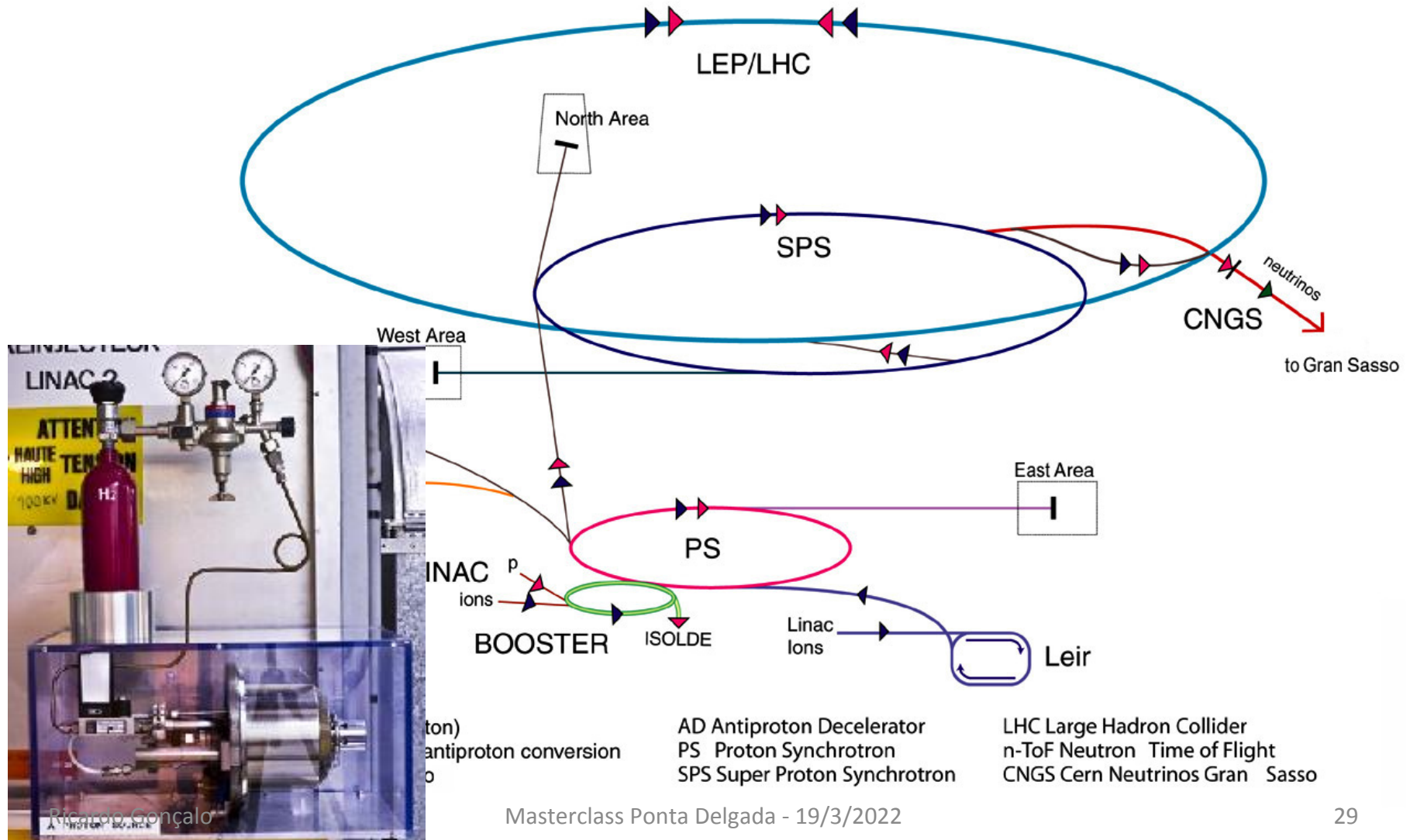
SPS 7 km

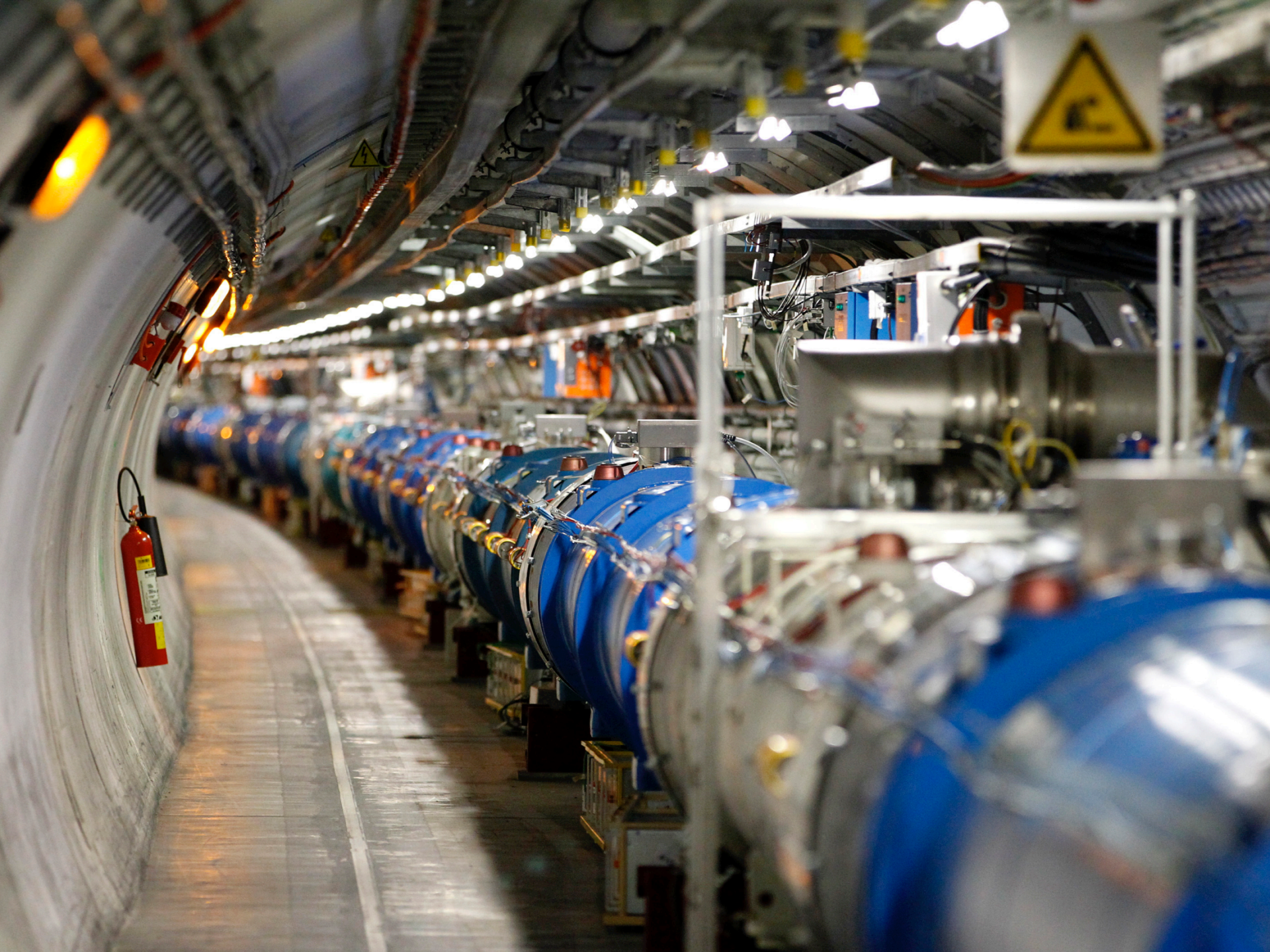
LHC 27 km

CERN Prévessin

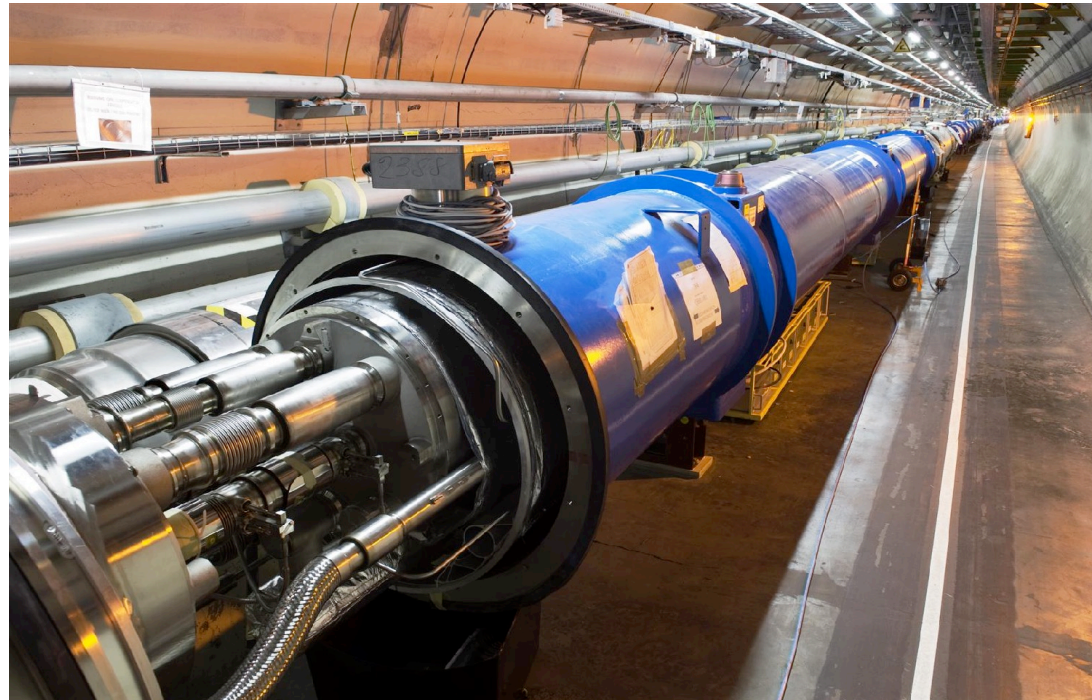
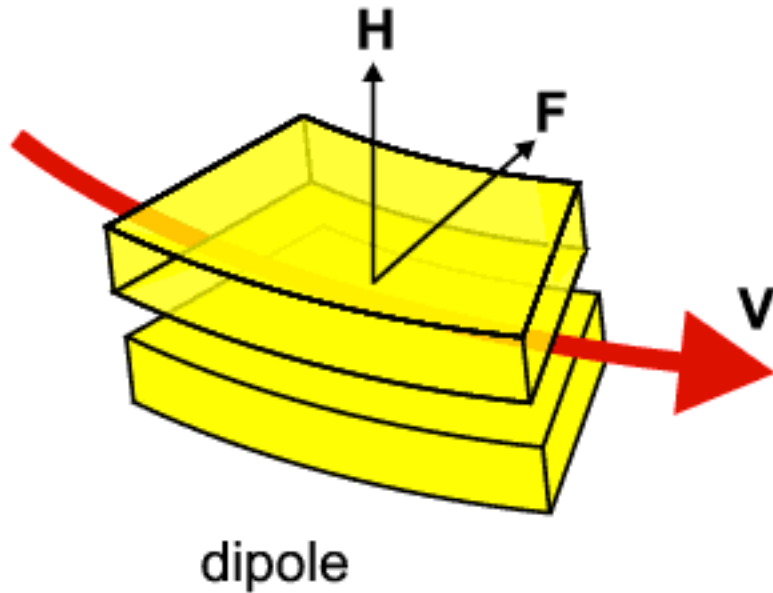
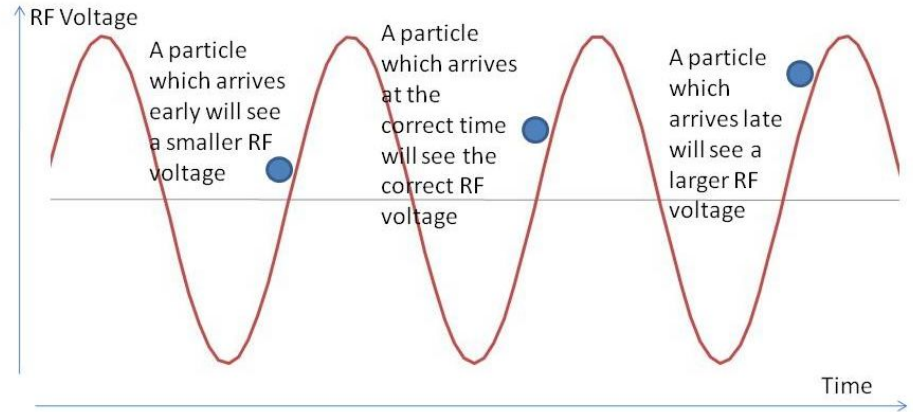
LINAC2 → **50 MeV**
Booster → **1.4 GeV**

Proton Synchrotron (PS) → **25 GeV**
Super Proton Synchrotron (SPS) → **450 GeV**
Large Hadron Collider (LHC) → **7 TeV**





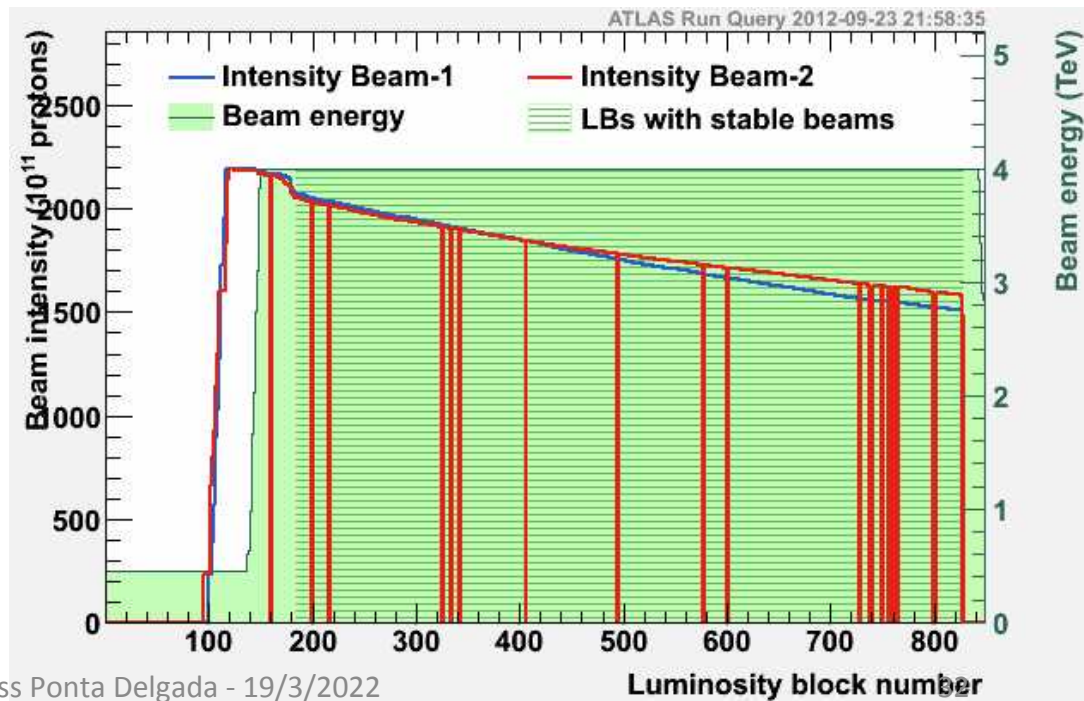
Beam acceleration



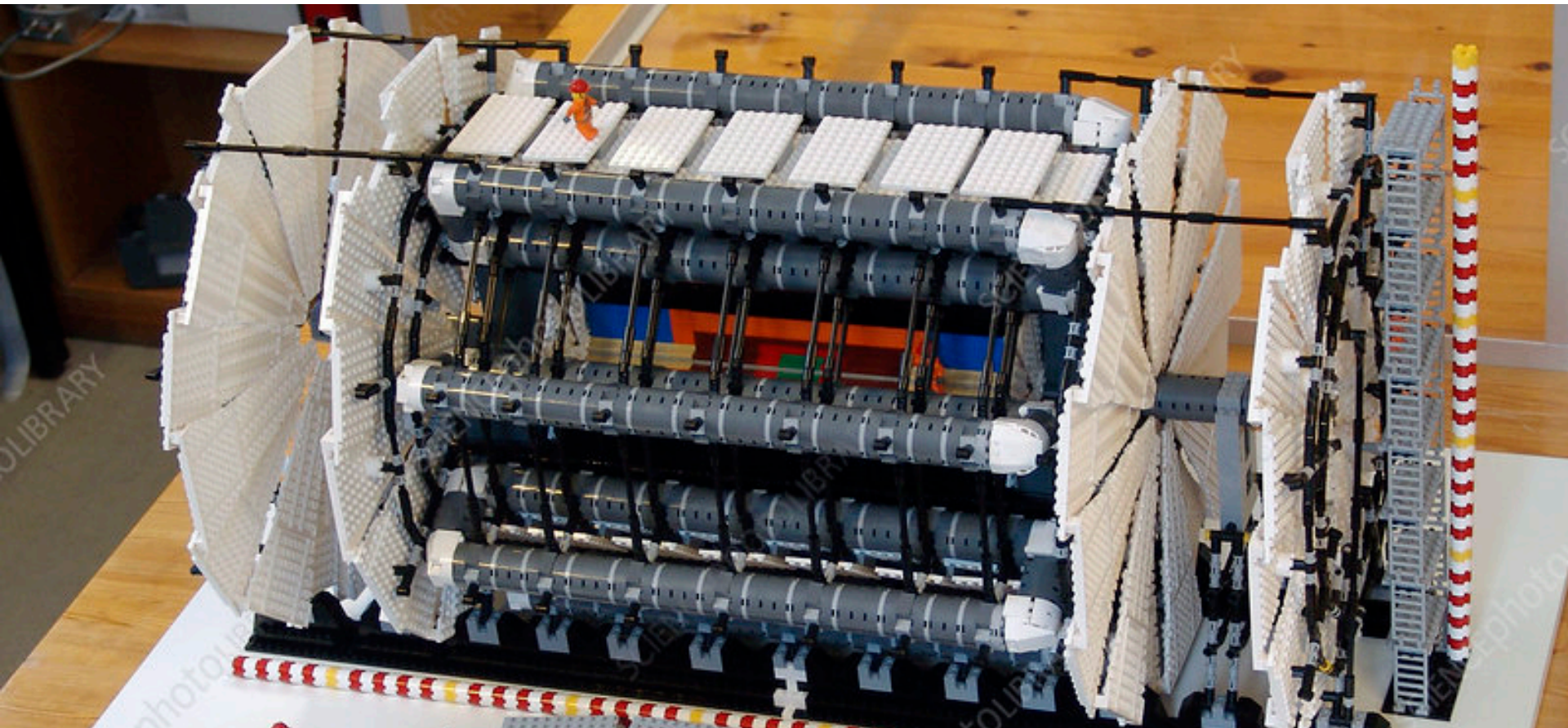


- Energia do feixe:
- 2802 bunches de 1.15×10^{11} prótons
- $7\text{TeV} / \text{próton (2015)} = 7 \times 10^{12} \times 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$
- Dá 362 MJ por feixe...
- Igual à energia cinética de um porta-aviões de 20,000t a viajar a 11,7 nós (21.7 km/h)

- Tudo contido num feixe de $\approx 16\mu\text{m}$
- Runs típicos duram cerca de 8 horas
- Intensidade diminui devido a perdas
- Depois voltamos a injectar novos feixes



A EXPERIÊNCIA ATLAS



Muon Spectrometer: $|\eta| < 2.7$

Air-core toroids and gas-based muon chambers
 $\sigma/p_T = 2\% @ 50\text{GeV}$ to $10\% @ 1\text{TeV}$ (ID+MS)

EM calorimeter: $|\eta| < 3.2$

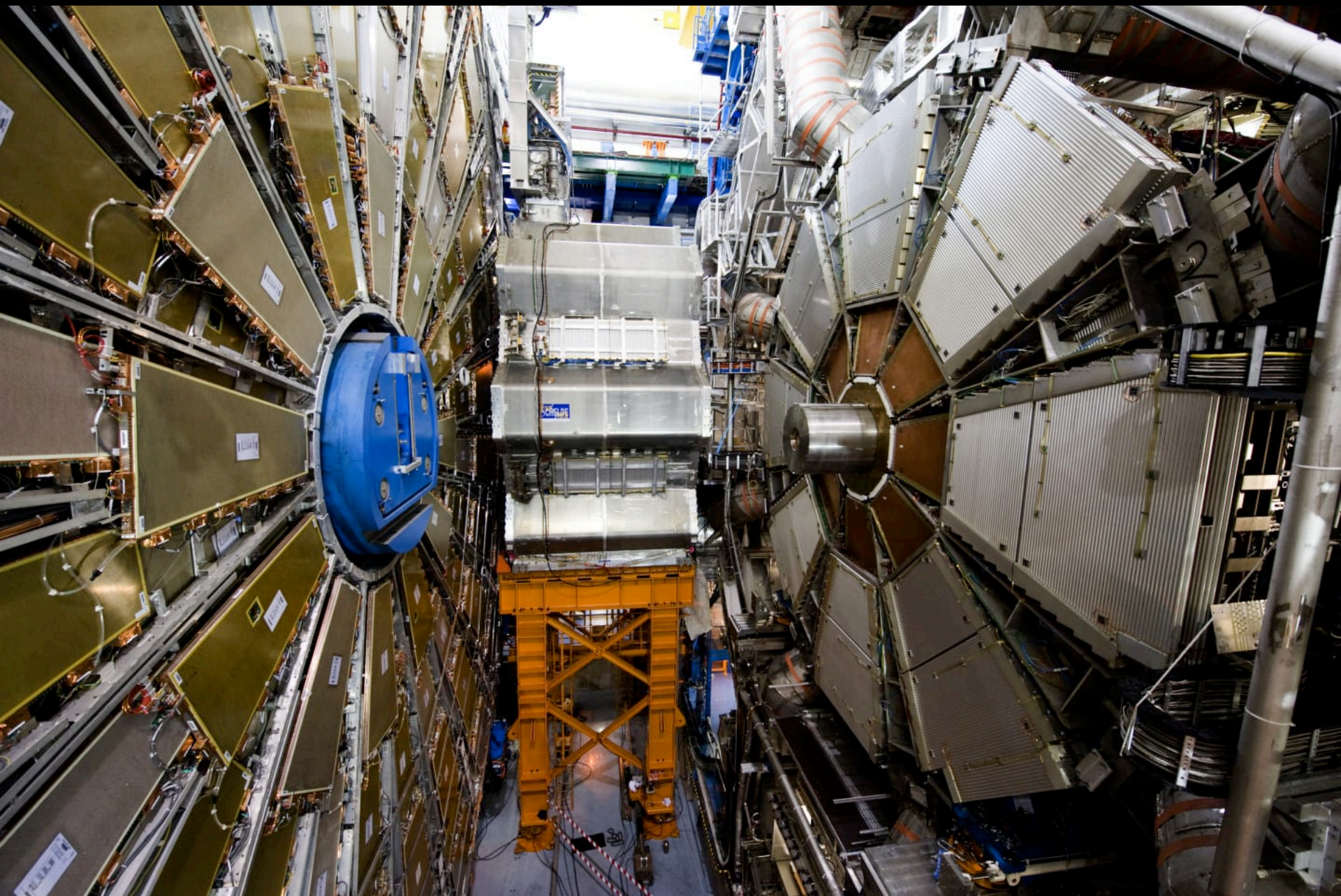
Pb-LAr Accordion
 $\sigma/E = 10\%/\sqrt{E} \oplus 0.7\%$

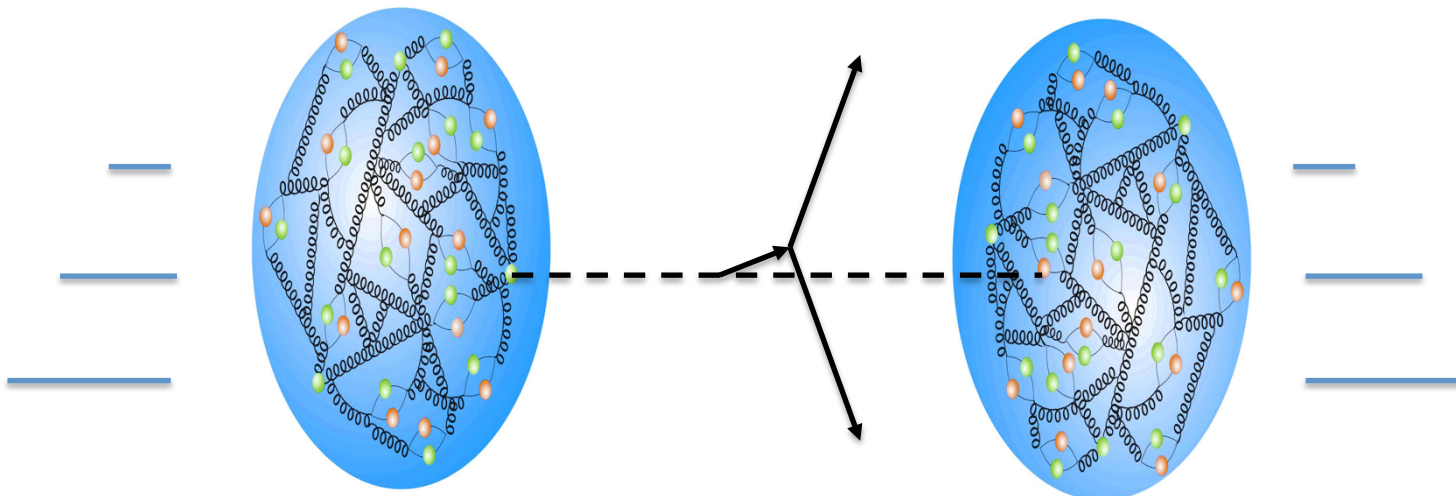
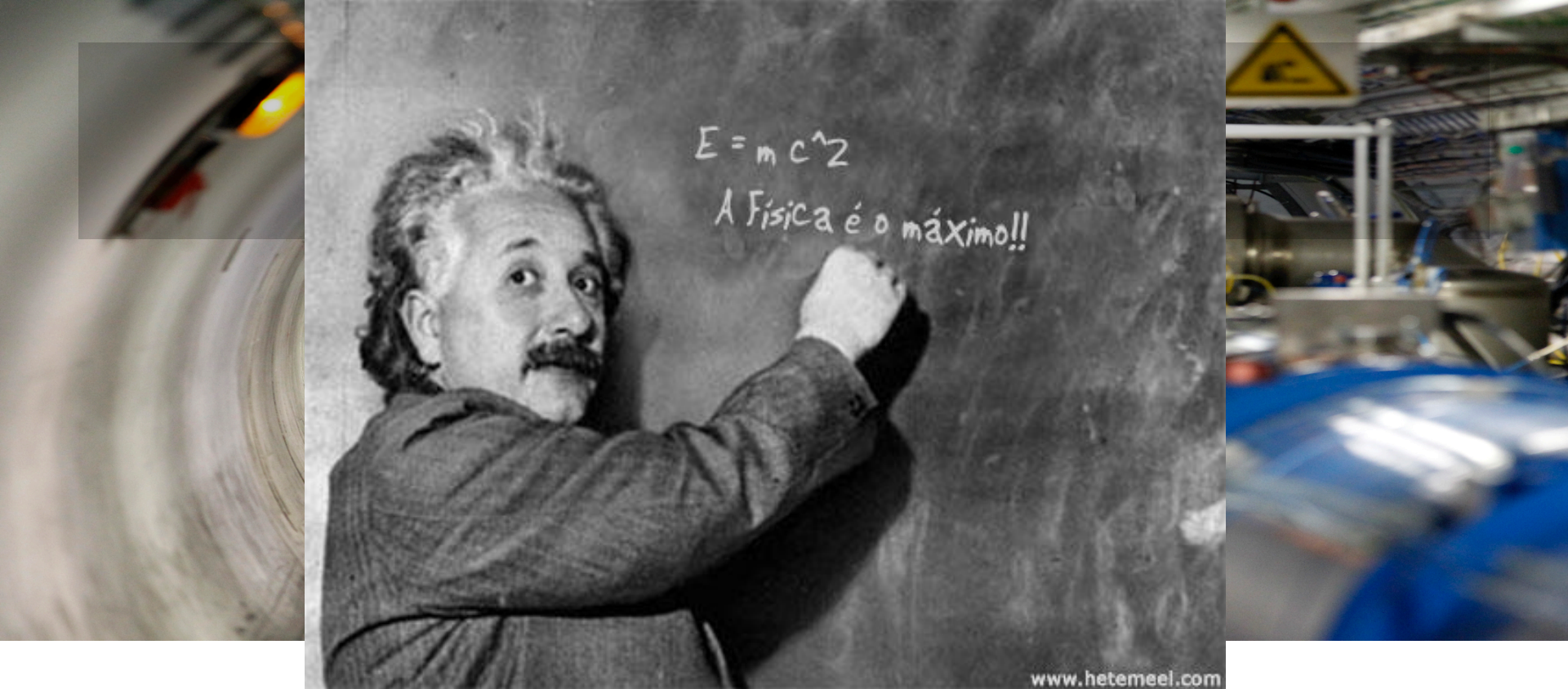
Hadronic calorimeter:

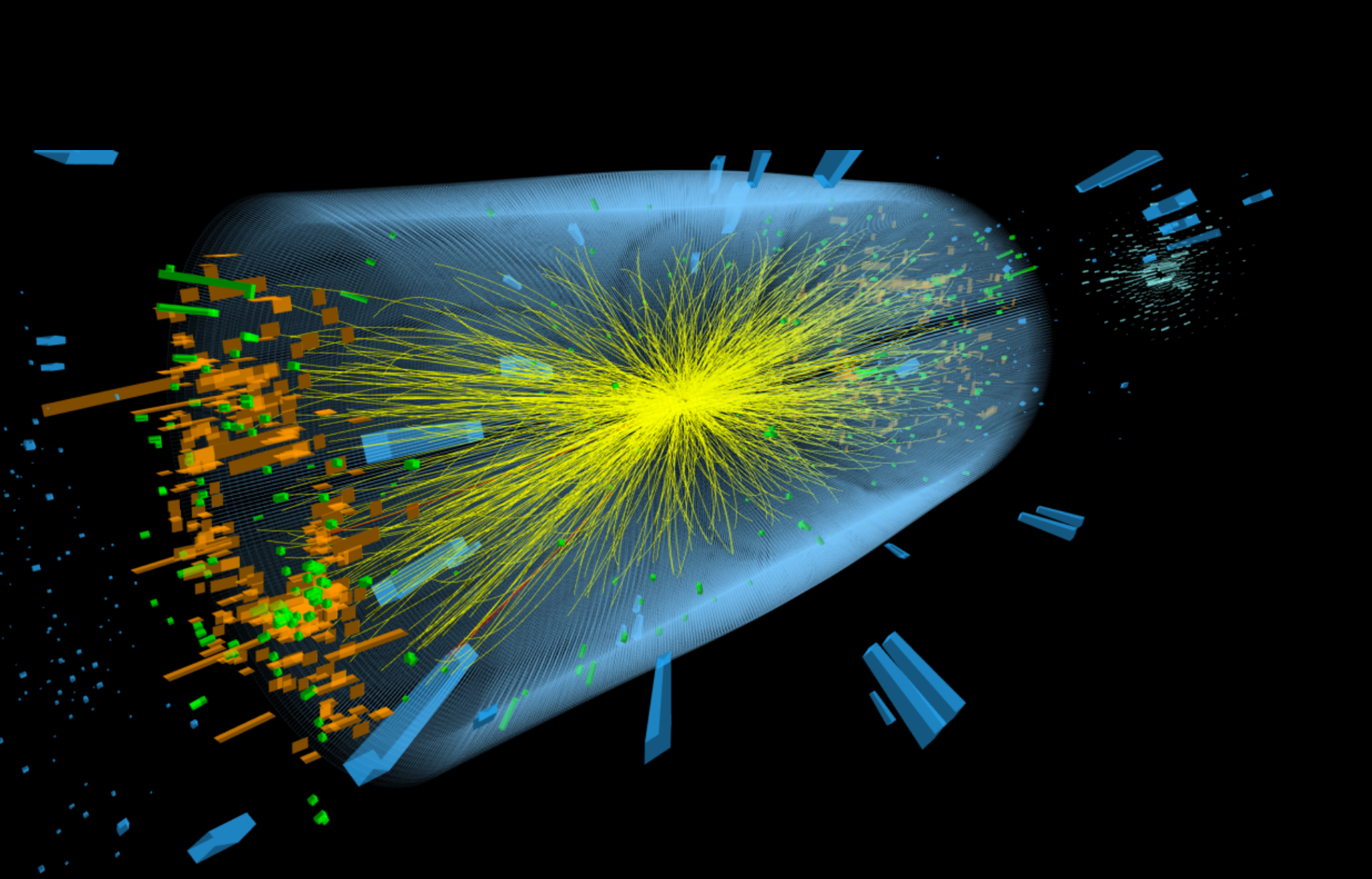
$|\eta| < 1.7$ Fe/scintillator
 $1.3 < |\eta| < 4.9$ Cu/W-Lar
 $\sigma/E_{\text{jet}} = 50\%/\sqrt{E} \oplus 3\%$

Inner Tracker: $|\eta| < 2.5$, $B=2\text{T}$
Si pixels/strips and Trans. Rad. Det.
 $\sigma/p_T = 0.05\% p_T (\text{GeV}) \oplus 1\%$

- $L = 44 \text{ m}$, $\varnothing \approx 25 \text{ m}$
- 7000 tonnes
- $\approx 10^8$ electronic channels
- 3-level trigger reducing 40 MHz collision rate to 200 Hz of events to tape





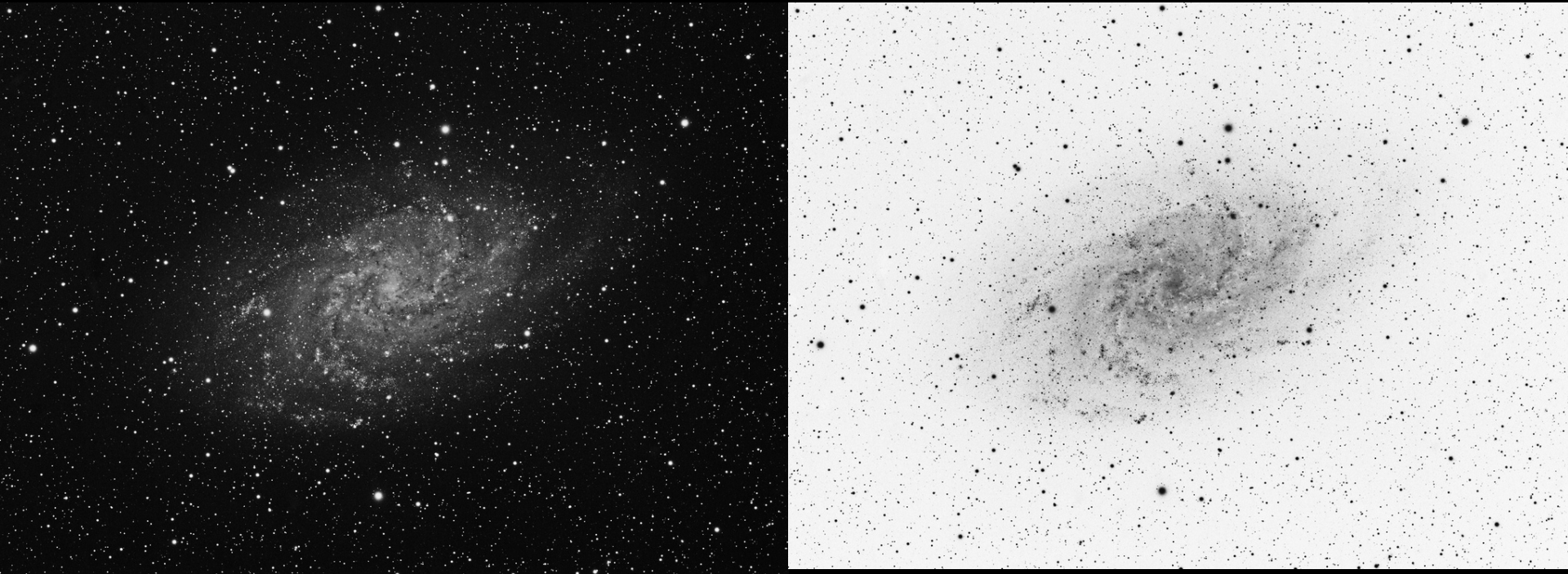


O que (ainda) não sabemos

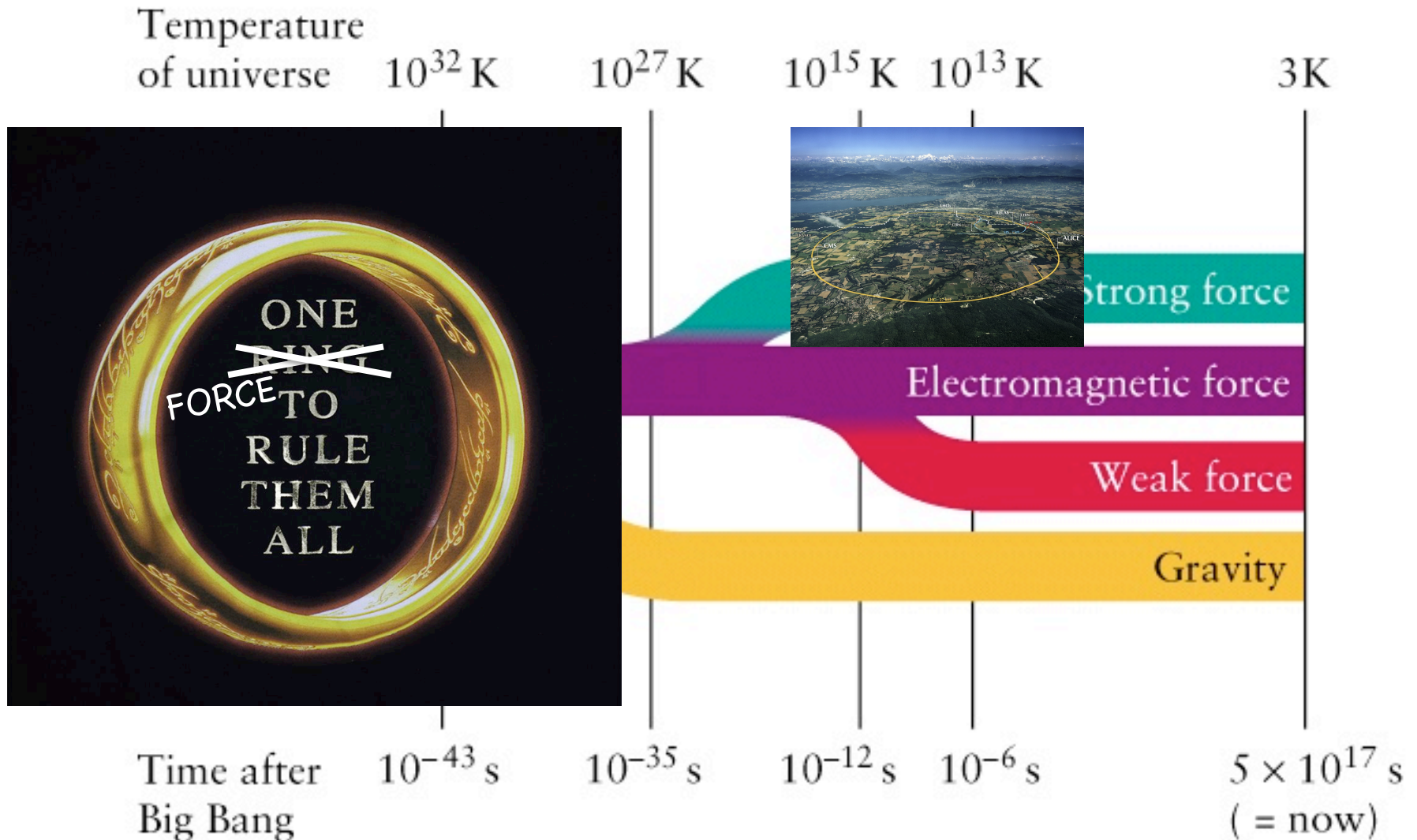


“Há mais coisas no
céu e na terra,
Horácio, do que sonha
a nossa filosofia??”

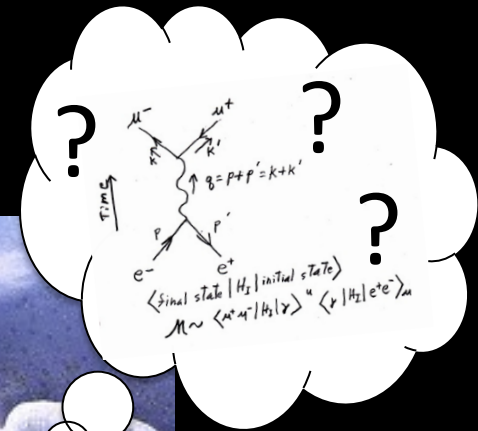
Para onde foi a antimatéria?



Uma força única?

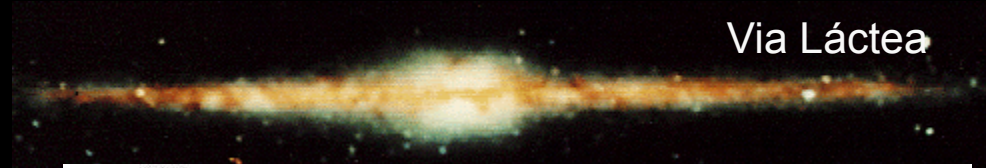


Perguntas que vieram do espaço

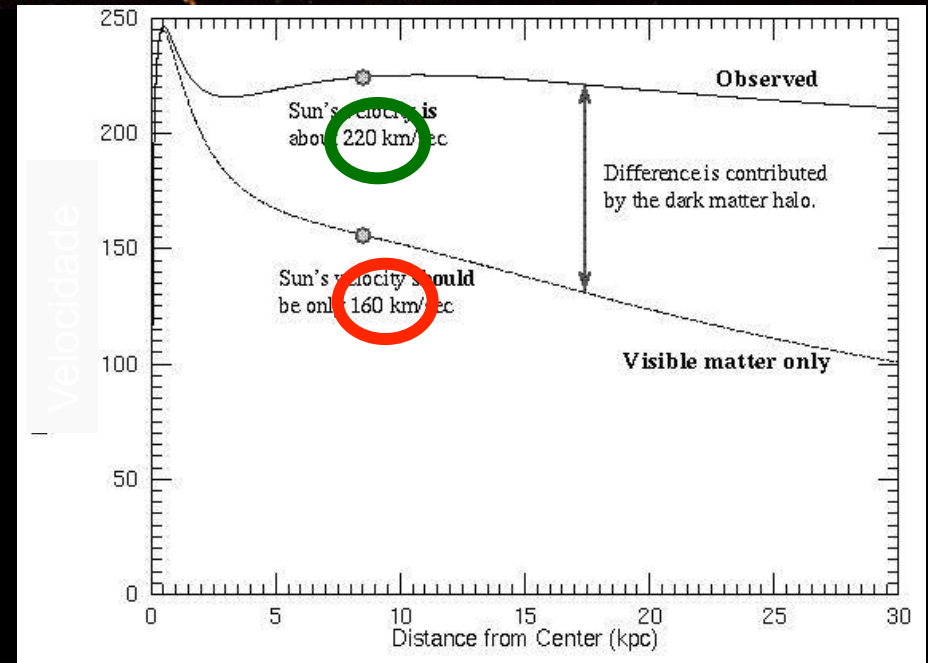


O Que é a Matéria Escura?

Você
está
aqui

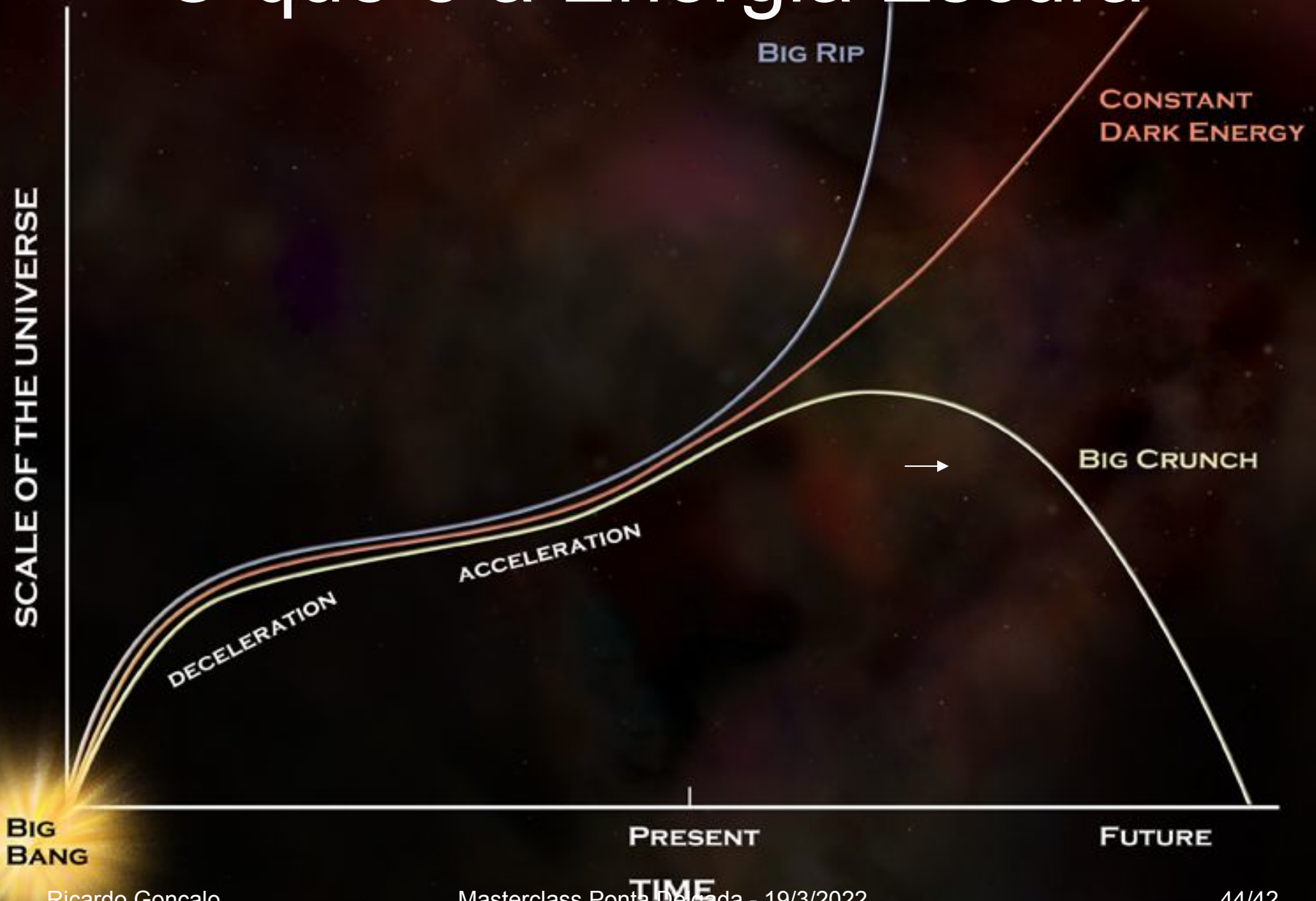


Via Láctea

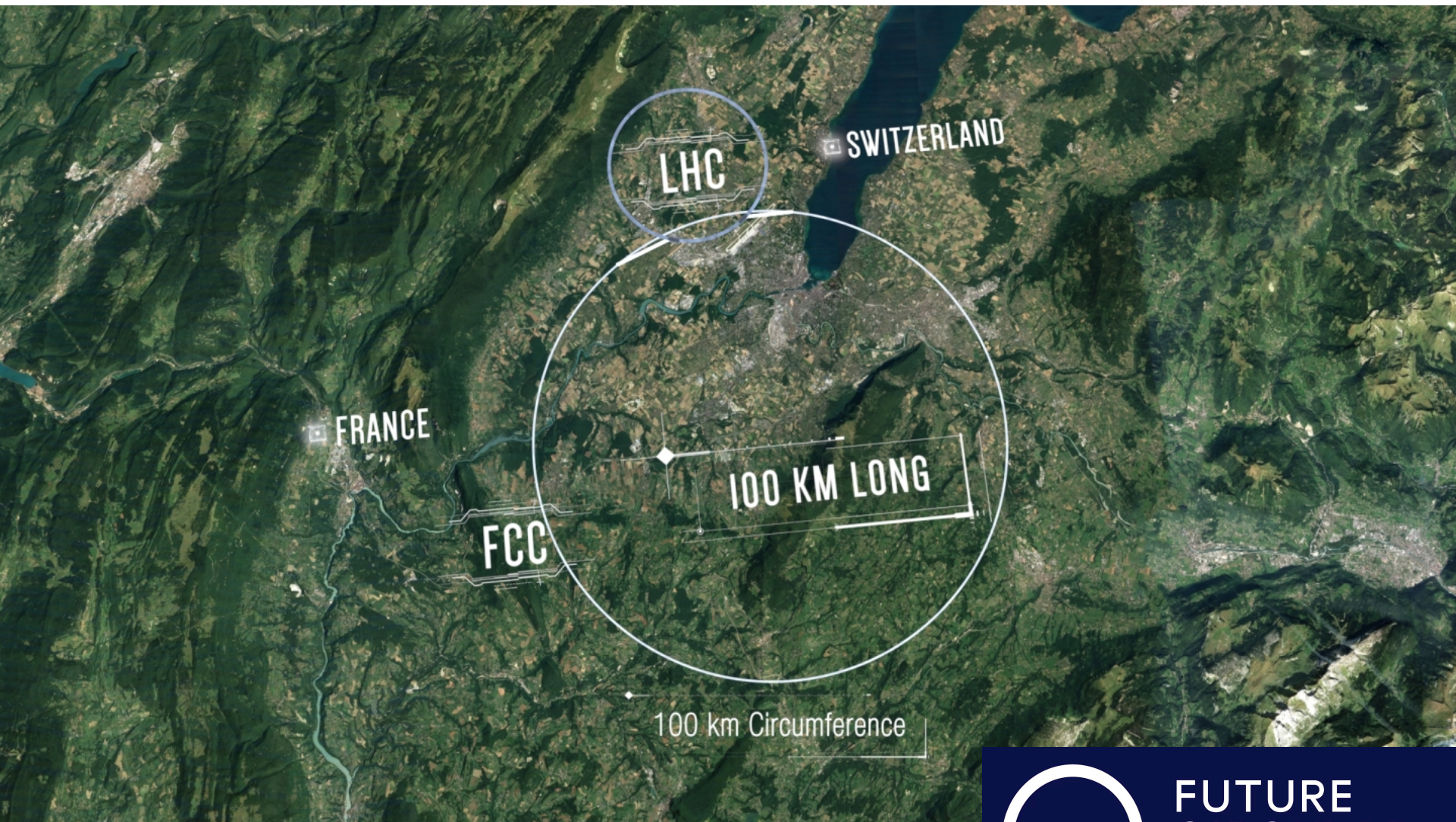


Nenhuma forma de matéria conhecida!

O que é a Energia Escura



O Future Circular Collider - FCC

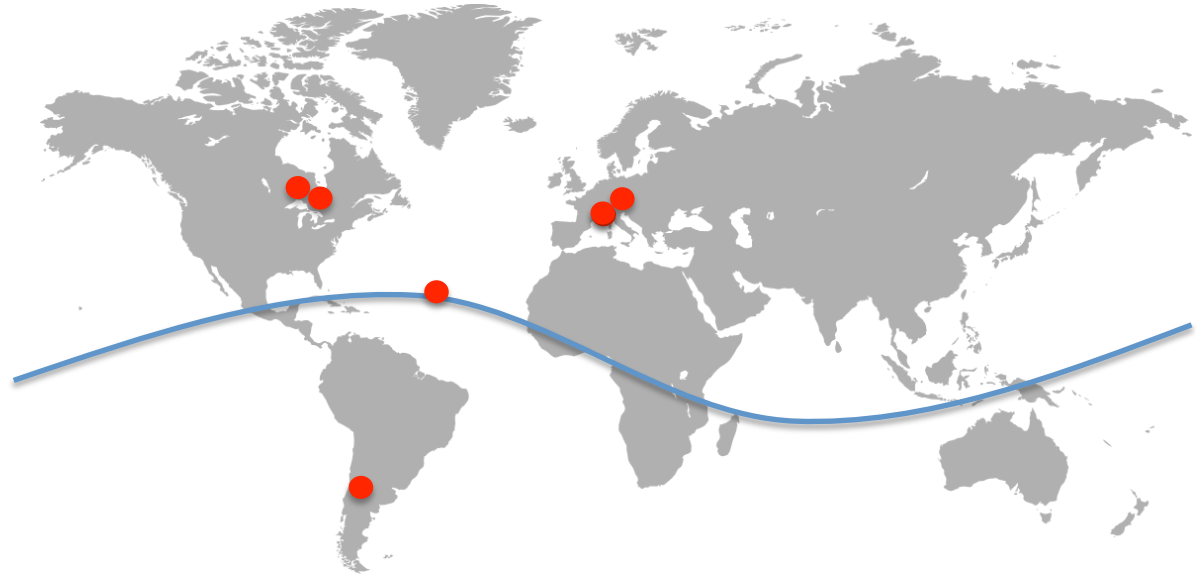


FUTURE
CIRCULAR
COLLIDER

Física (Experimental) de Partículas em Portugal

- Lisboa, Coimbra, Minho
- 200 membros
- 90 doutorados
- 75 estudantes
- 25 engenheiros e administrativos

www.lip.pt



Protões: as partículas na terapia do cancro

Ricardo Gonçalo
(Slides de Patrícia Gonçalves, IST)



LABORATÓRIO DE INSTRUMENTAÇÃO E FÍSICA EXPERIMENTAL DE
PARTÍCULAS

Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra



UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

O que é o cancro?

O cancro é um grupo de doenças em que existe uma proliferação anormal e descontrolada de células que tiveram origem numa célula “normal” que sofreu mutações dando origem a células que têm a capacidade de se continuar a multiplicar, alastrando-se a outros tecidos e órgãos para além daqueles a que pertencia a célula inicial.



Células cancerígenas indiferenciadas

Tratame nto do cancro



Radioterapia

Terapia do cancro utilizando **radiação ionizante**

Radiação é simplesmente a propagação de energia através do espaço

Radiação ionizante é radiação com a capacidade de ionizar a matéria

O transporte da energia através do espaço é feito através de **partículas carregadas ou neutras**.

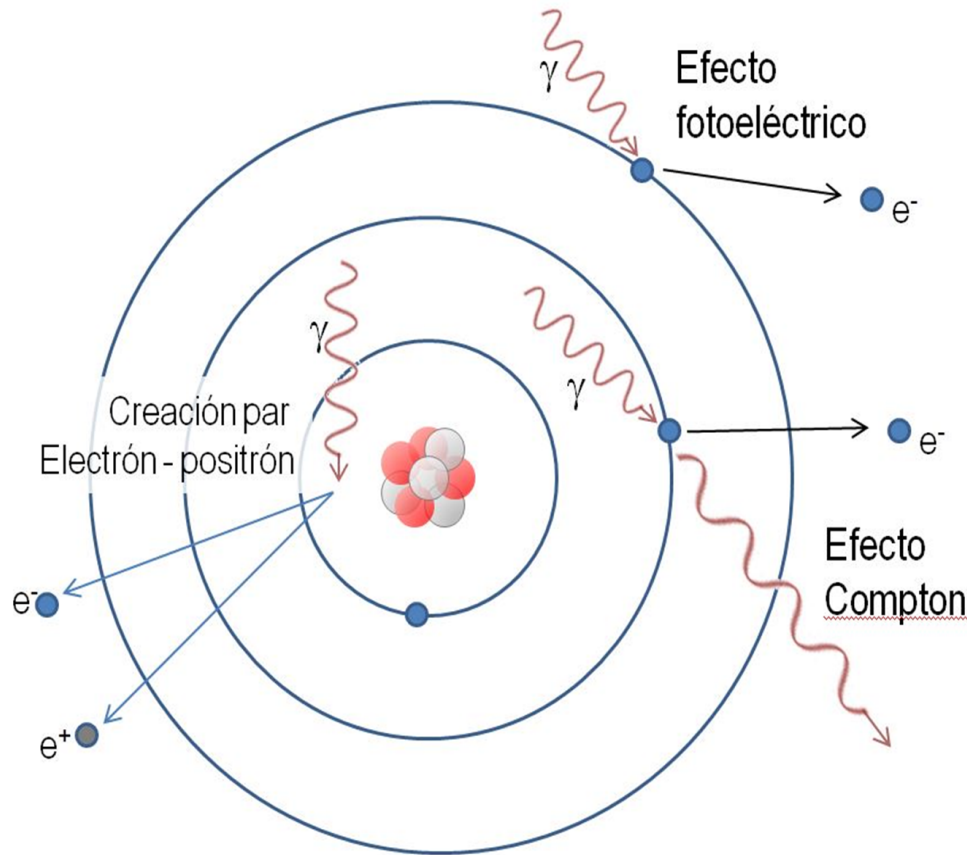
Designamos por **radiação ionizante** os **fótons energéticos** e as **partículas carregadas ou neutras** com energia cinética suficiente para ionizar átomos e moléculas.

Em radioterapia utilizam-se **fótons, eletrões, prótons** (e não só!)

Fotões, elétrões, protões

Como interagem com a matéria ?

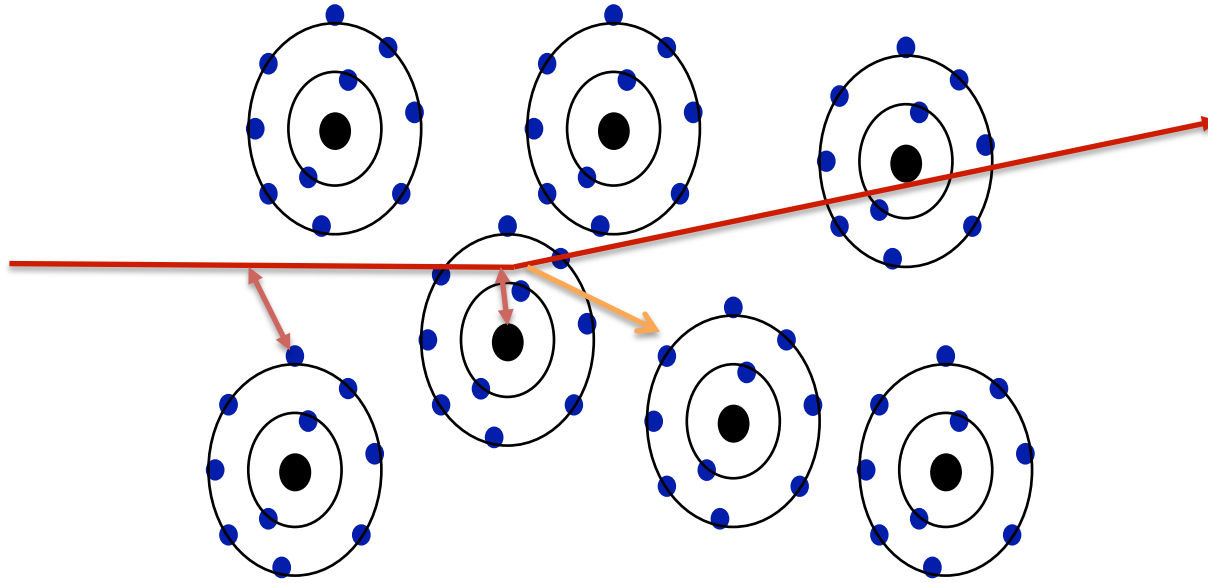
Fotões



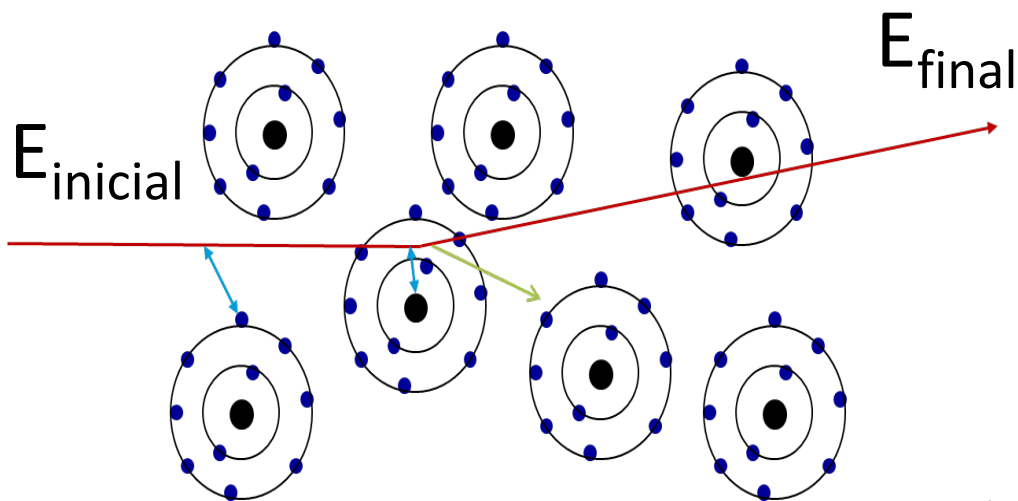
- Interagem por efeito fotoelétrico
- difusão de Compton
- criando pares eletrão-positrão

**- não “perdem energia”
diretamente: passam-na para
os eletrões e positrões criados**

Elétrões e prótons



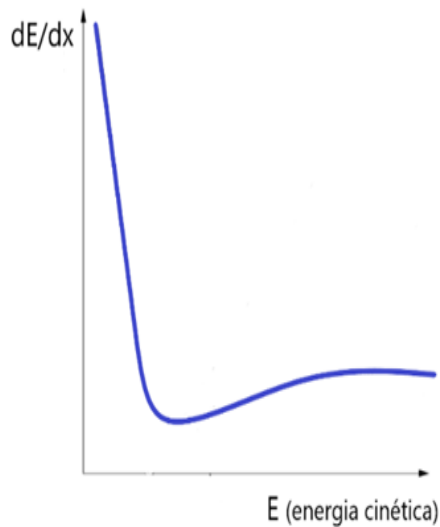
Vão perdendo a sua energia cinética através de interações com os elétrons atômicos
São partículas carregadas -> estas interações são eletromagnéticas – **interações de Coulomb**
Ou seja: **transferem a sua energia cinética para os elétrons do meio!**



$$E_{\text{final}} = E_{\text{inicial}} - \Delta E$$

ΔE : energia perdida / transferida para o meio

na terapia com partículas carregadas o meio é o tecido!!



Dose



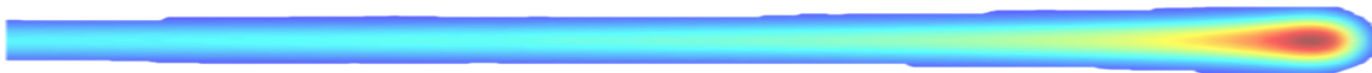
ΔE : energia perdida / transferida
para o meio

Energia depositada pela
radiação ionizante
num volume de interesse
dividida pela massa desse
volume

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm}$$

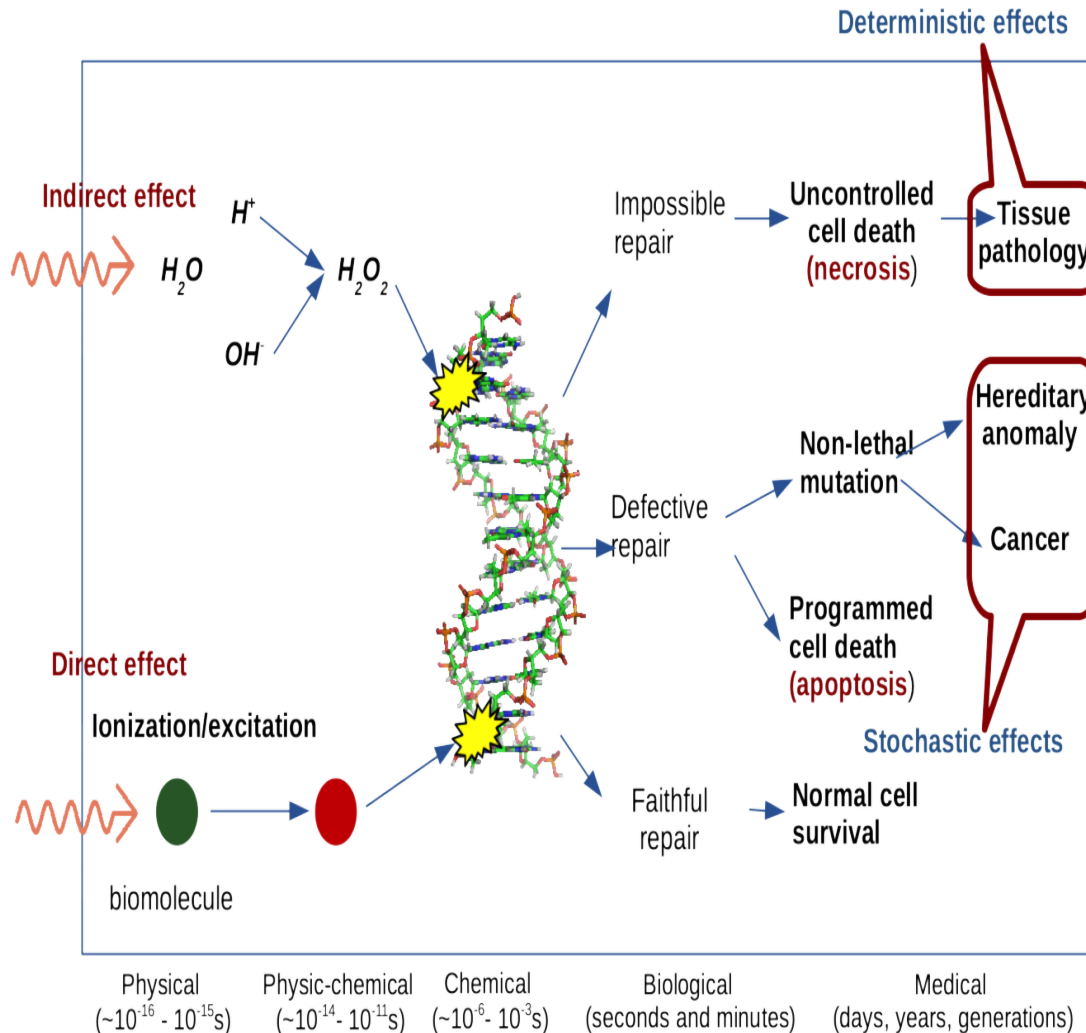
[J/kg= Gy (Gray)]

1 Gray corresponde à energia de 1 Joule depositada num kg de m



Qual é o efeito da radiação ionizante nos tecidos?

Efeitos biológicos da radiação



Voltando à radioterapia...

Radioterapia

Radioterapia com feixes externos

- LINACs

fotões e electrões

- Ciclotrões e sincrotrões

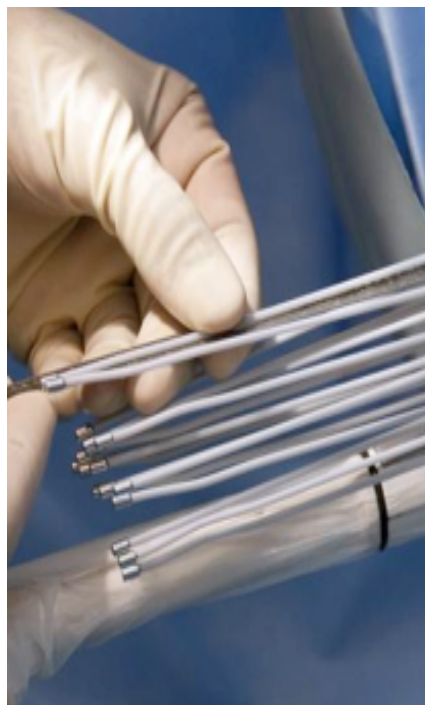
protões e iões de carbono



Radioterapia

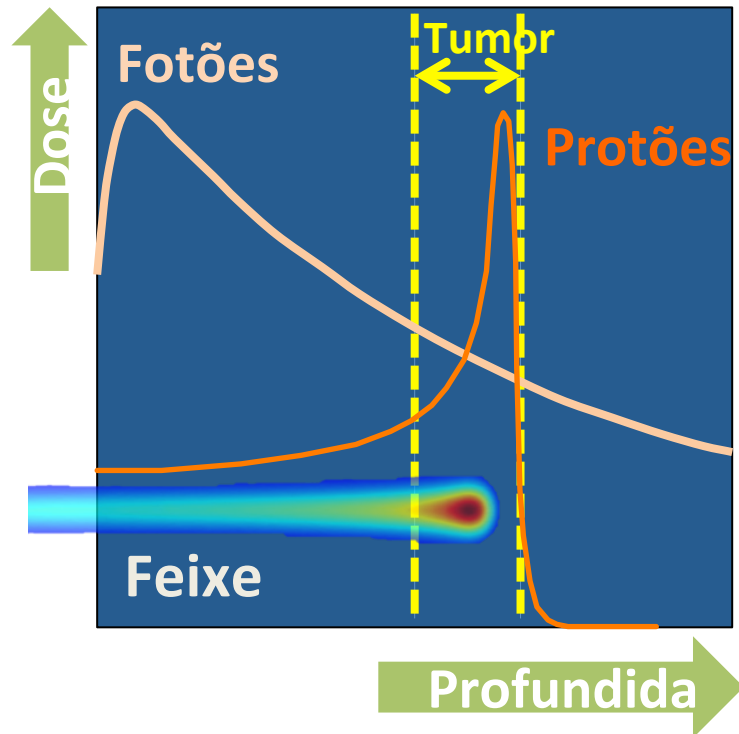
Radioterapia com fontes radioativas ou radioterapia interna

- **Braquiterapia:**
fotões e eletrões
emitidos por fontes radioativas colocadas junto ao tecido a tratar

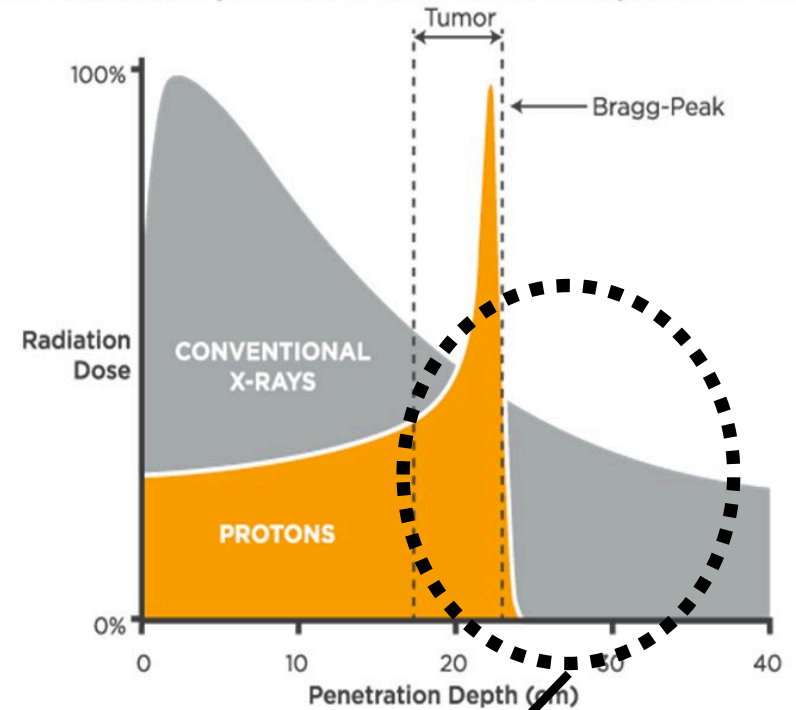


Porquê terapia com partículas carregadas?

Pico de Bragg



Particle vs photon beam dose penetration



**Dose de saída
„organ sparing region“**

A vantagem dos protões

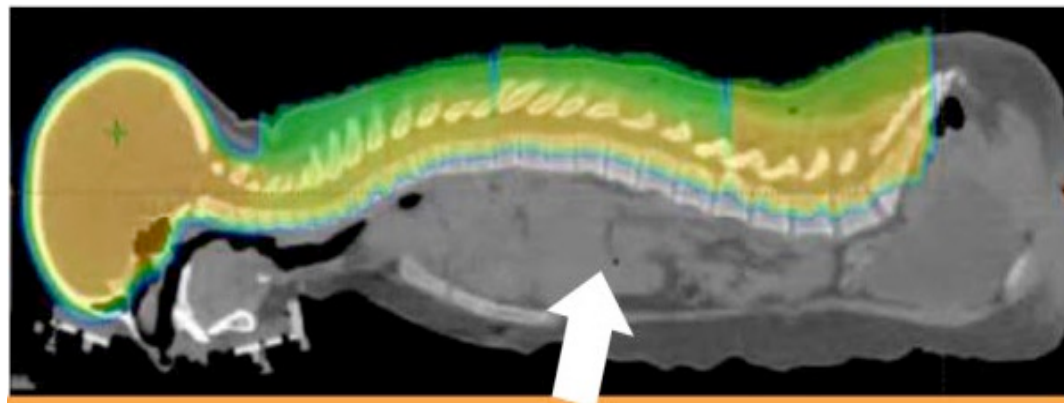
Os protões param!

A profundidade onde param depende da sua energia inicial

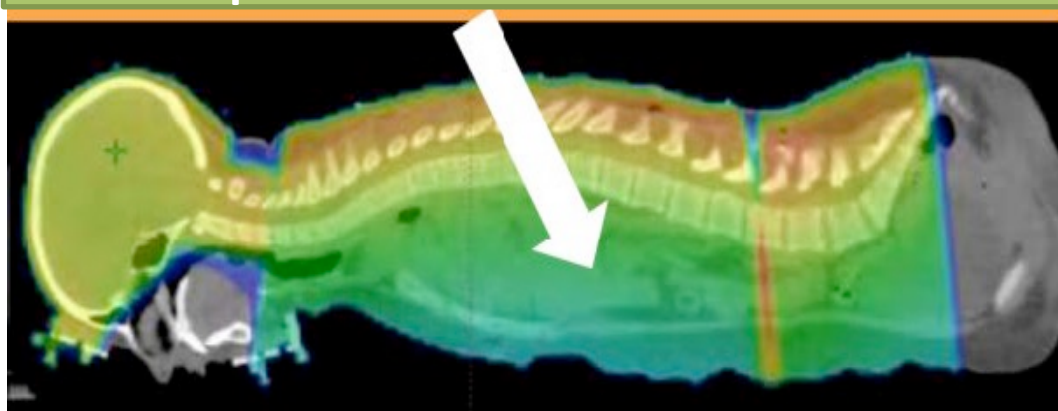
Os raios-x e gama não param!

Continuam a atravessar os tecidos normais para além dos tecidos a tratar

Protões

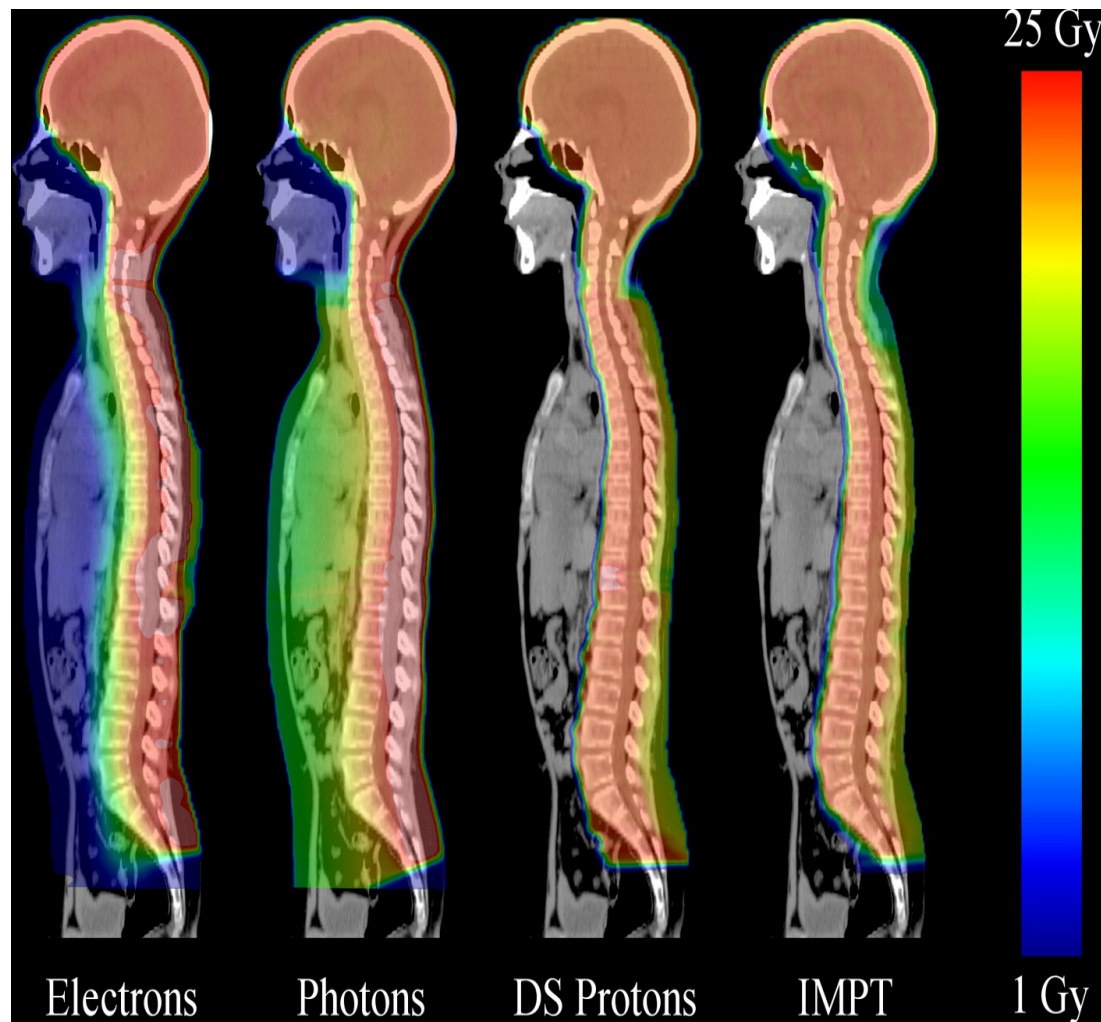


A utilização de protões evita irradiação desnecessária do coração, pulmões e intestinos que acontece no caso da radioterapia com raios-x

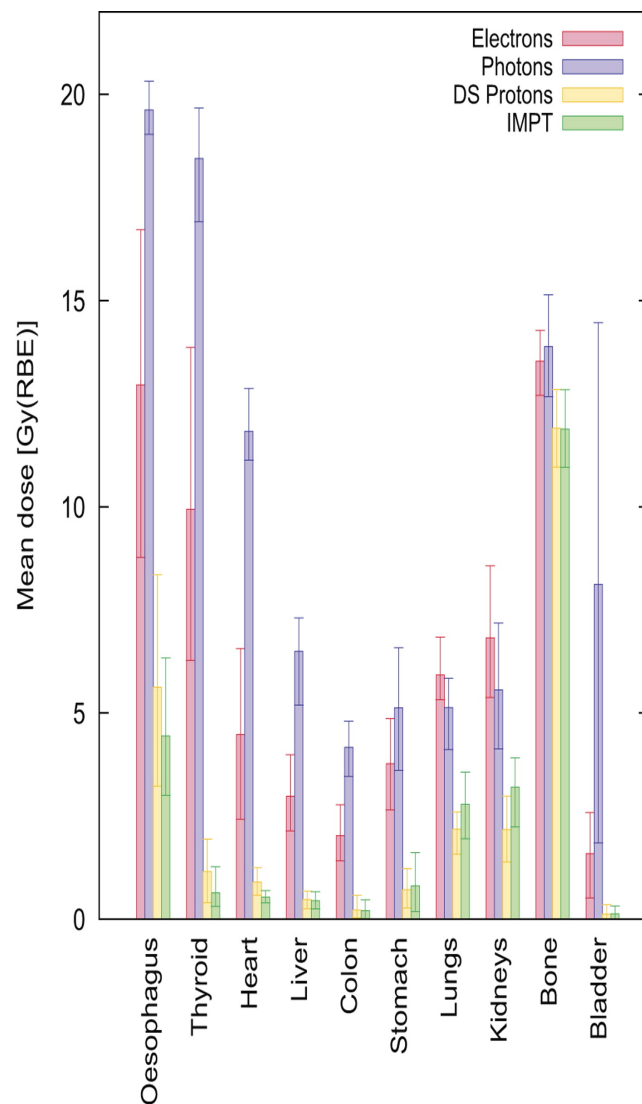


Fotões (raios-x / gama)

Radioterapia do eixo cranioespinal – Eletrões, fotões & prótons



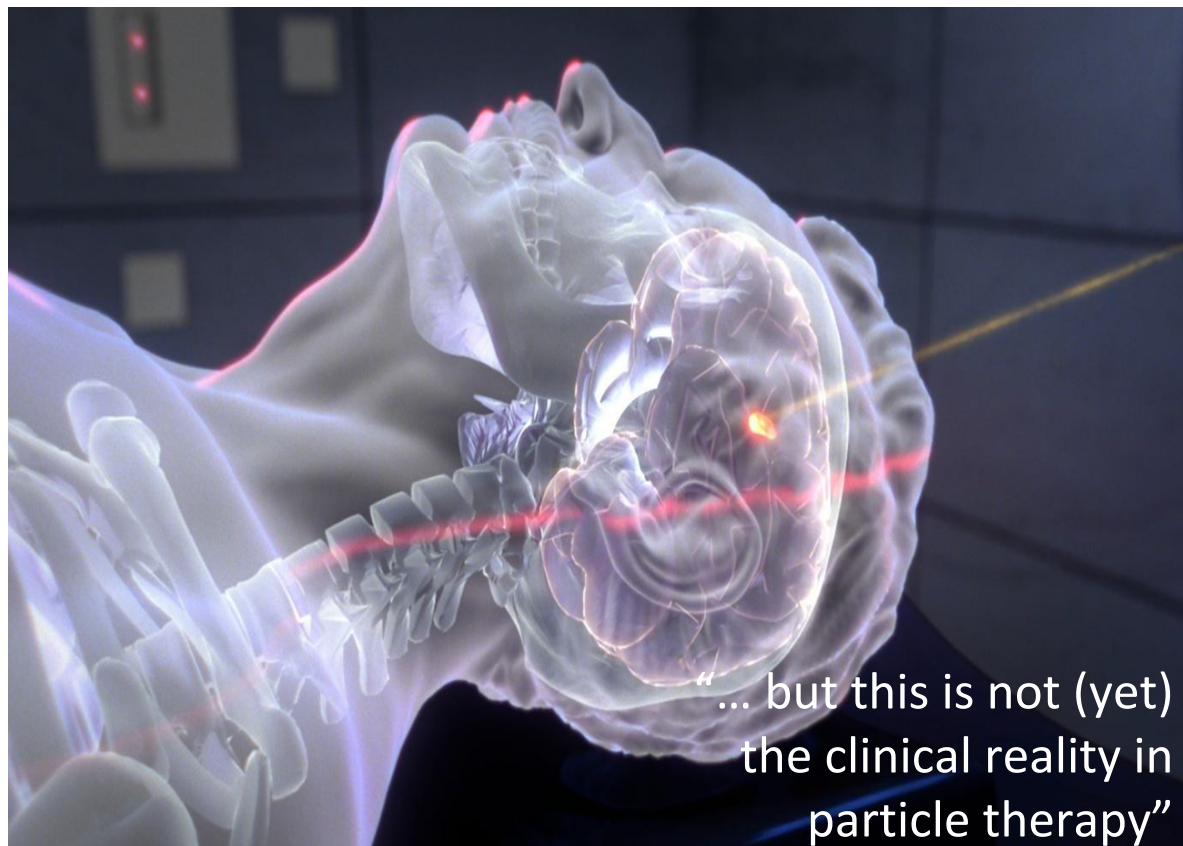
Stokkevåg et al., (2014) *Acta Oncol.* 53:8 1051-2



DS : Double Scattering
IMPT: : intensity modulated
proton therapy

Porquê terapia com partículas carregadas?

Os prótons podem reduzir significativamente os efeitos secundários no tratamento do cancro e potencialmente aumentar as doses fornecidas aos tumores, através de **fornecimento ultrapreciso da dose**

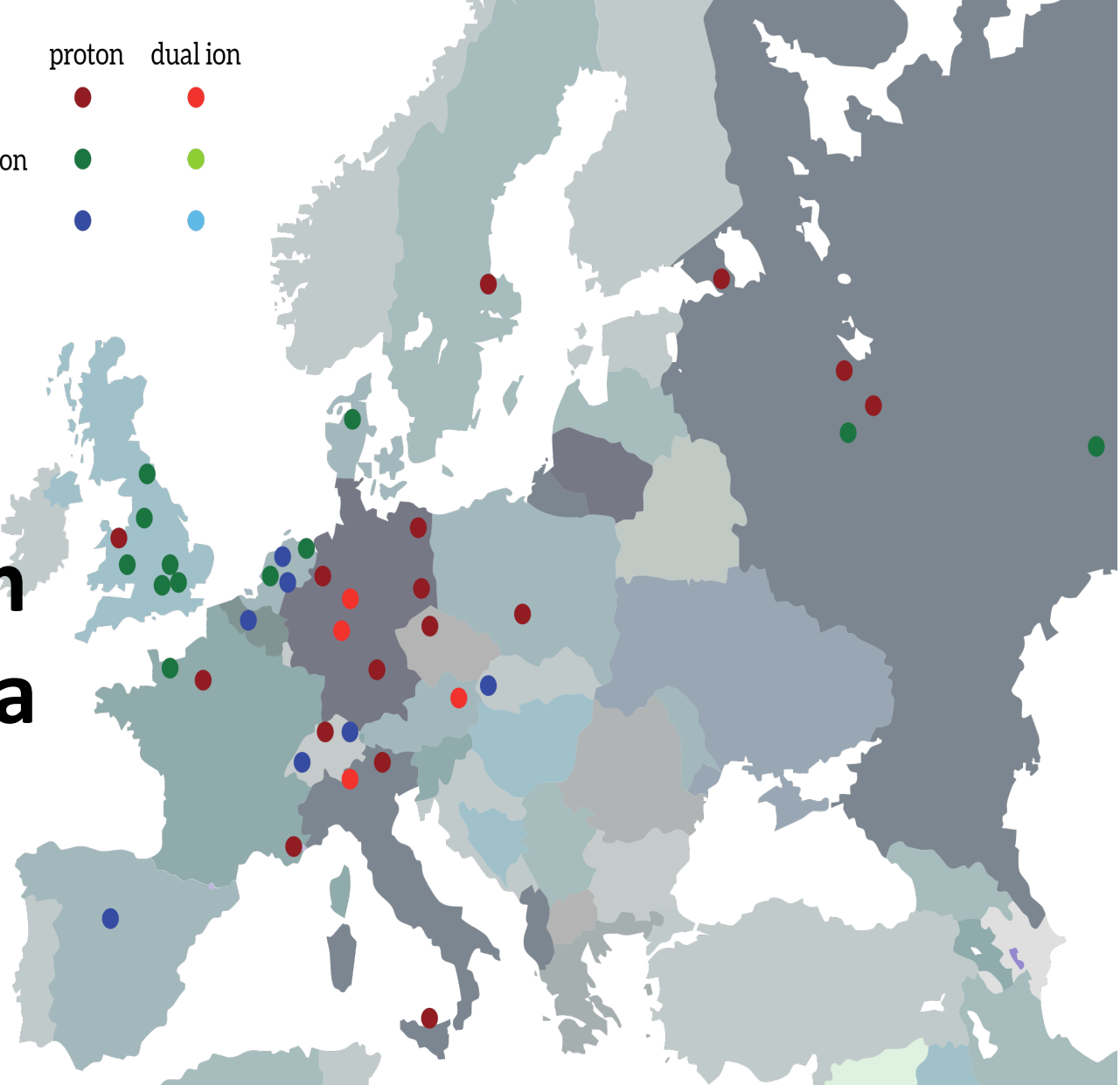


[J. Seco, PRESENT AND FUTURE OF PROTON THERAPY: Special Emphasis on Pediatrics , july 2020]

Onde se localizam os
centros de radioterapia
com partículas carregadas
em funcionamento no
mundo?

Centros de Terapia com partículas na Europa

	proton	dual ion
in operation	●	●
under construction	●	●
being planned	●	●



(2016)

Terapia com partículas em todo o mundo

110 centros em operação em 20 países

USA (32 p)

Japan (14 p, 6 C)

Germany(5 p, 2 C)

England (5 p)

Austria (2 p, C)

Italy (3 p, 1 C)

Netherlands (3 p)

Denmark (1 p)

Belgium (1 p)

China (2 p, 2C)

Spain (2 p)

Czech Republic (2 p)

France (3 p)

...

>50 centros planeados incluindo 11 novos países

Terapia com partículas em todo o mundo

110 centros em operação em 20 países

USA (32 p)

Japan (14 p, 6 C)

Germany (10 p)

England (5 p)

Austria (2 p, C)

Italy (3 p, 1 C)

Netherlands (3 p)

Denmark (1 p)

Belgium (1 p)

China

Spain (2 p)

Czech Republic (2 p)

France (3 p)

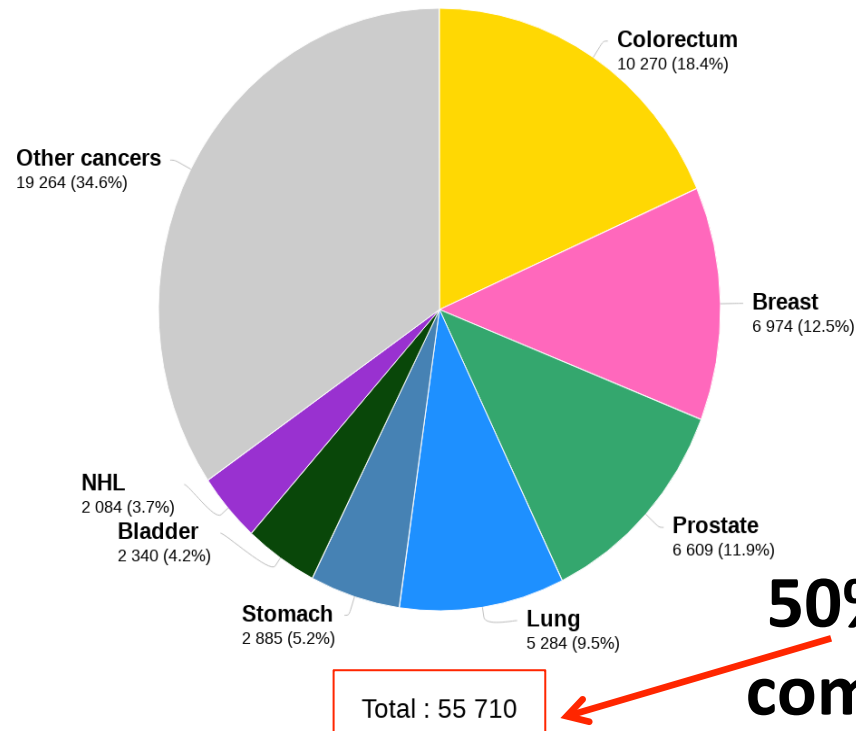
>160 centros em 31 países

>50 centros planeados incluindo 11 novos países

E em Portugal?

Incidência de diferentes tipos de cancro em Portugal

Estimated number of new cases in 2018, Portugal, all cancers excl. NMSC, both sexes, all ages



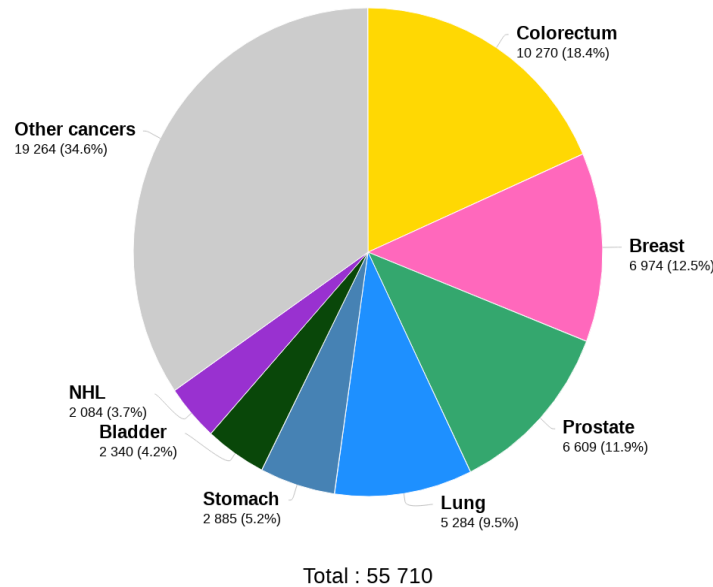
**50% beneficiam
com radioterapia**

Data source: Globocan 2018
Graph production: Global Cancer
Observatory (<http://gco.iarc.fr>)

International Agency for Research on Cancer
World Health
Organization

Incidência de diferentes tipos de cancro em Portugal

Estimated number of new cases in 2018, Portugal, all cancers excl. NMSC, both sexes, all ages

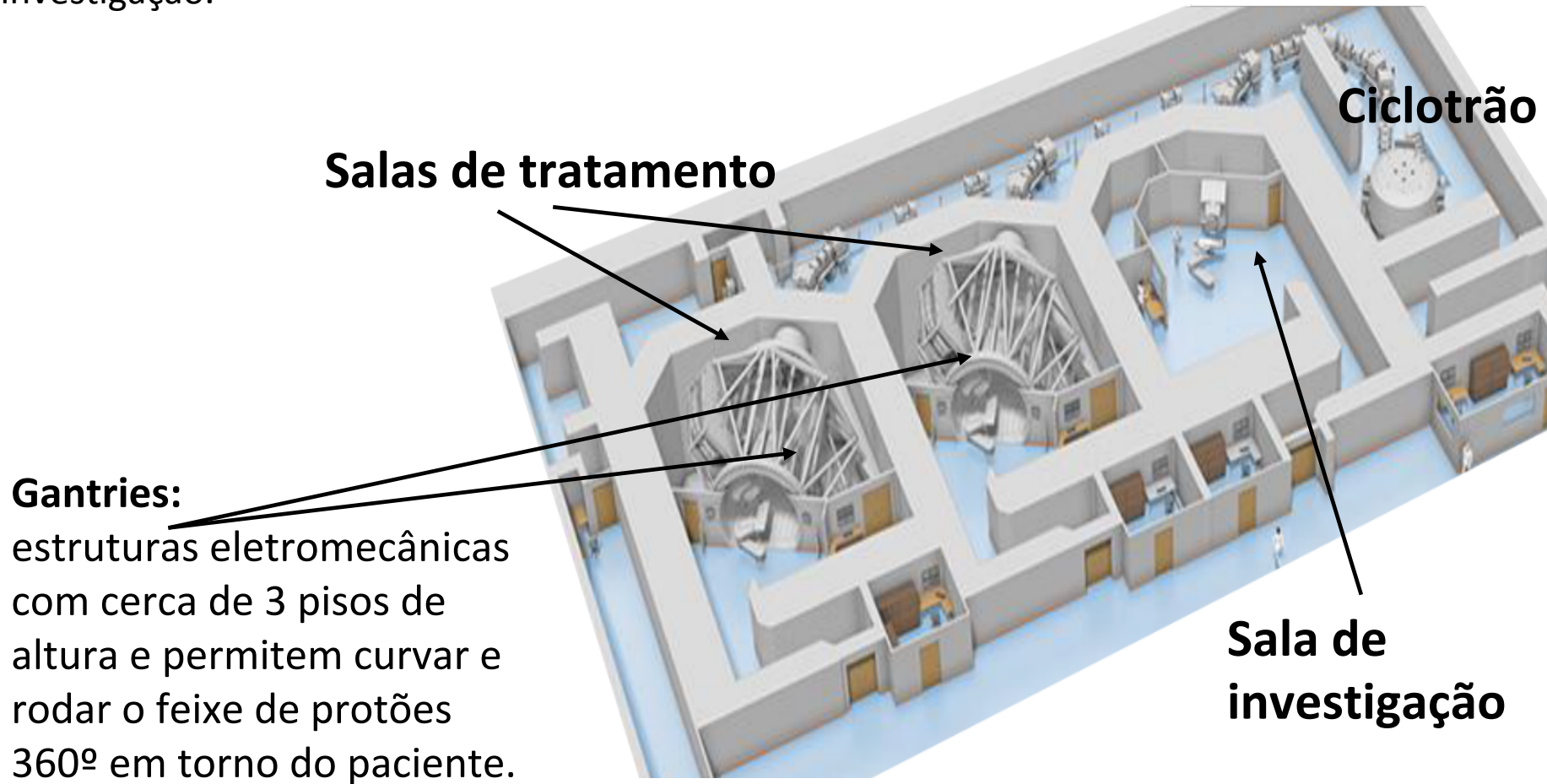


Pacientes estimados com recomendação para terapia com protões
15% dos pacientes recomendados para radioterapia (50% of Total):
4200 pacientes/ano

2017 Hirohiko Tsujii „Overview of Carbon-ion Radiotherapy“ Journal of Physics: Conf. Series 777 (2017) 012032

Como é um centro de radioterapia com protões

Planta de um centro de terapia com protões com duas salas de tratamento e uma sala de investigação.



<https://iba-worldwide.com/proton-therapy/proton-therapy-solutions/proteus-plus>

Terapia com protões em Portugal

Resolução do Conselho de Ministros n.º 28/2018

Aprova as orientações estratégicas para a criação de uma unidade de saúde para o tratamento de doentes com cancro com recurso a terapias de feixes de partículas de elevada energia

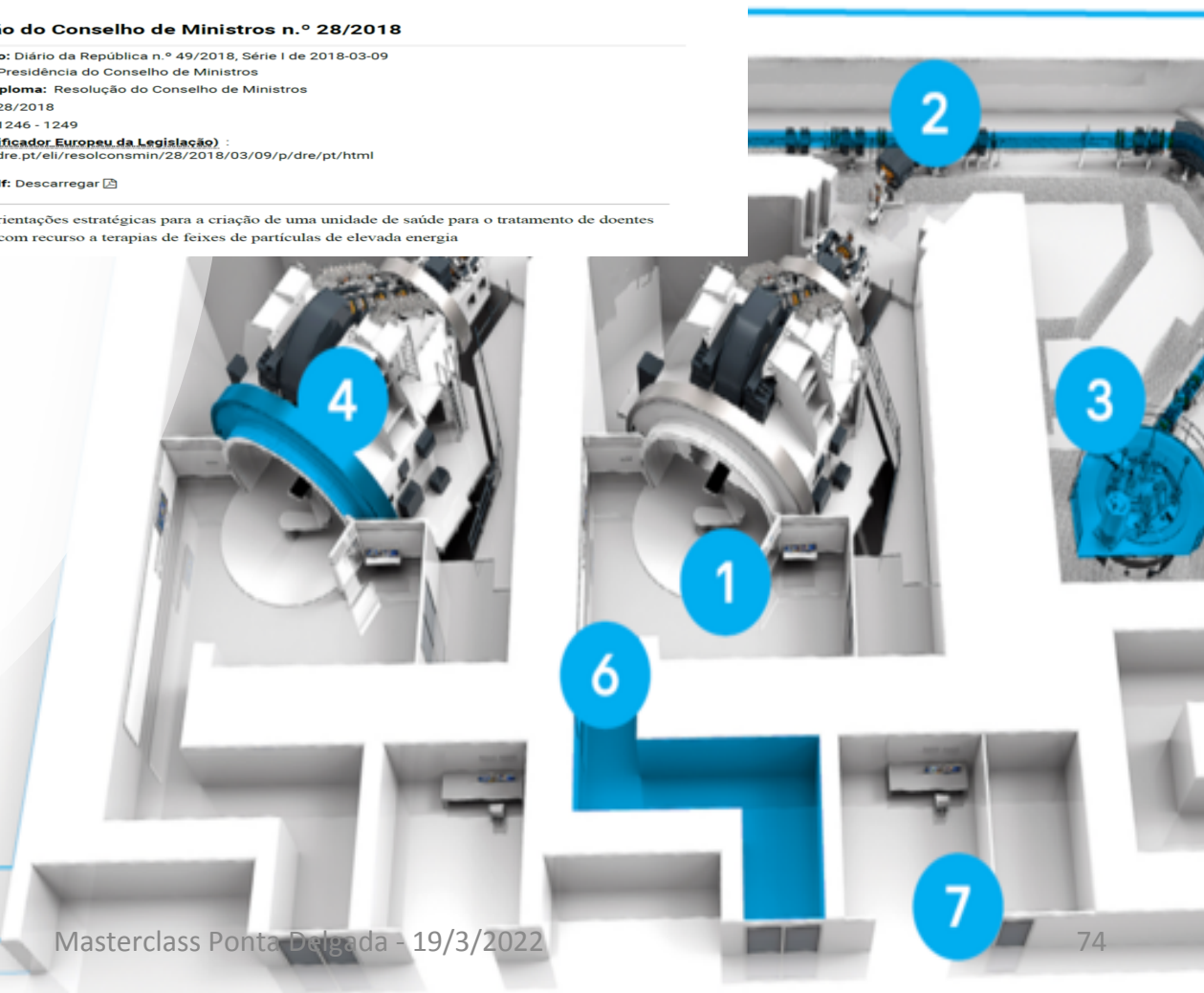


Resolução do Conselho de Ministros n.º 28/2018

- ✓ **Publicação:** Diário da República n.º 49/2018, Série I de 2018-03-09
- ✓ **Emissor:** Presidência do Conselho de Ministros
- ✓ **Tipo de Diploma:** Resolução do Conselho de Ministros
- ✓ **Número:** 28/2018
- ✓ **Páginas:** 1246 - 1249
- ✓ **ELI (Identificador Europeu da Legislação) :** <https://data.dre.pt/eli/resolconsmin/28/2018/03/09/p/dre/pt/html>

📄 **Versão pdf:** Descarregar

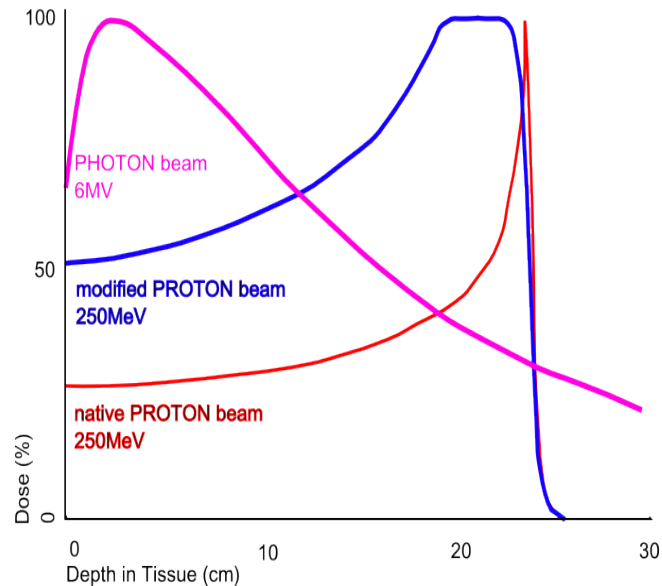
SUMÁRIO
Aprova as orientações estratégicas para a criação de uma unidade de saúde para o tratamento de doentes com cancro com recurso a terapias de feixes de partículas de elevada energia



Rede nacional prevista

- 1 Ciclotrão no Campus do CTN /IST – Lisboa

Protões 250 MeV



- 1 Ciclotrão ICNAS/UC – Coimbra

Protões 70 MeV – Lesões do Olho



Associação ProtoTera

Associação
Portuguesa de
Prototerapia e
Tecnologias
Avançadas para a
prevenção e
tratamento do
Cancro

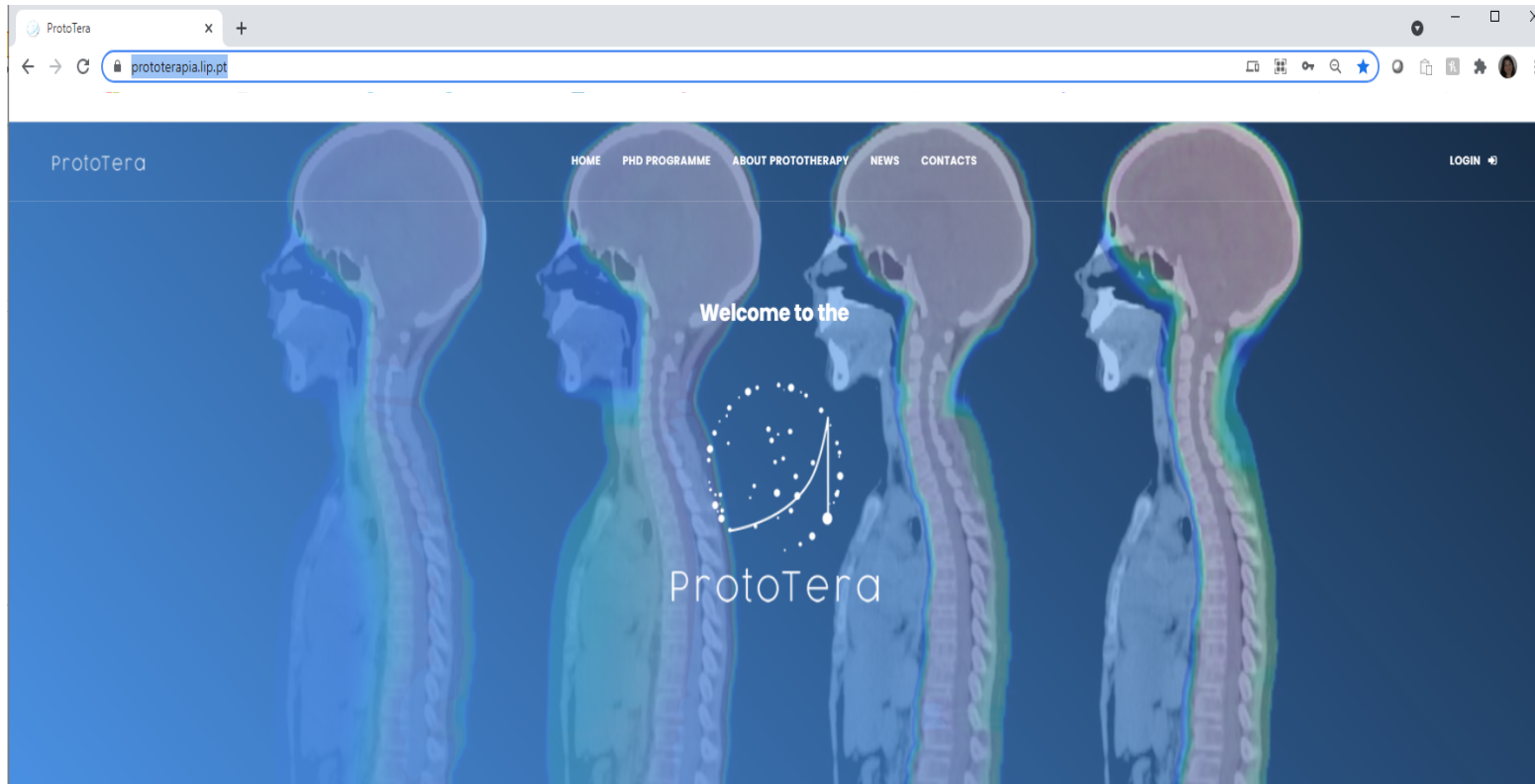
Associados:

- IPO PT network
- CTN (IST)
- Ricardo Gonçalves (UC)

1. A Associação tem por finalidade a promoção e o desenvolvimento de uma **rede nacional de investigação e ensino em terapias avançadas** e tecnologias associadas, potenciando as **infraestruturas de investigação, formação e cuidados de saúde** associadas ao tratamento de doentes com cancro com recurso a novas tecnologias, designadamente em:
 - a) Efeitos de radiação de alta energia em sistemas biológicos e materiais;
 - b) Terapias de feixes de partículas de elevada energia (e.g. prótons);
 - c) Teranóstica para o incremento de uma medicina de precisão e personalizada;
 - d) Aceleradores, linhas de feixe, sistemas de planeamento, imagiologia;
 - e) Imagiologia Médica Avançada;

ProtoTera PhD programme

<https://prototerapia.lip.pt/>



1st call - autumn
2020
2nd call - spring
2021

3rd call - autumn
2021

OPEN CALL ProtoTera Grants 2021

*The call will be open from 17th February to the 14th May 2021
Students can submit thesis applications from 5th April to 14th May*

prototerapia@lip.pt

Ricardo Gonçalves

Masterclass Ponta Delgada - 19/3/2022

Atividades

- Inclusão do **Projeto de Terapia com Protões no plano nacional de infraestruturas**;
- Criação de um **Programa Doutoral pela FCT** para formação avançada com os objetivos de:
 - a. Reforçar **a base científica e técnica de suporte à investigação fundamental ou aplicada** nos estudos dos efeitos da radiação de energia elevada em sistemas biológicos e em materiais;
 - b. Reforçar a **capacidade de desenvolvimento e otimização de tecnologias relevantes** para a utilização terapêutica de feixes de partículas, incluindo aceleradores; feixes modulados no espaço, tempo e intensidade; sistemas de reconstrução em tempo real da localização do feixe na zona do tumor; planeamento em tempo real e imagiologia médica;
 - c. Reforçar **o conhecimento no diagnóstico e tratamento de doenças oncológicas** que envolvam o estudo de abordagens inovativas que envolvam a combinação de sistemas terapêuticos e de diagnóstico, comumente designados como "teranóstica", que contribuem para uma medicina personalizada;
 - d. Reforçar a **investigação clínica e de física médica** relacionadas com a utilização de feixes de partículas de altas energias e nomeadamente na minimização das incertezas a ela associadas.

- e. Desenvolver a **investigação das sinergias entre imunoterapia e prototerapia**.

**...estamos ainda no
início e há muito
trabalho a fazer!**

Agradecimentos e fontes:

João Seco, Department of BioMedicalPhysics in Radiation Oncology, DKFZ,
Presentation at Tribute to Gaspar Barreira, September 2019 and Portugal-CERN
Europa : Ciência e tecnologias nas próximas décadas, July 2020

Jorge Miguel Sampaio (LIP/FCUL),
Particles Against Cancer, Fifth Lisbon mini-school on Particle and Astroparticle
Physics 5 February, 2020

Paulo Crespo (LIP/FCUC)
Hadrontherapy, Advanced course in Biomedical Imaging , Programa de
doutoramento em engenharia Biomédica, FCUC, 2021 and Hadrontherapy and
related medical aspects ESSIL 2012, entervision Summer School

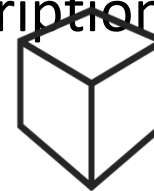
Particle Therapy Master Classes, Crash course on particle therapy, Yiota Foka
(IPPOG, CERN), Niklas Wahl (DKFZ), Hans-Pieter Wieser (DKFZ, LMU), Christian
Graeff (GSI) and João Gonçalves

Masterclass Ponta Delgada - 19/3/2022



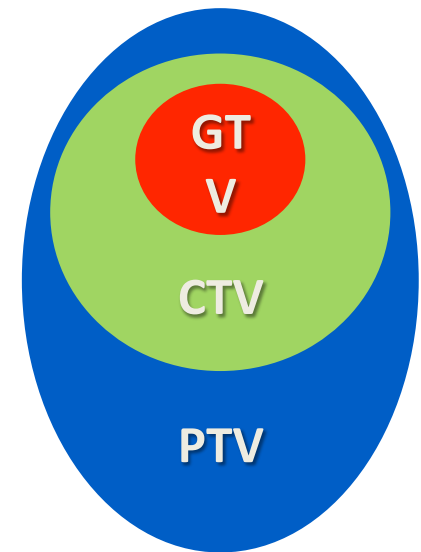
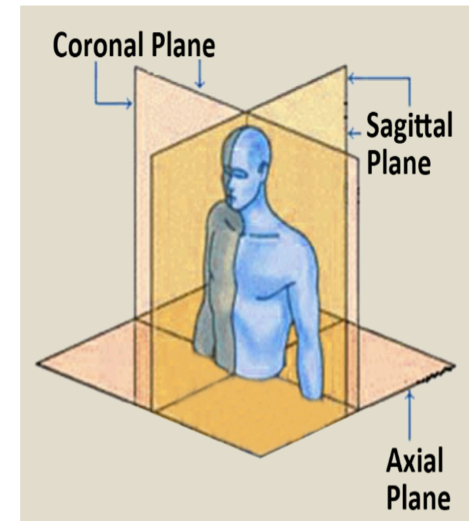
7. Important concepts

- **RBE:** Relative biological effectiveness. Factor that compares the biological effectiveness of (the biological damage caused by) one type of ionizing radiation (e.g. particle radiation) to the biological effectiveness of a reference radiation (e.g. photon radiation) .
- **Voxel:** volume pixel. A voxel is a volume element. It is the basic building block of a volumetric description of an object.
- **VOI:** volume of interest.
- **OAR:** organ at risk.



7. Important concepts

- **Gross Tumour Volume (GTV).**
 - Tumour volume that is visible on the images.
- **Clinical Target Volume (CTV).**
 - Volume of the tissue including the GTV and regions where invisible tumour tissue is expected.
- **Planning Target Volume (PTV).**
 - Includes the GTV and CTV as well as a safety margin to take uncertainties into account.



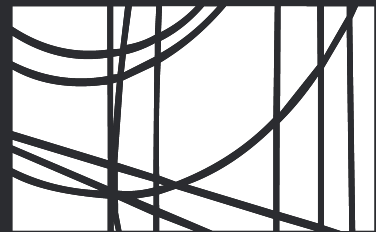
Perguntas?

Obrigado
pelo vosso
interesse!

jgoncalo@lip.pt



Obrigado!



L I P

LET'S INSPIRE PEOPLE