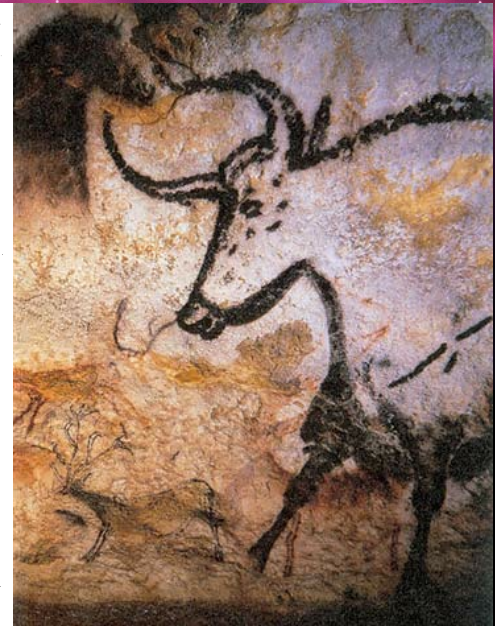
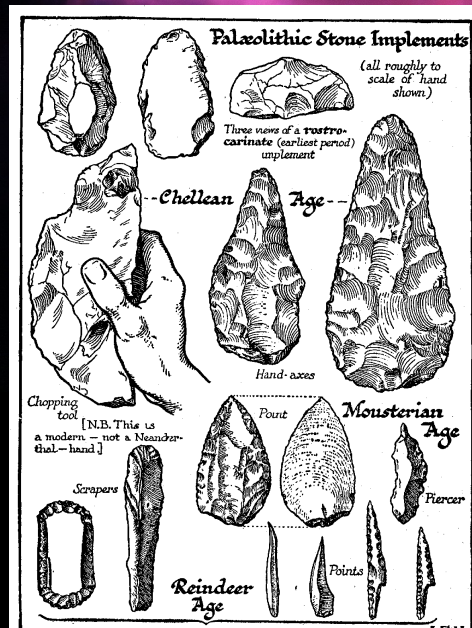
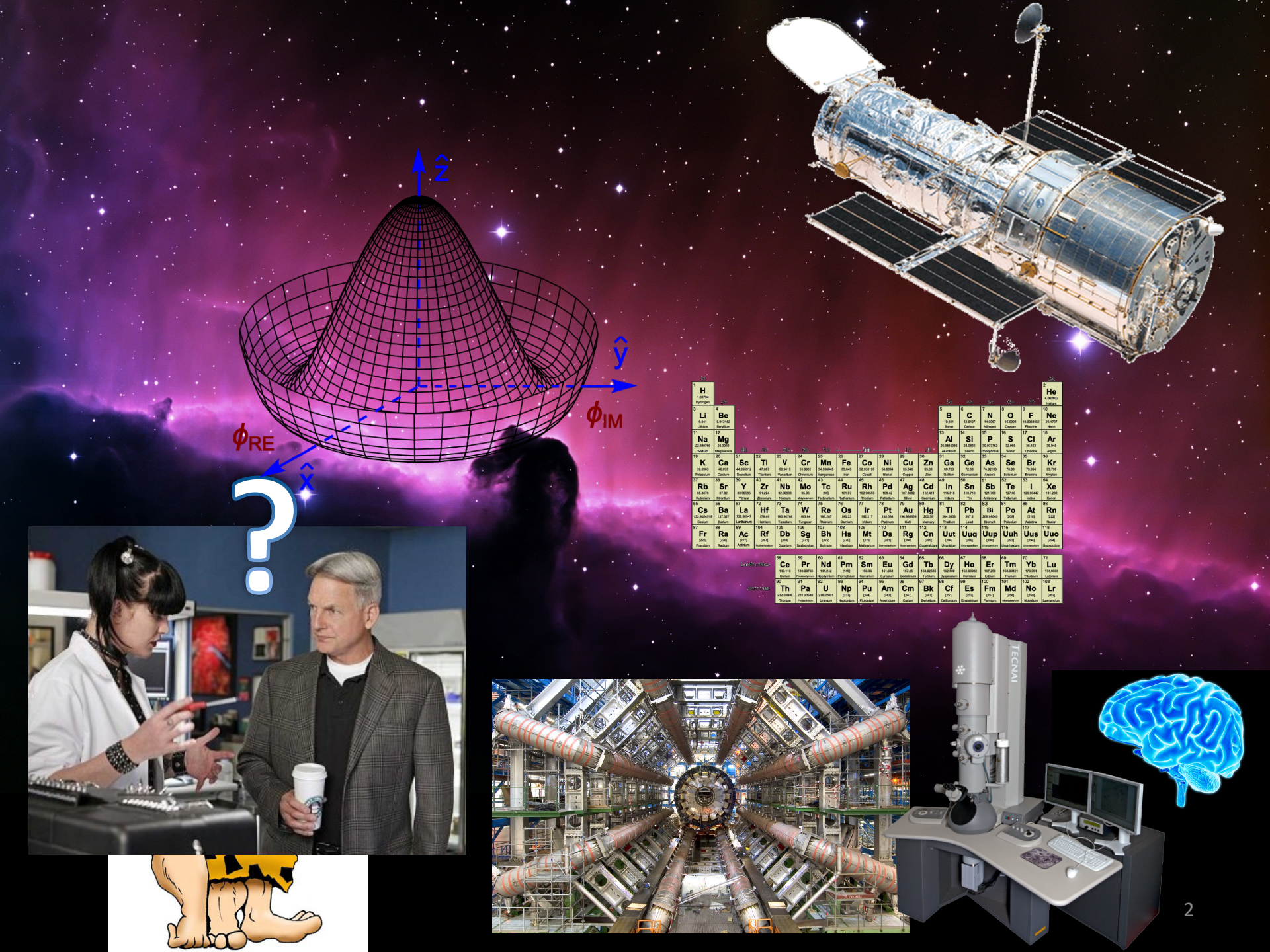


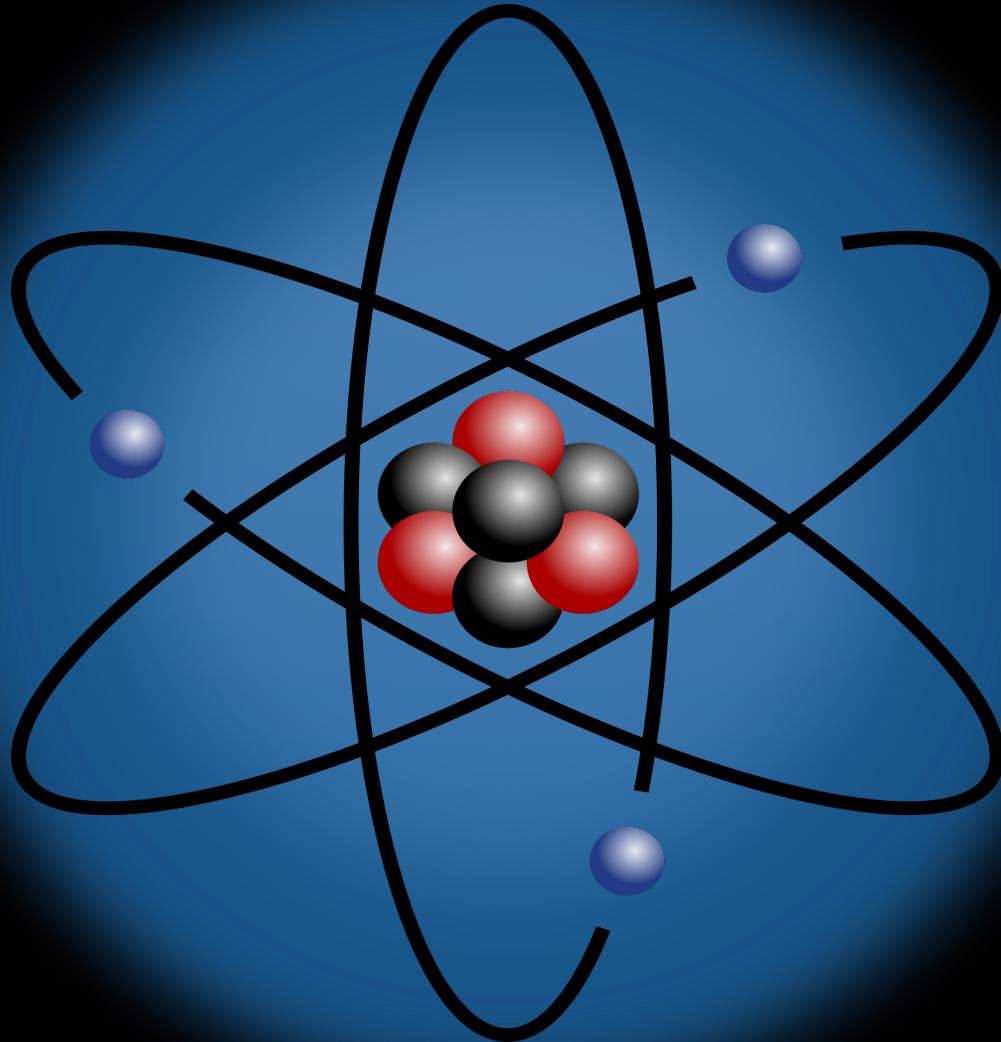
Instrumentos da física fundamental





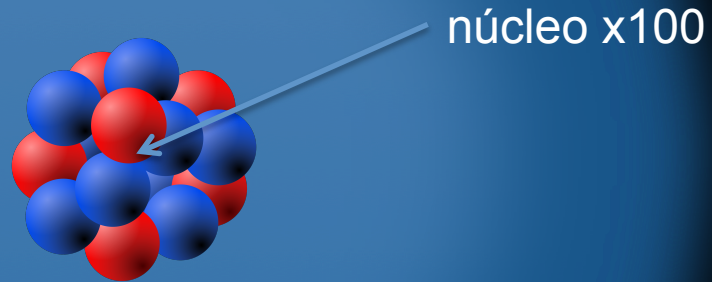
1	H	2	He
3	Li	4	Be
5	B	6	C
7	N	8	O
9	F	10	Ne
11	Na	12	Mg
13	Al	14	Si
15	P	16	S
17	Cl	18	Ar
19	K	20	Ca
21	Sc	22	Ti
23	V	24	Cr
25	Mn	26	Fe
27	Co	28	Ni
29	Cu	30	Zn
31	Ga	32	Ge
33	As	34	Se
35	Br	36	Kr
37	Rb	38	Sr
39	Y	40	Zr
41	Nb	42	Mo
43	Tc	44	Ru
45	Rh	46	Pd
47	Ag	48	Cd
49	In	50	Sn
51	Sb	52	Te
53	I	54	Xe
55	Cs	56	Ba
57	La	58	Ce
59	Pr	60	Nd
61	Pm	62	Sm
63	Eu	64	Gd
65	Tb	66	Dy
67	Ho	68	Er
69	Tm	70	Yb
71	Lu	72	Hf
73	Ta	74	W
75	Re	76	Os
77	Ir	78	Pt
79	Au	80	Hg
81	Tl	82	Pb
83	Bi	84	Po
85	At	86	Rn
87	Fr	88	Ra
89	Ac	90	Th
91	Pa	92	U
93	Np	94	Pu
95	Am	96	Cm
97	Bk	98	Cf
99	Es	100	Fm
101	Md	102	No
103	Lr	104	Uu
105	Uuh	106	Uus
107	Uuo	108	Uut
109	Uuq	110	Uup
111	Uuh	112	Uus
113	Uuo	114	Uut
115	Uuq	116	Uup
117	Uuh	118	Uus
119	Uuo	120	Uut
121	Uuq	122	Uup
123	Uuh	124	Uus
125	Uuo	126	Uut
127	Uuq	128	Uup
129	Uuh	130	Uus
131	Uuo	132	Uut
133	Uuq	134	Uup
135	Uuh	136	Uus
137	Uuo	138	Uut
139	Uuq	140	Uup
141	Uuh	142	Uus
143	Uuo	144	Uut
145	Uuq	146	Uup
147	Uuh	148	Uus
149	Uuo	150	Uut
151	Uuq	152	Uup
153	Uuh	154	Uus
155	Uuo	156	Uut
157	Uuq	158	Uup
159	Uuh	160	Uus
161	Uuo	162	Uut
163	Uuq	164	Uup
165	Uuh	166	Uus
167	Uuo	168	Uut
169	Uuq	170	Uup
171	Uuh	172	Uus
173	Uuo	174	Uut
175	Uuq	176	Uup
177	Uuh	178	Uus
179	Uuo	180	Uut
181	Uuq	182	Uup
183	Uuh	184	Uus
185	Uuo	186	Uut
187	Uuq	188	Uup
189	Uuh	190	Uus
191	Uuo	192	Uut
193	Uuq	194	Uup
195	Uuh	196	Uus
197	Uuo	198	Uut
199	Uuq	200	Uup
201	Uuh	202	Uus
203	Uuo	204	Uut
205	Uuq	206	Uup
207	Uuh	208	Uus
209	Uuo	210	Uut
211	Uuq	212	Uup
213	Uuh	214	Uus
215	Uuo	216	Uut
217	Uuq	218	Uup
219	Uuh	220	Uus
221	Uuo	222	Uut
223	Uuq	224	Uup
225	Uuh	226	Uus
227	Uuo	228	Uut
229	Uuq	230	Uup
231	Uuh	232	Uus
233	Uuo	234	Uut
235	Uuq	236	Uup
237	Uuh	238	Uus
239	Uuo	240	Uut
241	Uuq	242	Uup
243	Uuh	244	Uus
245	Uuo	246	Uut
247	Uuq	248	Uup
249	Uuh	250	Uus
251	Uuo	252	Uut
253	Uuq	254	Uup
255	Uuh	256	Uus
257	Uuo	258	Uut
259	Uuq	260	Uup
261	Uuh	262	Uus
263	Uuo	264	Uut
265	Uuq	266	Uup
267	Uuh	268	Uus
269	Uuo	270	Uut
271	Uuq	272	Uup
273	Uuh	274	Uus
275	Uuo	276	Uut
277	Uuq	278	Uup
279	Uuh	280	Uus
281	Uuo	282	Uut
283	Uuq	284	Uup
285	Uuh	286	Uus
287	Uuo	288	Uut
289	Uuq	290	Uup
291	Uuh	292	Uus
293	Uuo	294	Uut
295	Uuq	296	Uup
297	Uuh	298	Uus
299	Uuo	300	Uut
301	Uuq	302	Uup
303	Uuh	304	Uus
305	Uuo	306	Uut
307	Uuq	308	Uup
309	Uuh	310	Uus
311	Uuo	312	Uut
313	Uuq	314	Uup
315	Uuh	316	Uus
317	Uuo	318	Uut
319	Uuq	320	Uup
321	Uuh	322	Uus
323	Uuo	324	Uut
325	Uuq	326	Uup
327	Uuh	328	Uus
329	Uuo	330	Uut
331	Uuq	332	Uup
333	Uuh	334	Uus
335	Uuo	336	Uut
337	Uuq	338	Uup
339	Uuh	340	Uus
341	Uuo	342	Uut
343	Uuq	344	Uup
345	Uuh	346	Uus
347	Uuo	348	Uut
349	Uuq	350	Uup
351	Uuh	352	Uus
353	Uuo	354	Uut
355	Uuq	356	Uup
357	Uuh	358	Uus
359	Uuo	360	Uut
361	Uuq	362	Uup
363	Uuh	364	Uus
365	Uuo	366	Uut
367	Uuq	368	Uup
369	Uuh	370	Uus
371	Uuo	372	Uut
373	Uuq	374	Uup
375	Uuh	376	Uus
377	Uuo	378	Uut
379	Uuq	380	Uup
381	Uuh	382	Uus
383	Uuo	384	Uut
385	Uuq	386	Uup
387	Uuh	388	Uus
389	Uuo	390	Uut
391	Uuq	392	Uup
393	Uuh	394	Uus
395	Uuo	396	Uut
397	Uuq	398	Uup
399	Uuh	400	Uus

O átomo

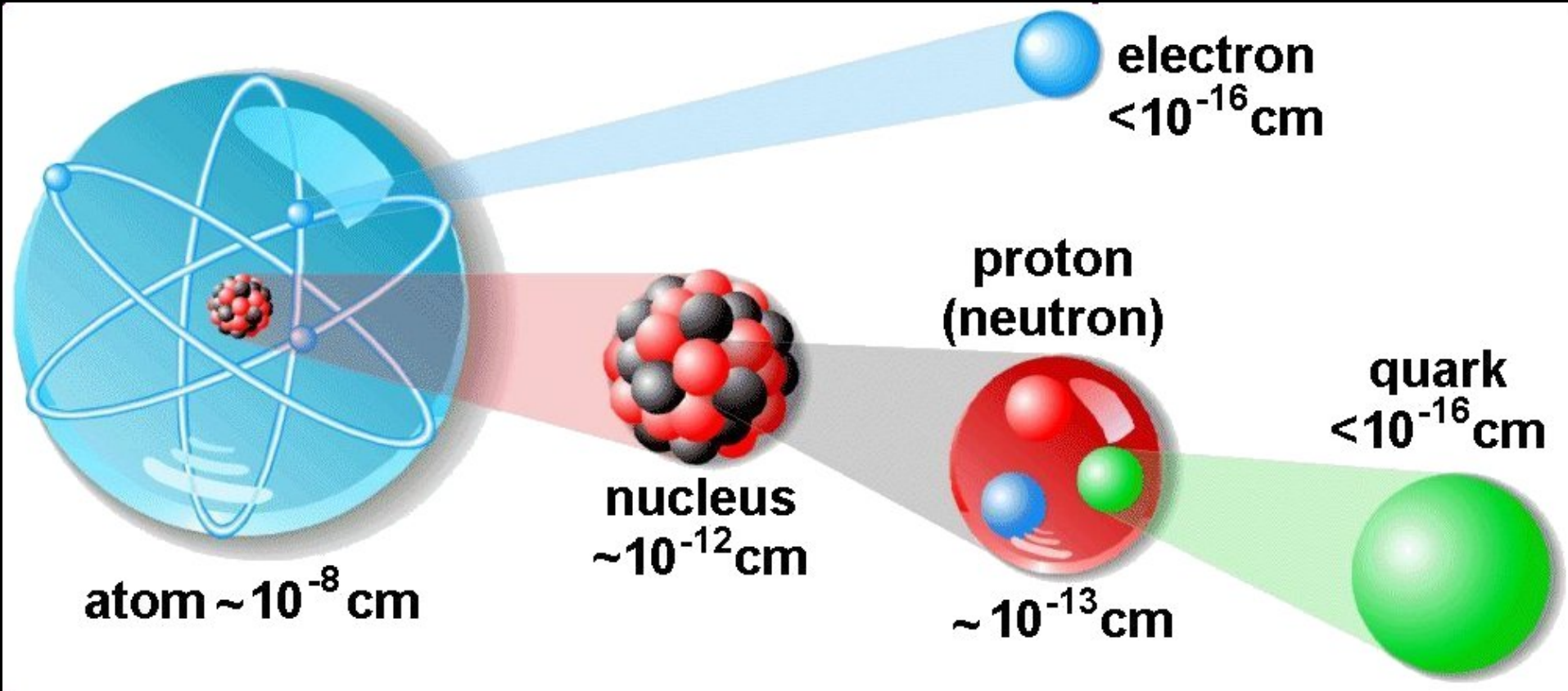


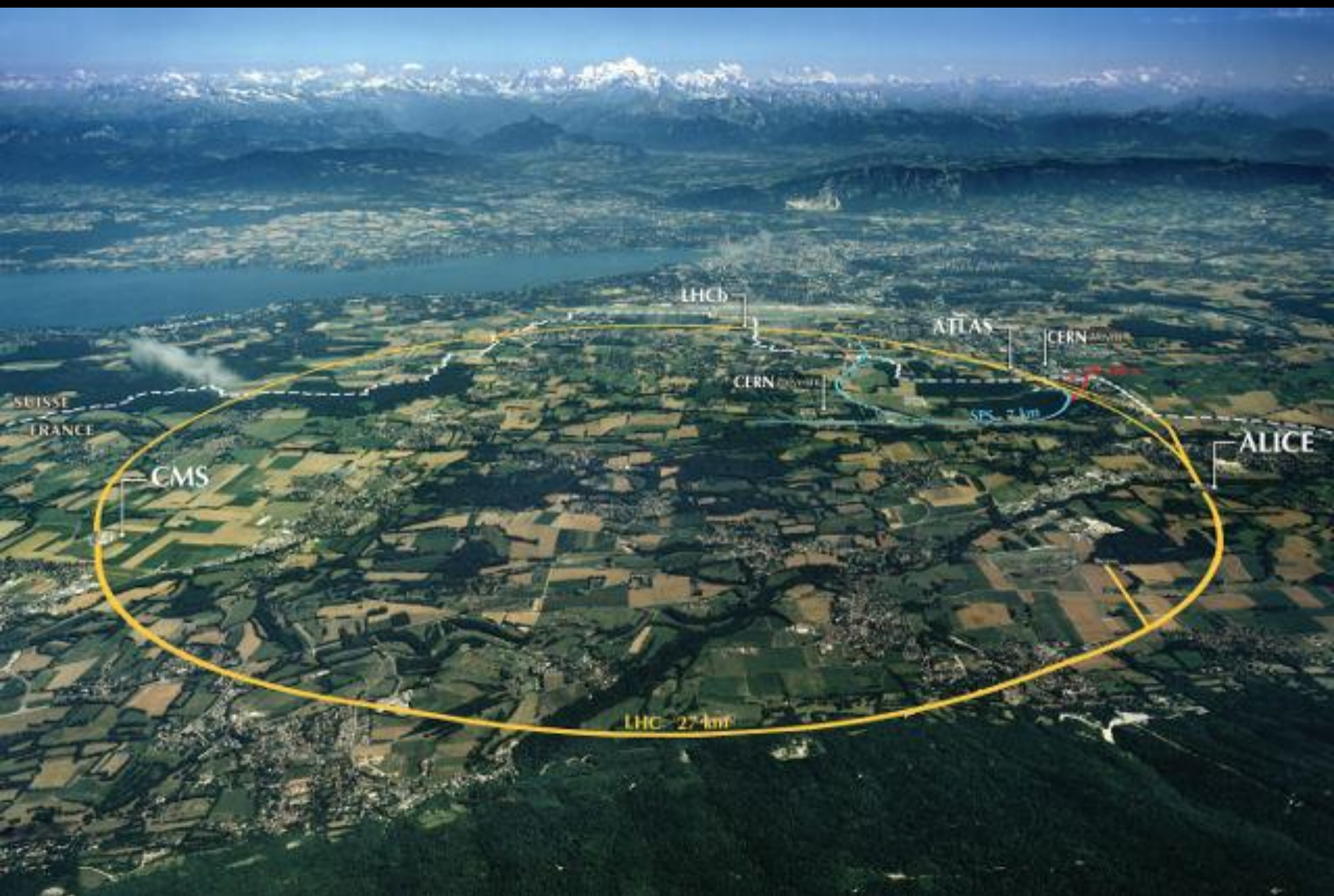
O átomo

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



Do átomo às partículas fundamentais

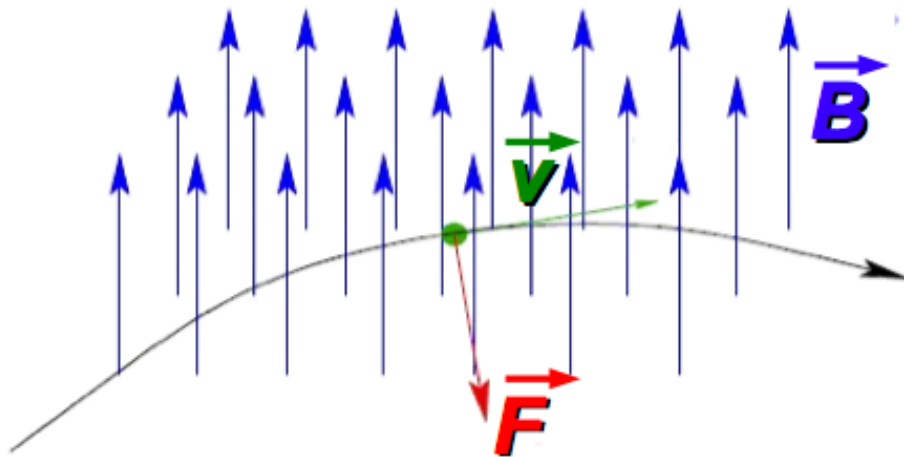




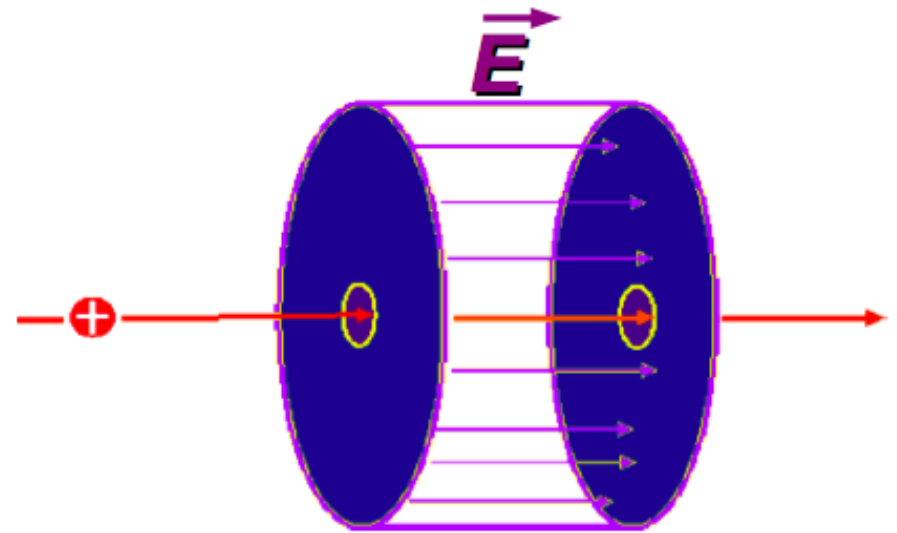
Acelerar e curvar partículas carregadas...

Força de Lorentz

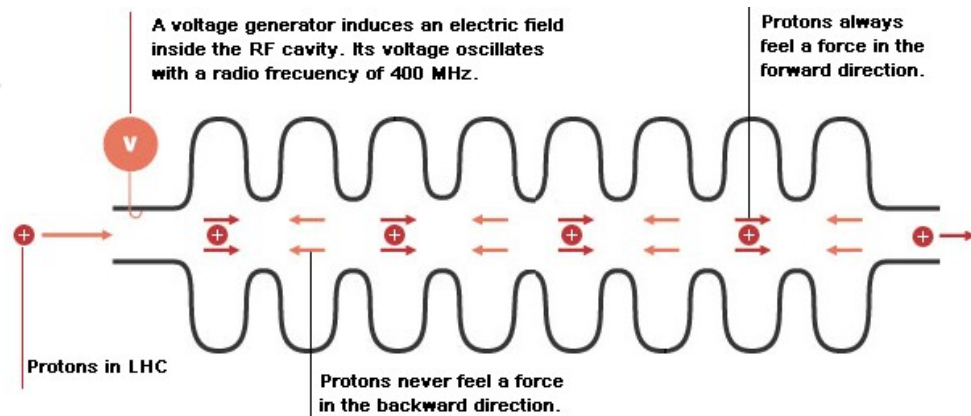
$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$



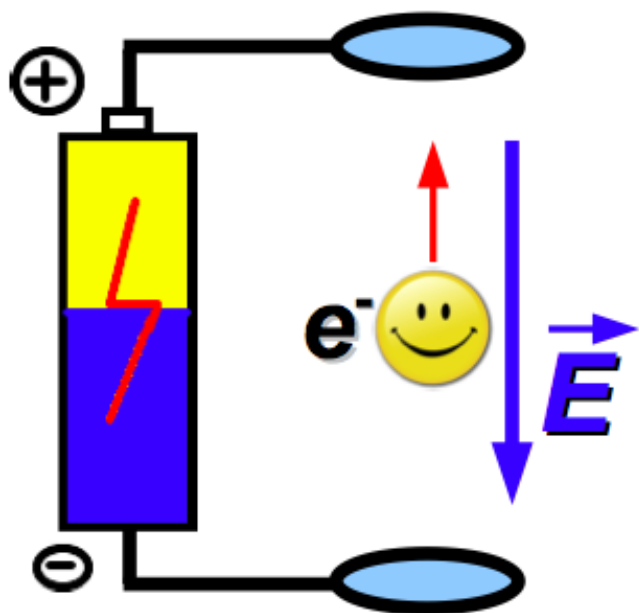
$B(t)$ modifica a trajetória



$E(t)$ aumenta a energia



Unidades...



• **1 electrão-volt (eV) = energia adquirida por um electrão sujeito a uma d.d.p. de 1 volt**

$$1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ joule}$$

Múltiplos mais comuns:

$$1 \text{ keV} = 10^3 \text{ eV} = 1000 \text{ eV}$$

$$1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV} = 1000000 \text{ eV}$$

$$1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV} = 1000000000 \text{ eV}$$

$$1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV} = 1000000000000 \text{ eV}$$

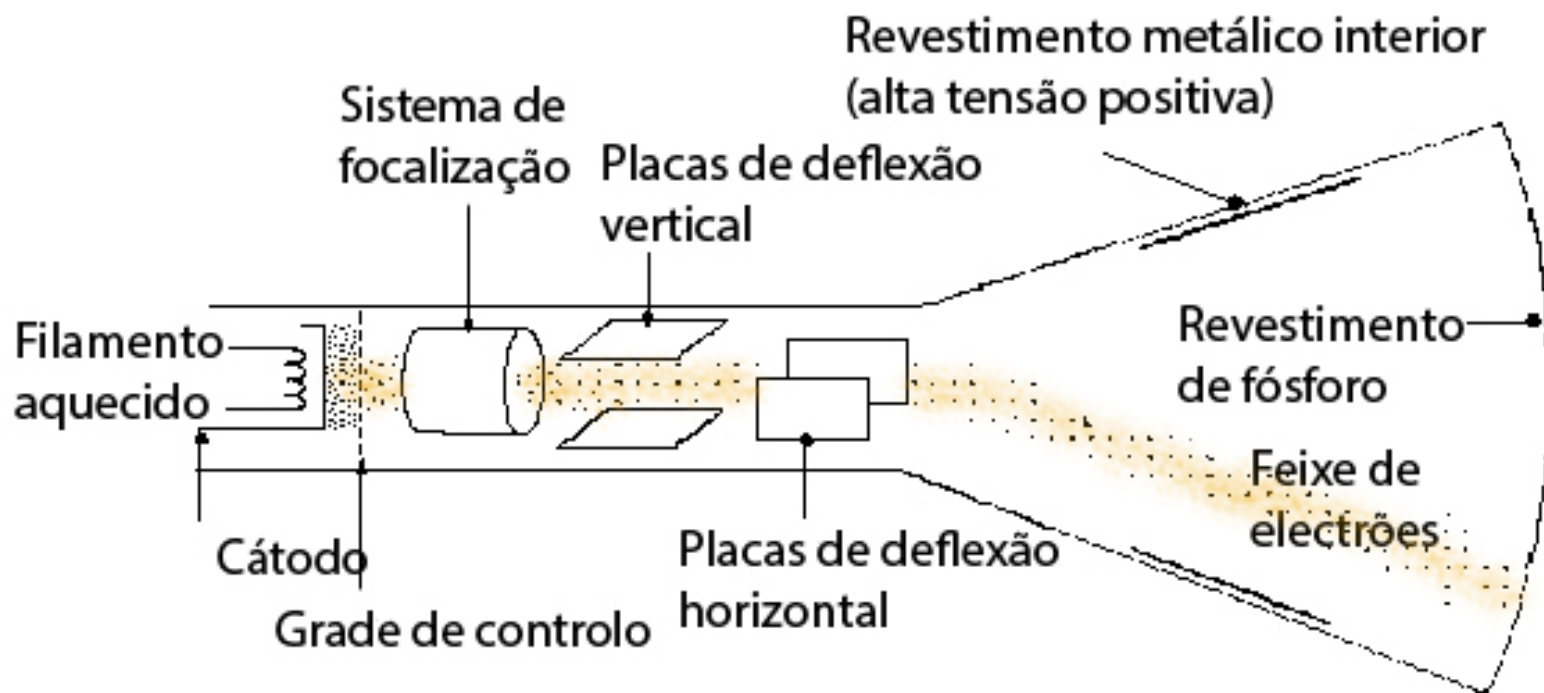
Massa: $E_c = \frac{1}{2} mv^2 \Rightarrow$ massa em unidades de **energia/(velocidade)²**

Momento linear: $\vec{p} = m\vec{v} \Rightarrow$ momento em unidades de **energia/velocidade**

Exemplo de um acelerador...

Tubo de raios catódicos

- fonte de partículas
- campos electromagnéticos para as acelerar e guiar
- meio de detecção (detector)



Complexo de aceleradores do CERN

1985: início do projecto LHC

2008: entrada em funcionamento do LHC



CMS

COMPASS

ATLAS

CERN Accelerators
(not to scale)

0.999999c by here

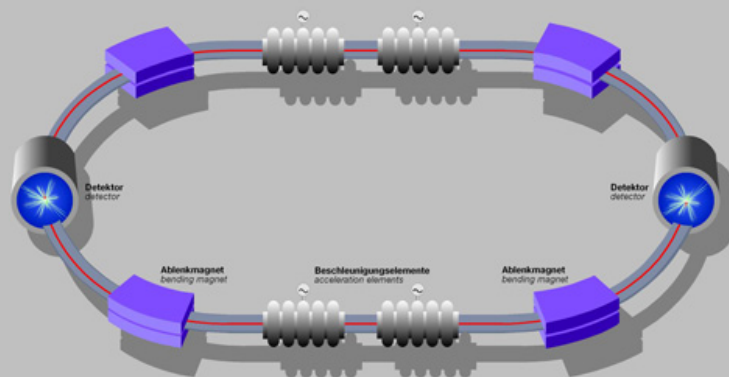
0.87c by here

0.3c by here

Start the protons out here

LHC: Large Hadron Collider
SPS: Super Proton Synchrotron
AD: Antiproton Decelerator
ISOLDE: Isotope Separator OnLine DEvice
PSB: Proton Synchrotron Booster
PS: Proton Synchrotron
LINAC: LINear ACcelerator
LEIR: Low Energy Ion Ring
CNGS: Cern Neutrinos to Gran Sasso

Radolf LEIR, PS Division, CERN, 02.09.96
Revised and adapted by Antonella Del Rio, ETT Div.,
in collaboration with B. Desforges, SL Div., and
D. Manglani, PS Div, CERN, 23.05.01

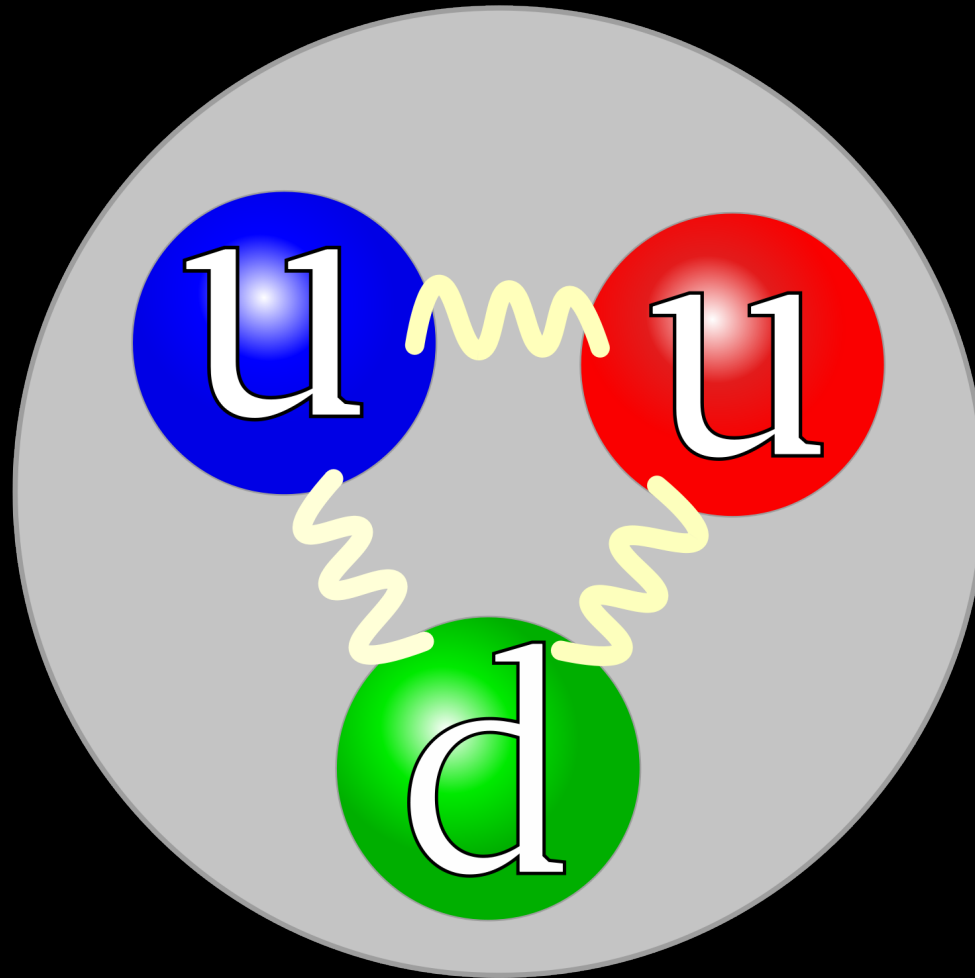


Protões percorrem o anel de 27 km de
perímetro **11245 vezes num segundo.**

O Protão revisitado



O próton no modelo dos quarks

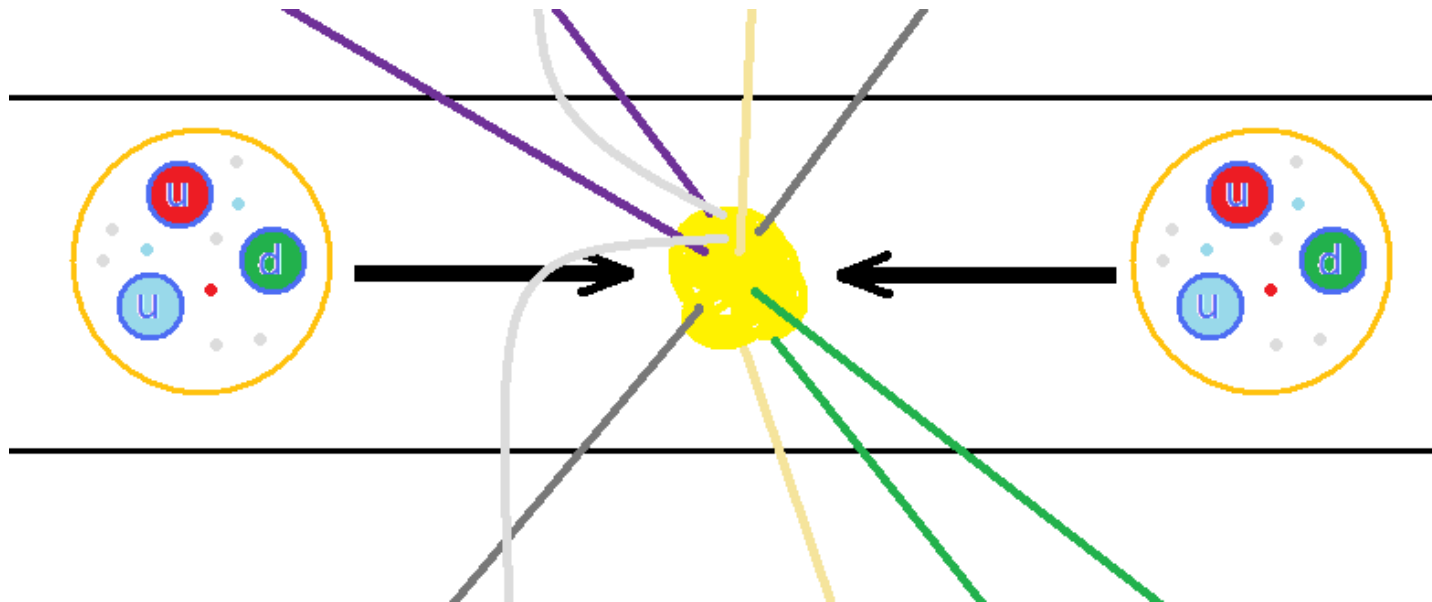


Colisões prótão-prótão

- Os protões dos feixes têm a energia de 6.5 TeV cada:

$$2 \times 6.5 \text{ TeV} = 13 \text{ TeV (energia útil)}$$

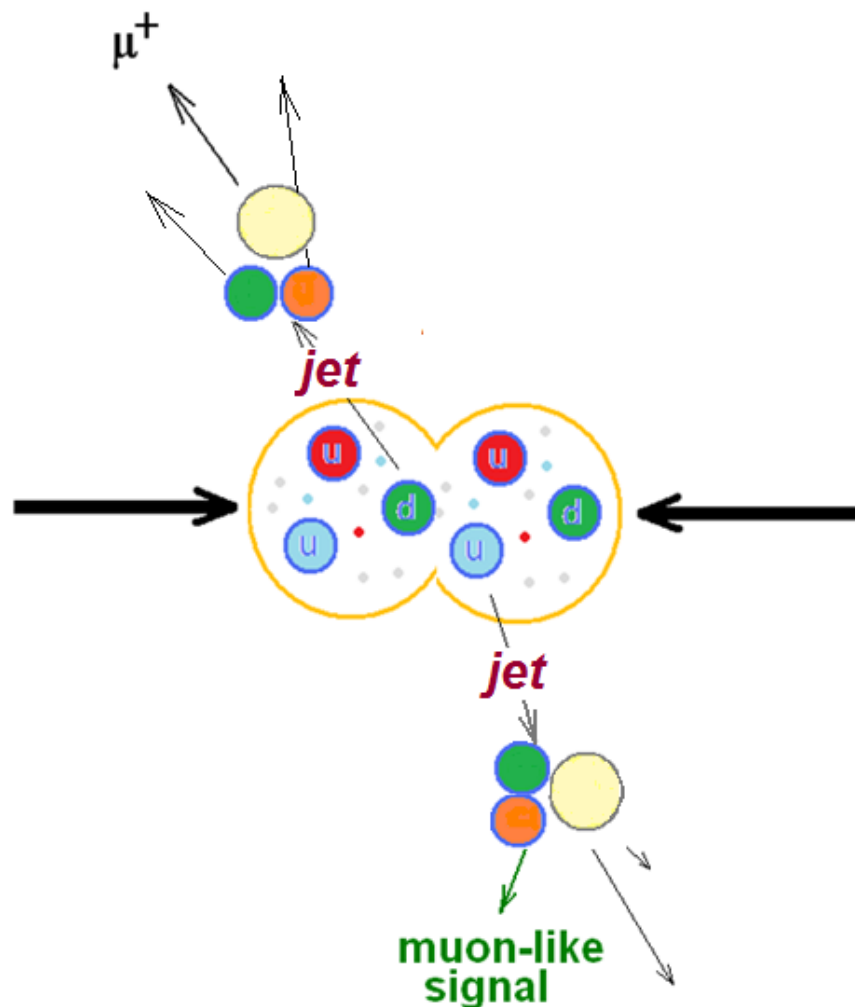
- Os **quarks** e **gluões** constituintes do protão que colide têm apenas uma fracção desta energia. **Novas partículas criadas na colisão têm sempre uma massa inferior a esta energia.**



Jactos de partículas (o mais frequente!)

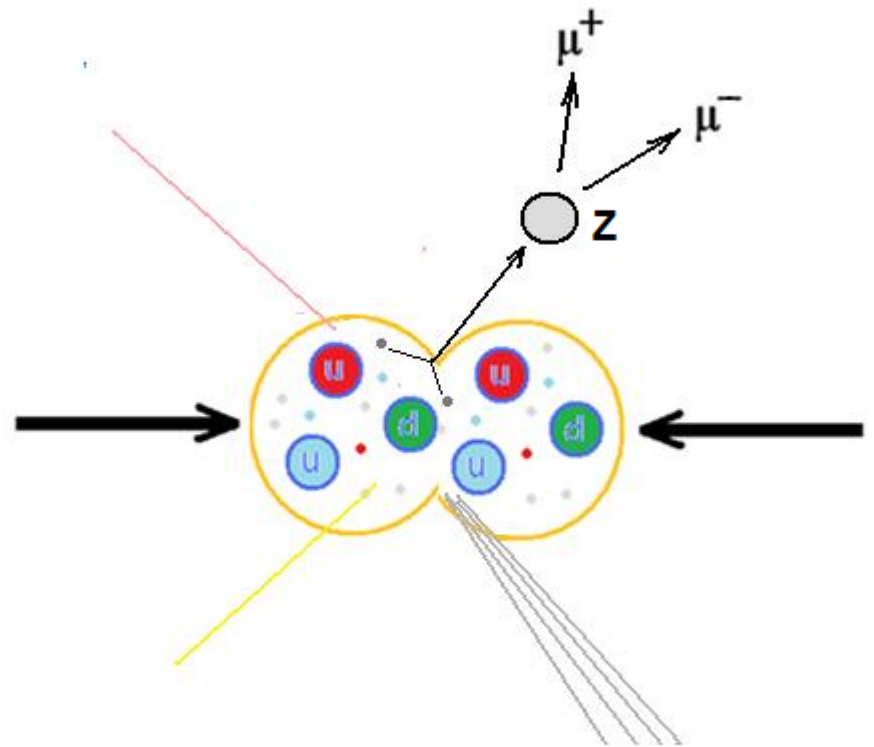
Frequentemente quarks são dispersados em colisões

Estes quarks dão origem a jactos de partículas. Electrões e muões de baixa energia podem ser produzidos nos jactos.



Bosão Z

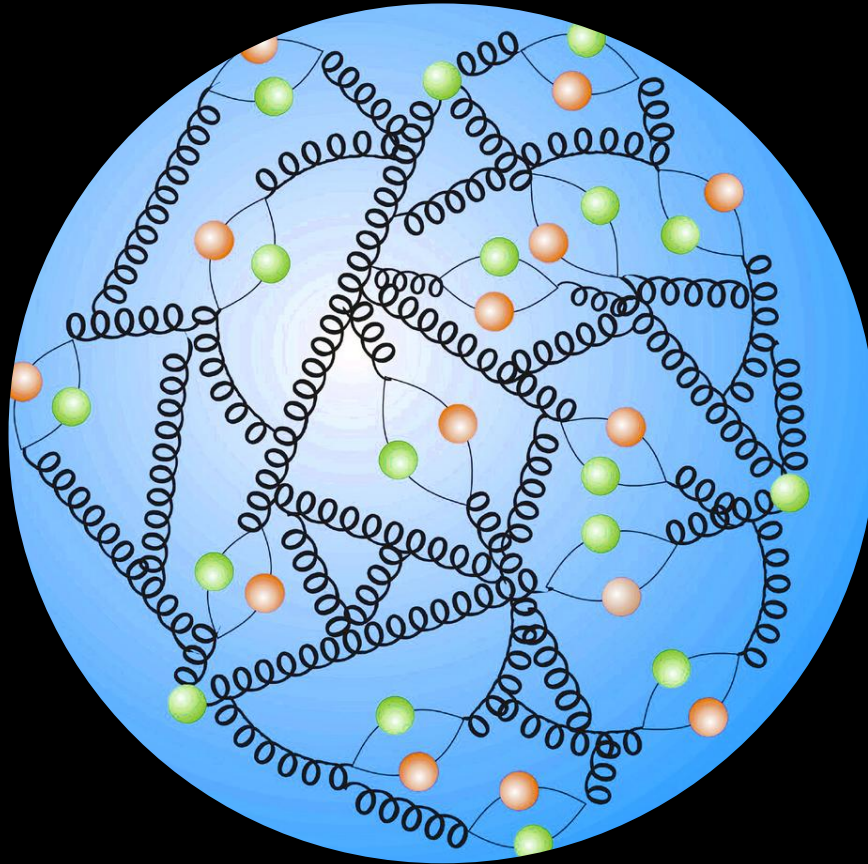
Estamos à procura do **bosão Z**, uma partícula **electricamente neutra** com uma **vida média** muito pequena (10^{-25} s) que decai num par **muão-antimuão** ou num par **electrão-positrão** (*)



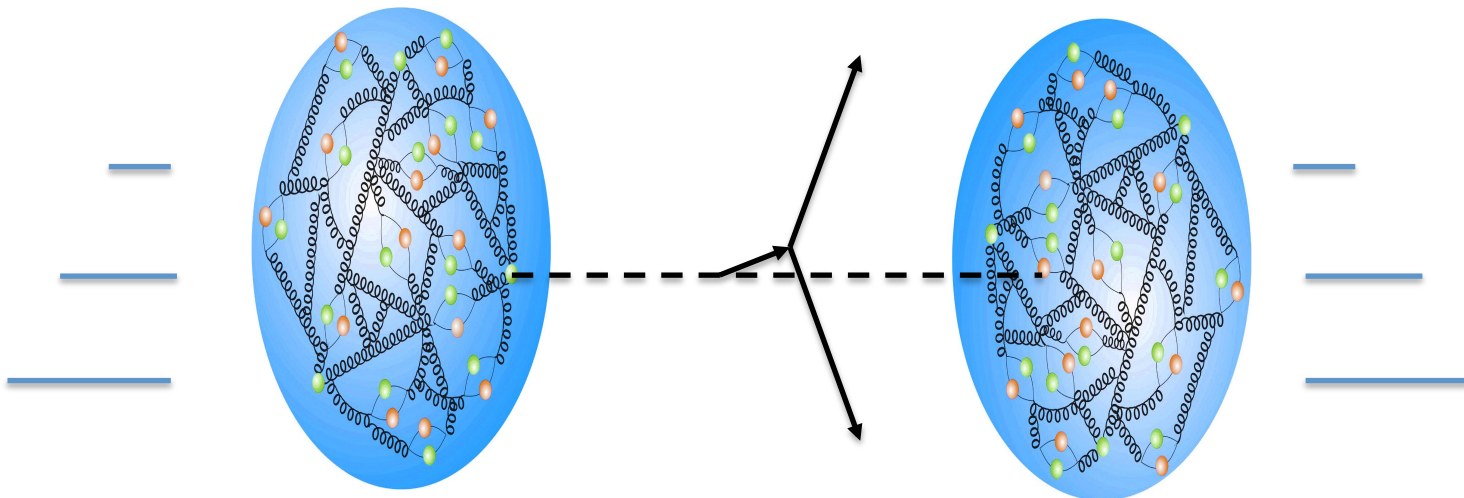
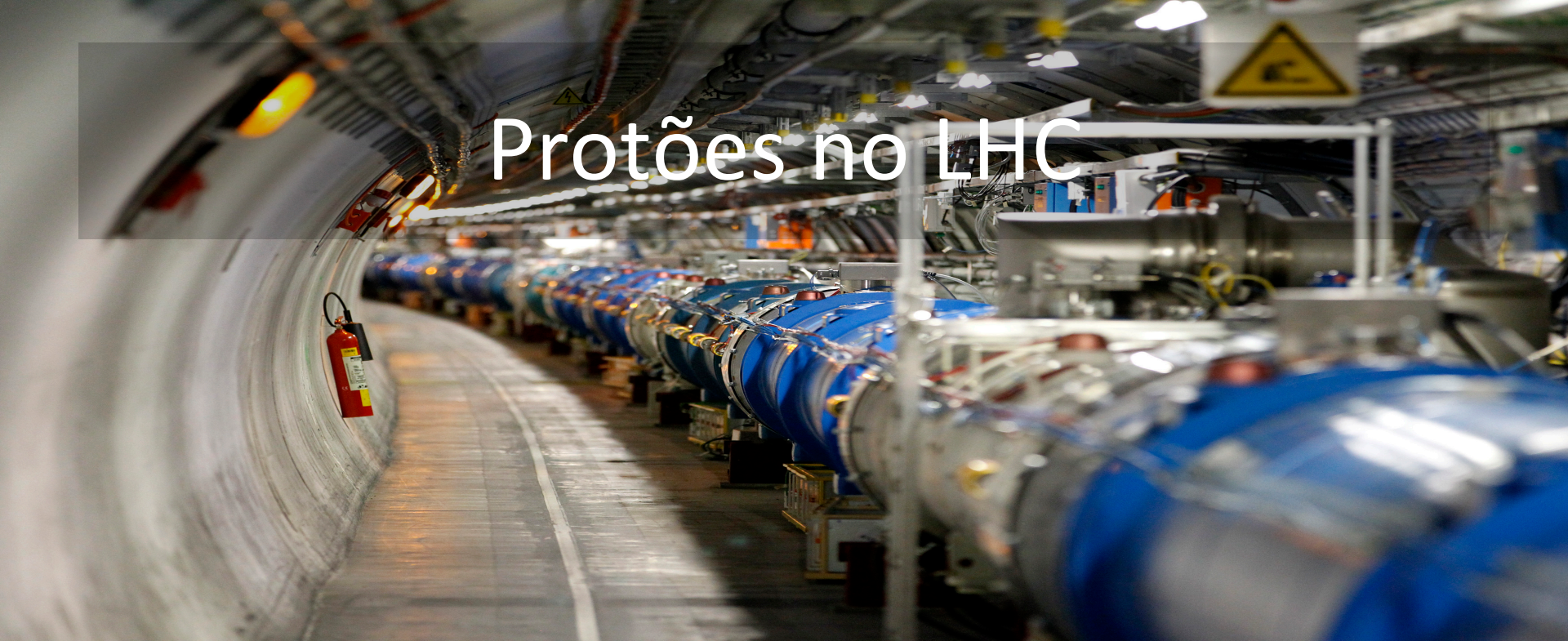
(*) *O Z tem outros decaimentos como em quark-antiquark ou em neutrinos ... mas não estamos interessados nesses.*

NOTA: *as partículas J/ψ , Υ e Z' têm decaimentos idênticos, a diferença está nas massas e também nos tempos de vida-média.*

O próton tal como o conhecemos hoje



Protões no LHC



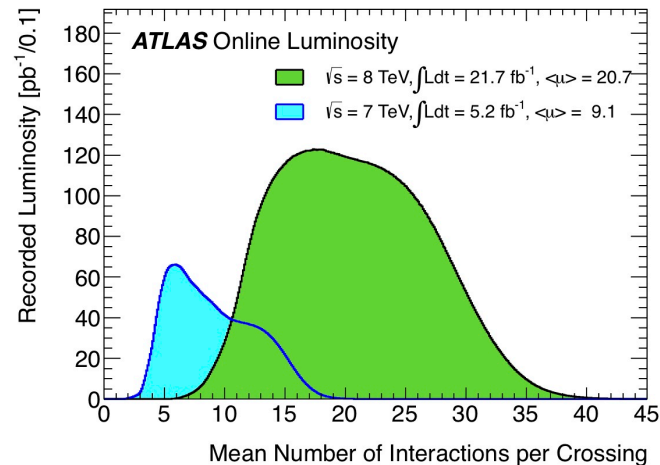
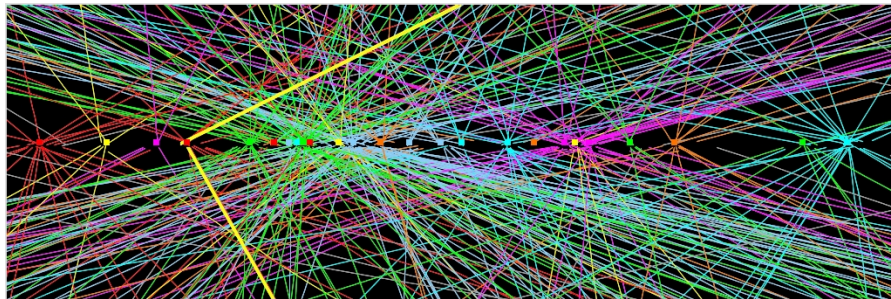
Energia no ponto de interacção

Dois feixes de prótons irão viajar a uma $E_{\text{max}} = 7 \text{ TeV}$, correspondendo a uma colisão frontal de $E = 14 \text{ TeV}$. 600 milhões de colisões terão lugar a cada segundo.



Energia útil na colisão: $E_{\text{cm}} = 2E_{\text{feixe}}$

$\sim 10^{11}$ prótons / grupo

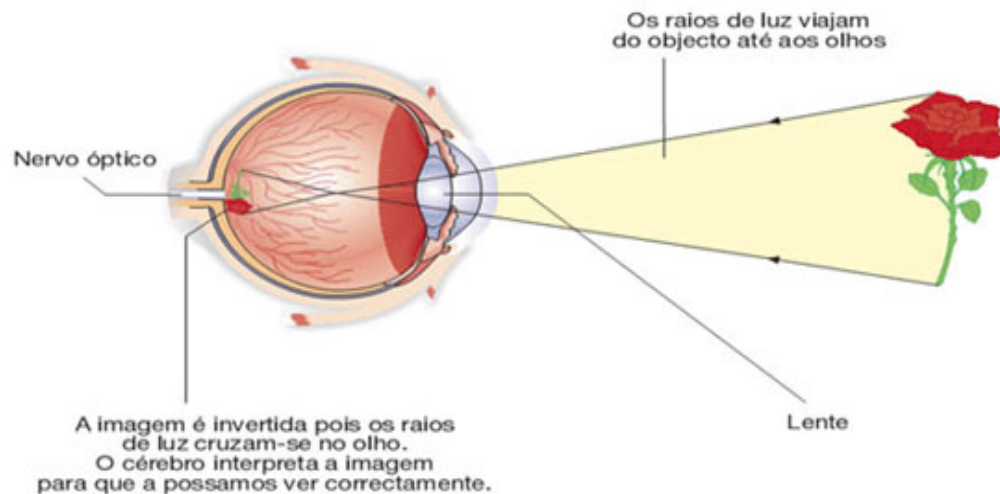


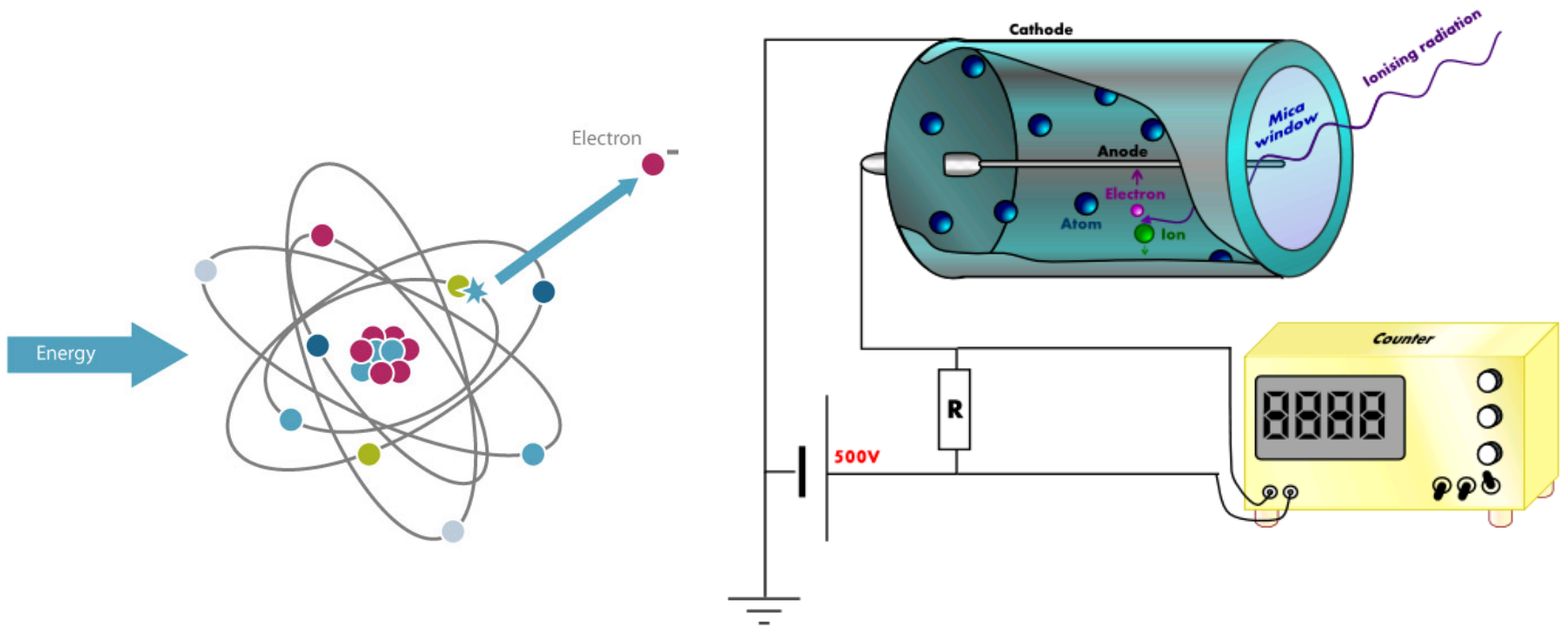
~ 20 colisões

Detectores



Impulsos Eléctricos





● **Objectivo:** **Interacção da partícula com o volume sensível do detector** → **Sinal macroscópico**

- **Sinal eléctrico** ou **Sinal luminoso** → **Sinal eléctrico**

● **Princípio:** **Aparição de carga Q**

- **Aplicação do campo eléctrico** → **deslocamento da carga** → **corrente $i(t)$** → **colecta de carga no tempo t**

- **Formação do sinal $i(t)$:** $\int i(t) dt = Q$

Gigante ATLAS



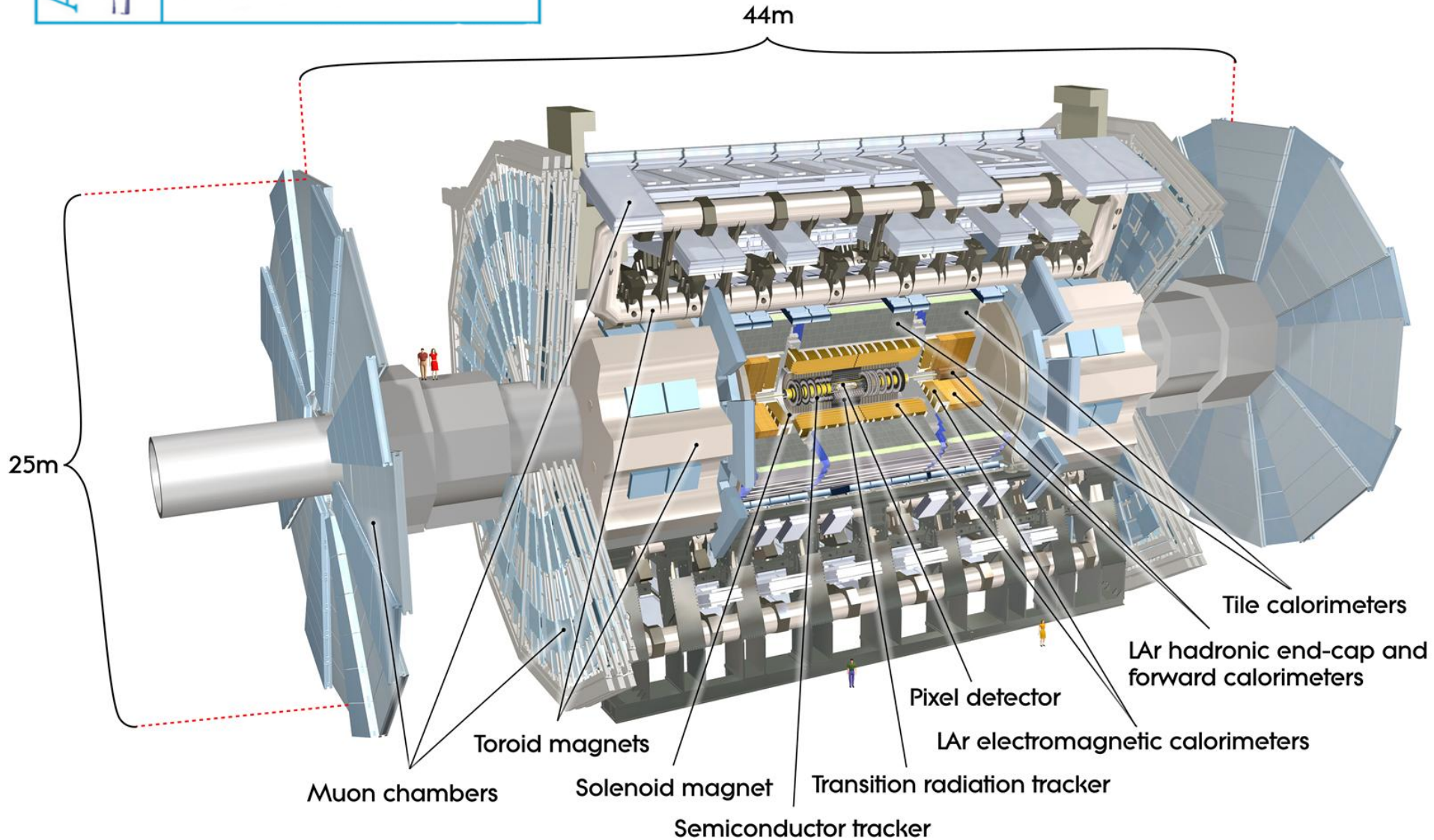
Titã Atlas (mitologia grega):

- Como castigo por ter desafiado os deuses do Olimpo, passou a sustentar nos ombros o fardo do firmamento para toda a eternidade.



Características do detector

Comprimento: 44 m
Diâmetro: 22 m
Peso: 7000 t



Muon
Spectrometer

Hadronic
Calorimeter

Electromagnetic
Calorimeter

Solenoid magnet

Tracking

Transition
Radiation
Tracker

Pixel/SCT detector

Proton

Muon

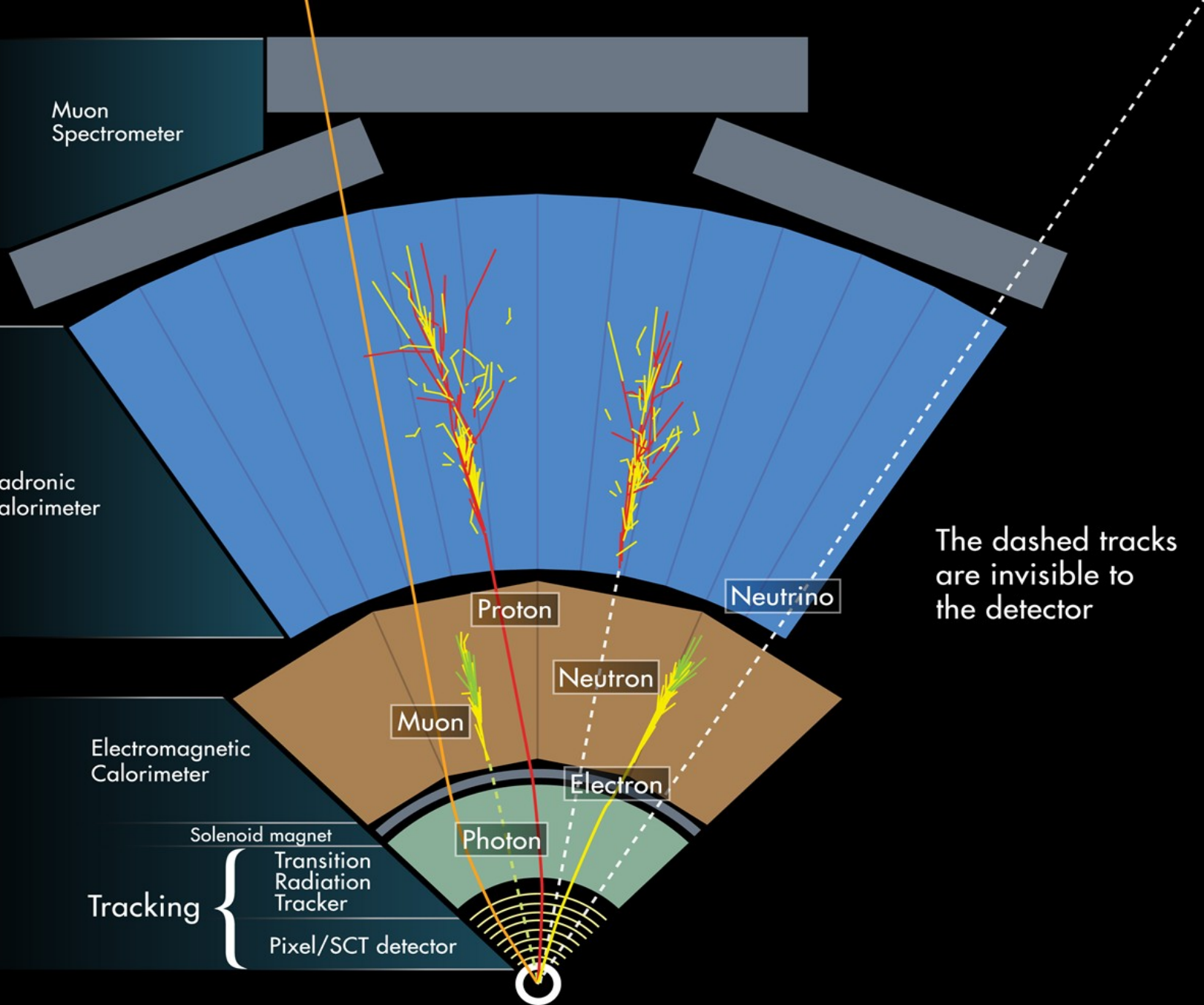
Neutron

Electron

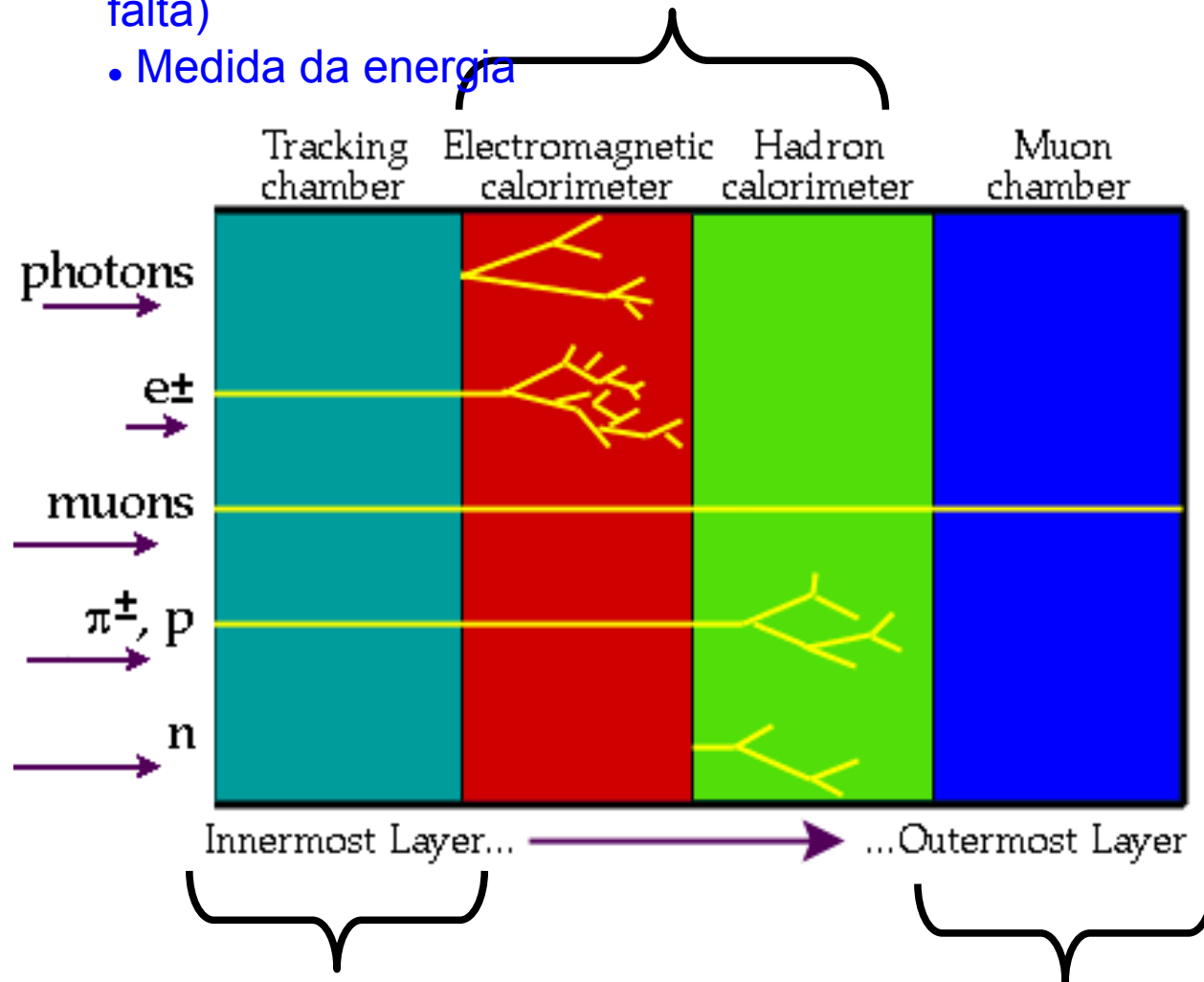
Photon

Neutrino

The dashed tracks
are invisible to
the detector



- Identificação de objectos (electrões, fótons, jactos, energia em falta)
- Medida da energia

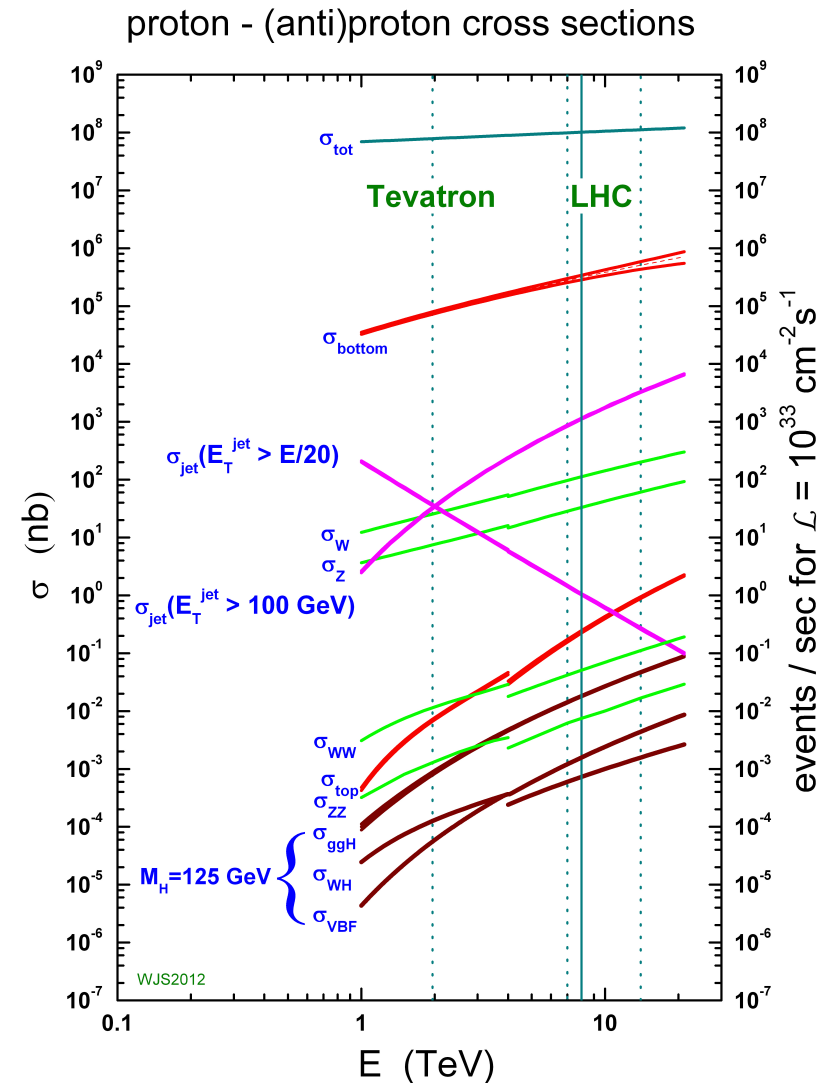
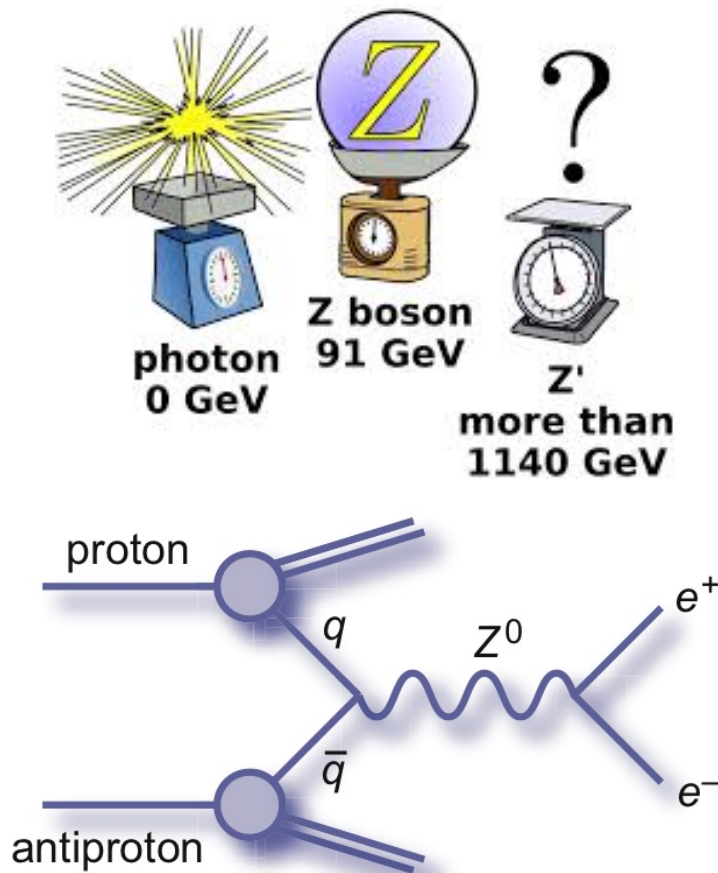


- Reconstrução de traços
- Determinação p_T e carga
- Vértices

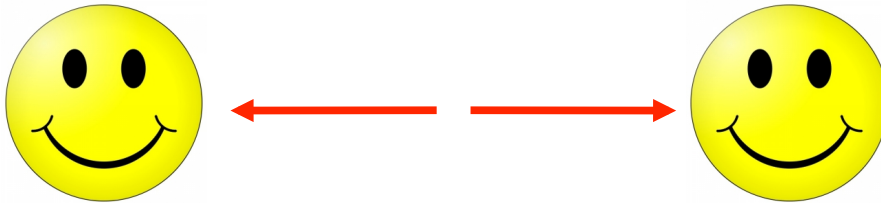
- Identificação de muões
- Melhor determinação do p_T

Como é que produzimos um bosão Z?

- É uma partícula instável ($\sim 10^{-25}$ s)
- Decai para quarks e leptões



Como é que detectamos o bosão Z?



- **Antes**

- $E_{\text{tot}} = m_Z c^2$
 - m_Z = massa do Z

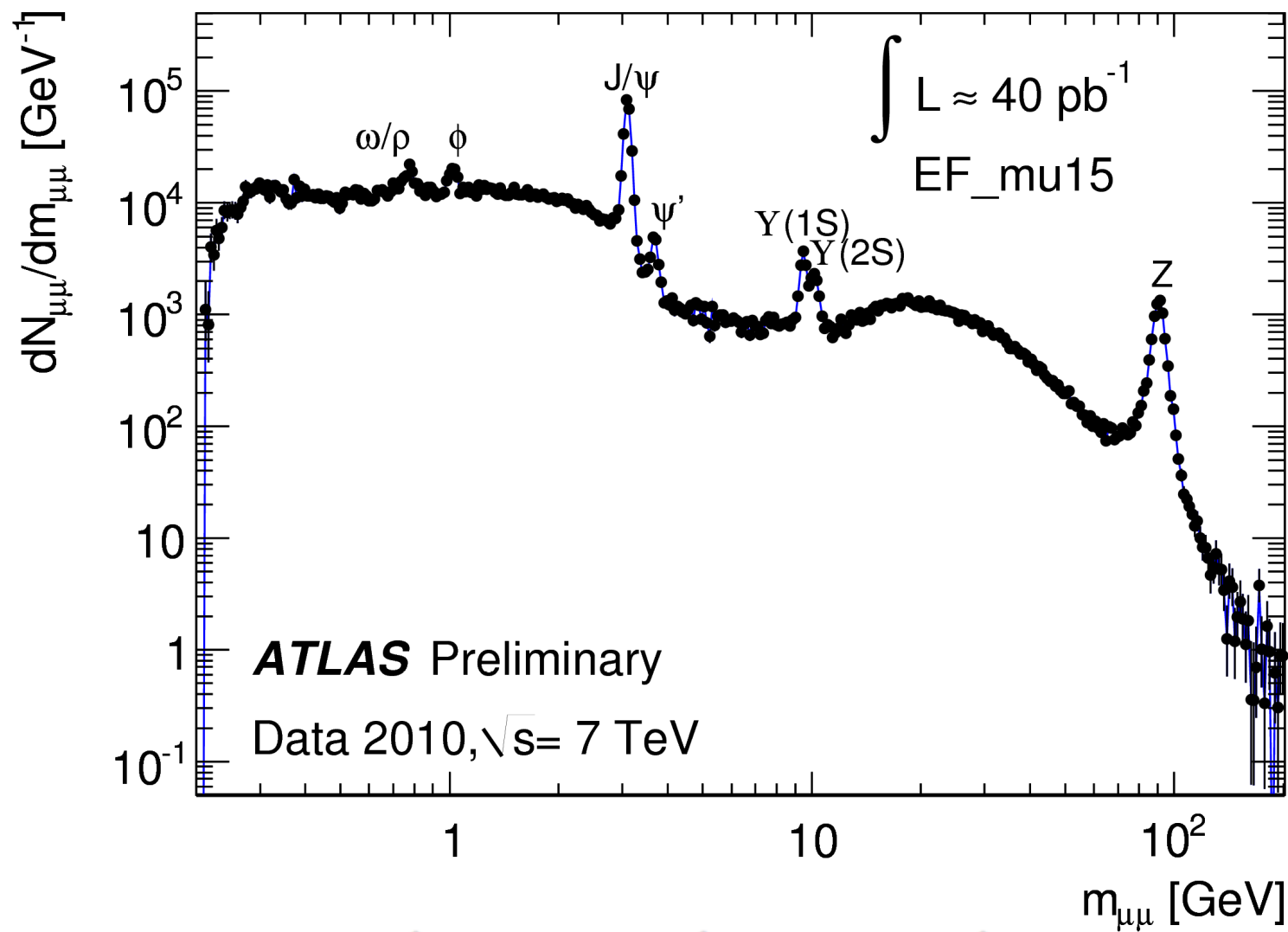
- **Depois**

- $E_{\text{tot}} = E_1 + E_2$
- $E_1 = E_2 = \frac{1}{2} m_Z c^2$

Na prática é mais complicado porque o bosão está em movimento, mas o princípio é o mesmo

$$m^2 = (E_1 + E_2)^2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2$$

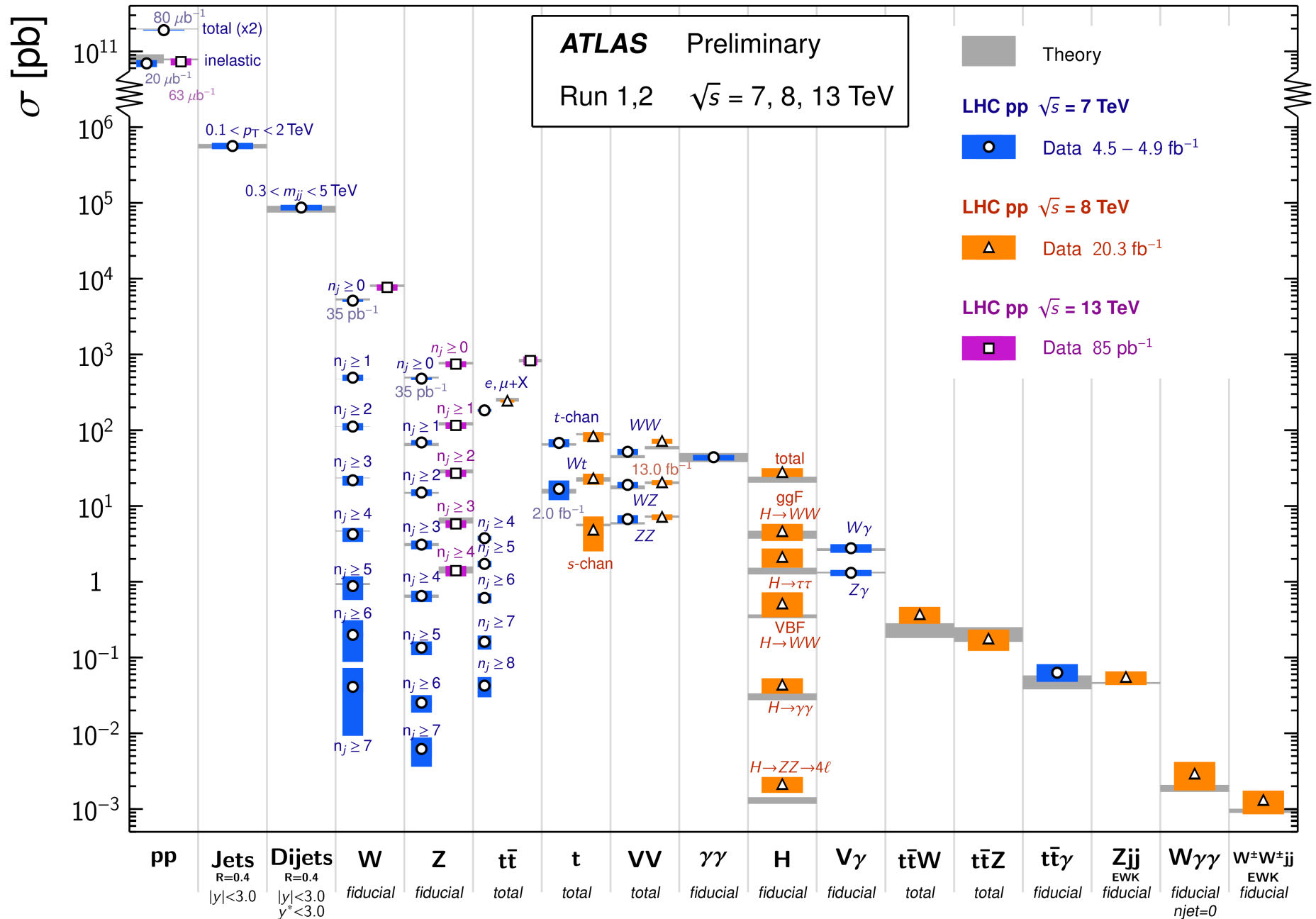
Massa invariante do estado final dá-nos a massa da partícula que decaiu



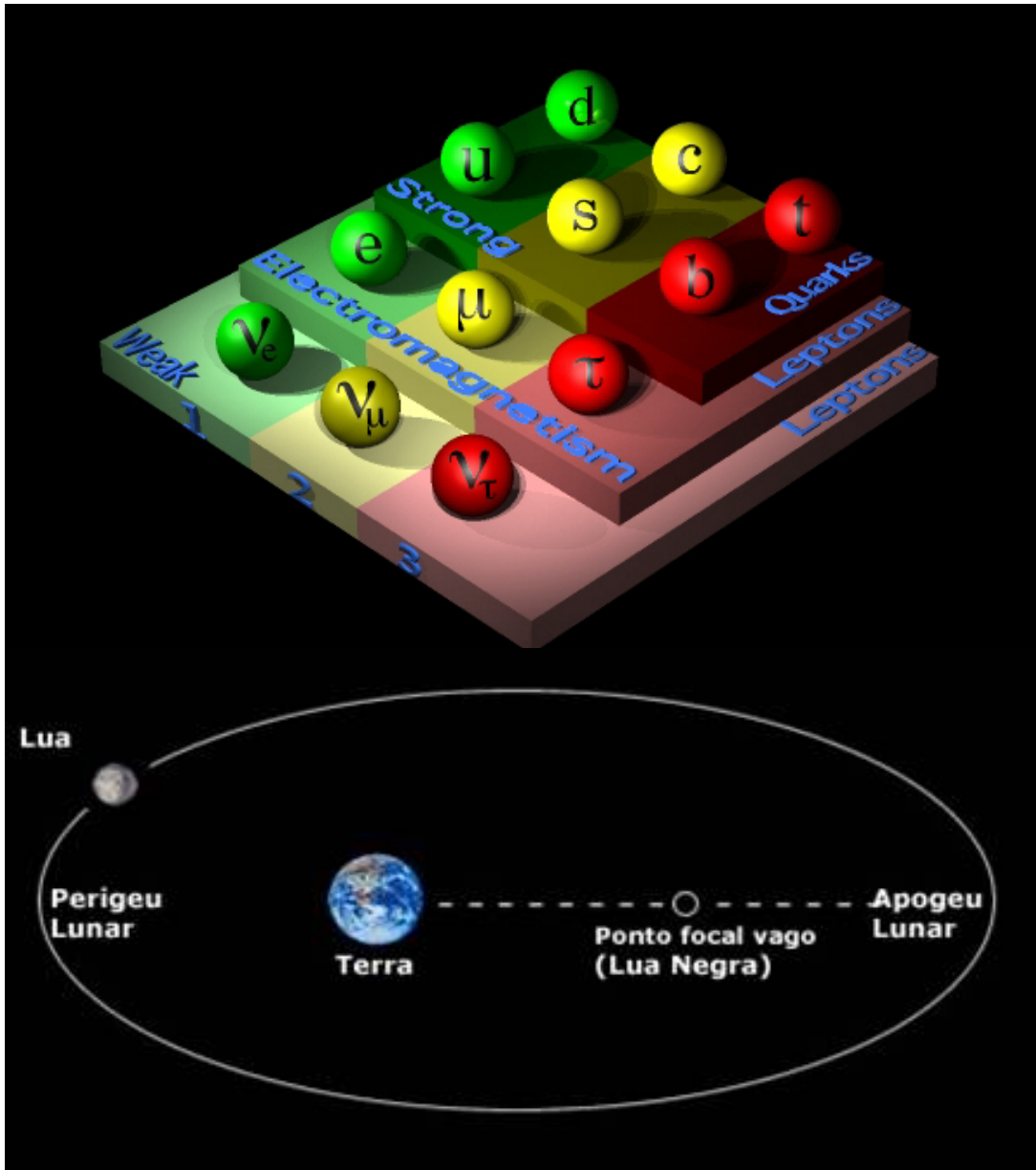
$$m^2 = (E_1 + E_2)^2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2$$

Standard Model Production Cross Section Measurements

Status: Nov 2015



Massa das partículas elementares



$$m_{\text{electrão}} = 0.5 \text{ MeV}$$



x 346000

$$m_{\text{top}} = 173 \text{ GeV}$$

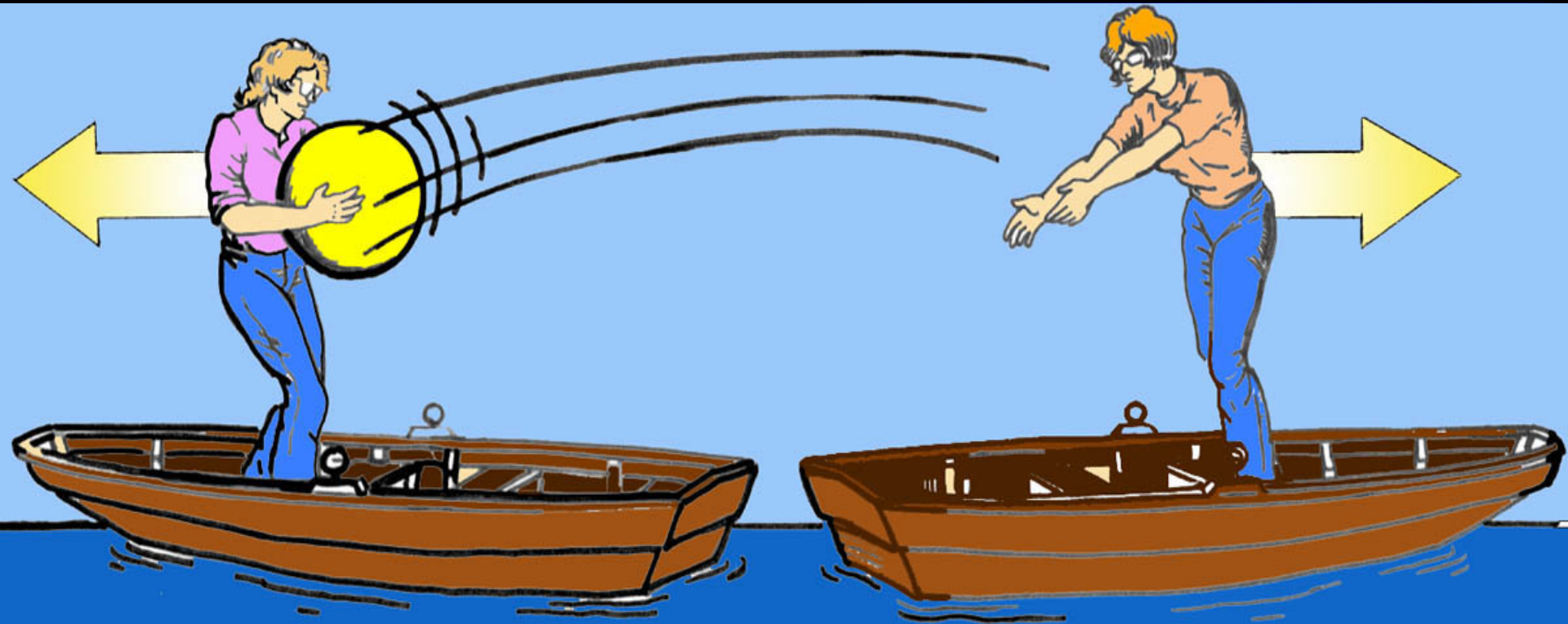
**Distância Terra-
Lua:**

350600 km e os
407000 km

As forças fundamentais

<i>Strong</i>	 Force which holds nucleus together	Strength 1	Range (m) 10^{-15} (diameter of a medium sized nucleus)	Particle gluons, π(nucleons)
<i>Electro-magnetic</i>		Strength $\frac{1}{137}$	Range (m) Infinite	Particle photon mass = 0 spin = 1
<i>Weak</i>	 neutrino interaction induces beta decay	Strength 10^{-6}	Range (m) 10^{-18} (0.1% of the diameter of a proton)	Particle Intermediate vector bosons W^+, W^-, Z_0, mass > 80 GeV spin = 1
<i>Gravity</i>		Strength 6×10^{-39}	Range (m) Infinite	Particle graviton ? mass = 0 spin = 2

As forças fundamentais



As forças fundamentais

Strong		Strength 1	Range (m) 10^{-15} (diameter of a medium sized nucleus)	Particle gluons, π (nucleons)
Electro-magnetic		Strength $\frac{1}{137}$	Range (m) Infinite	Particle photon mass = 0 spin = 1
Weak	 neutrino interaction induces beta decay	Strength 10^{-6}	Range (m) 10^{-18} (0.1% of the diameter of a proton)	Particle Intermediate vector bosons W^+ , W^- , Z_0 , mass > 80 GeV spin = 1
Gravity		Strength 6×10^{-39}	Range (m) Infinite	Particle graviton ? mass = 0 spin = 2

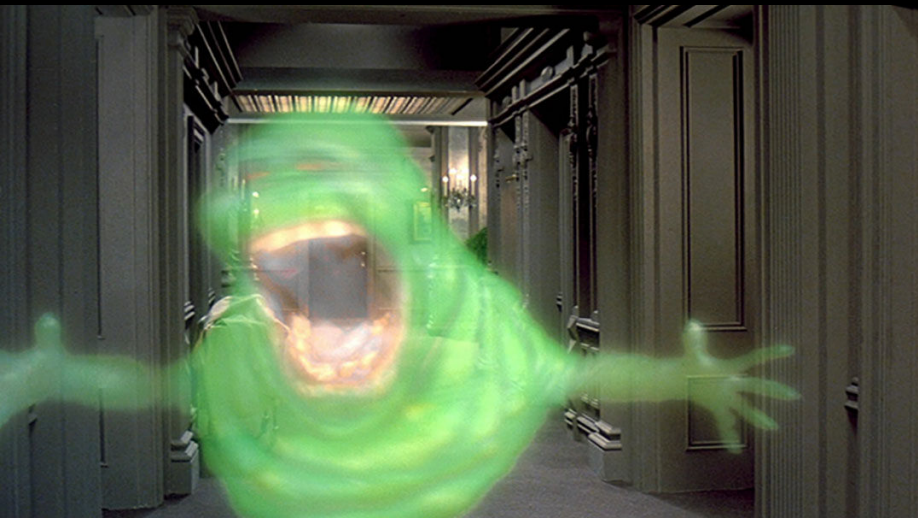
8 glúões (g)

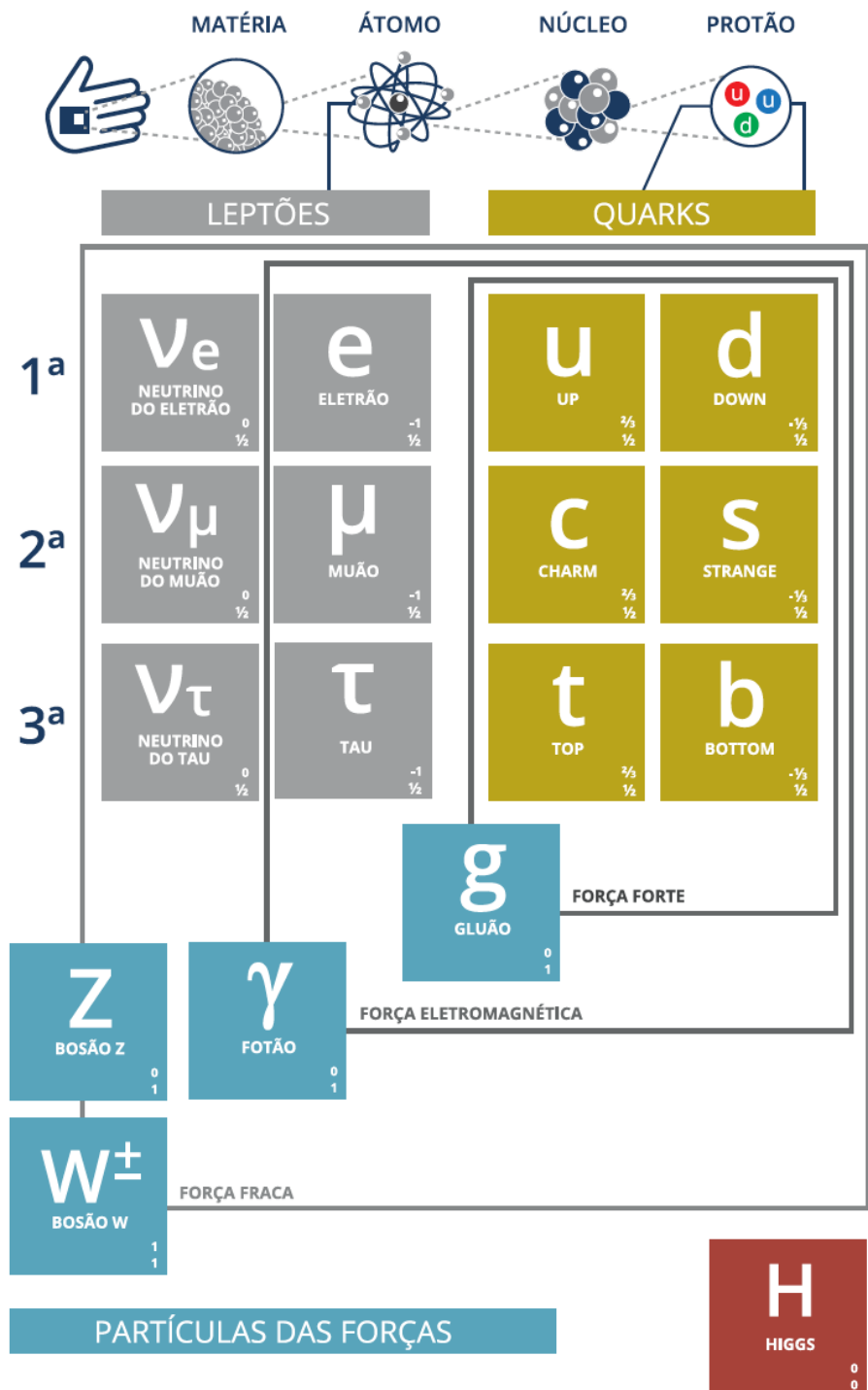
fotão (γ)

$W^+ W^- Z^0$

gravitão?

O Que está errado nestas imagens?





Sumário...

Além disso:

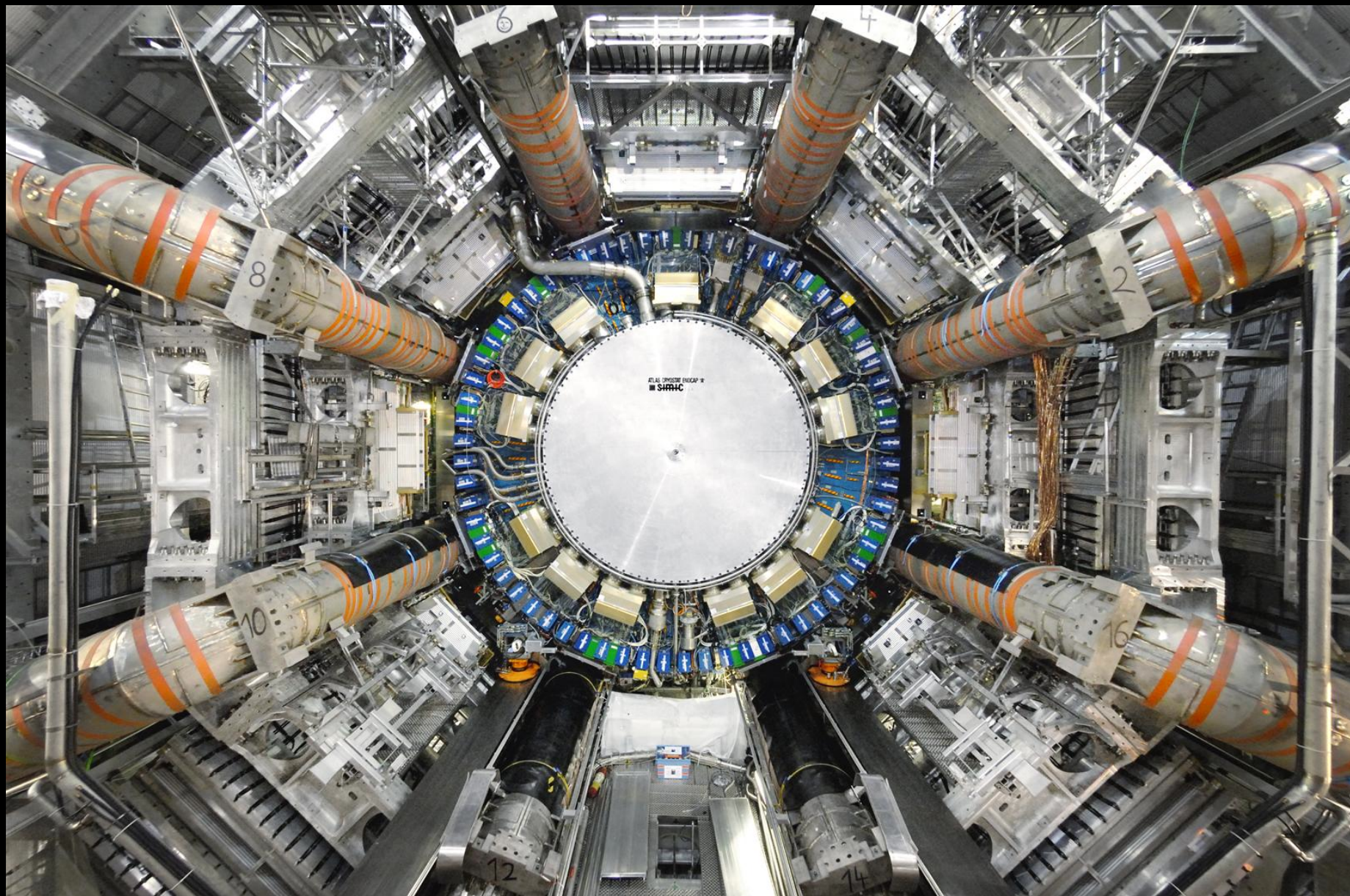
Por cada partícula fundamental existe uma anti-partícula (a antimatéria)

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

PARTÍCULAS DE MATÉRIA

Perguntas???

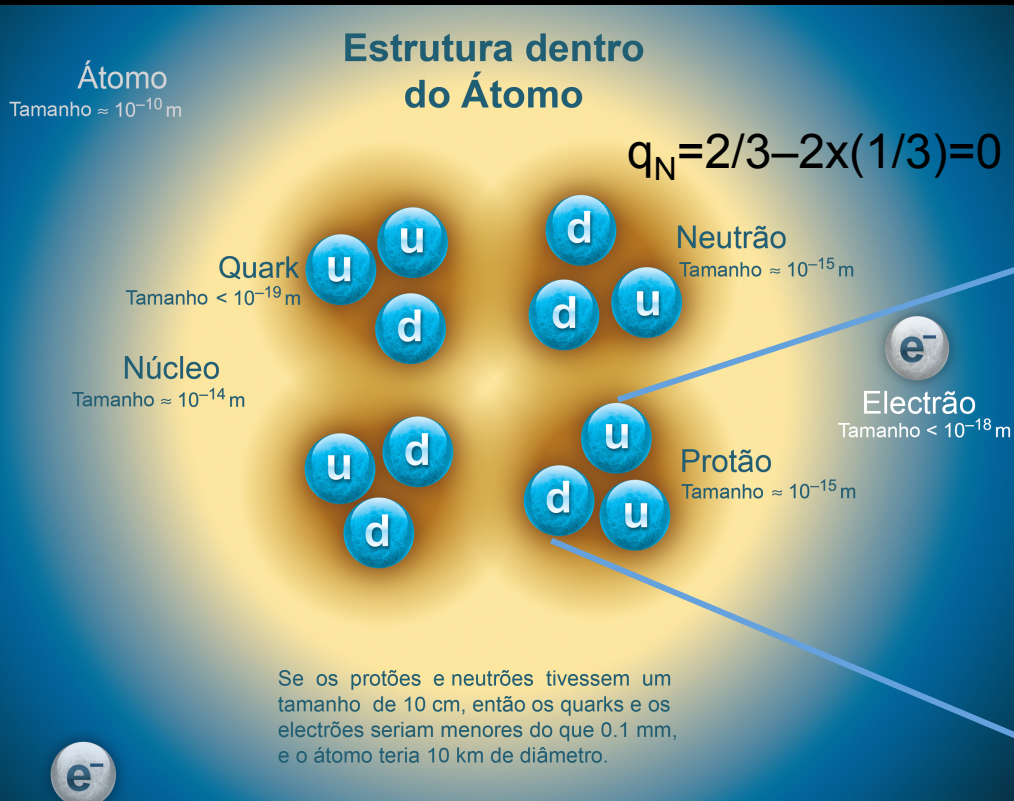




Quarks

Anti-Quarks Gluões

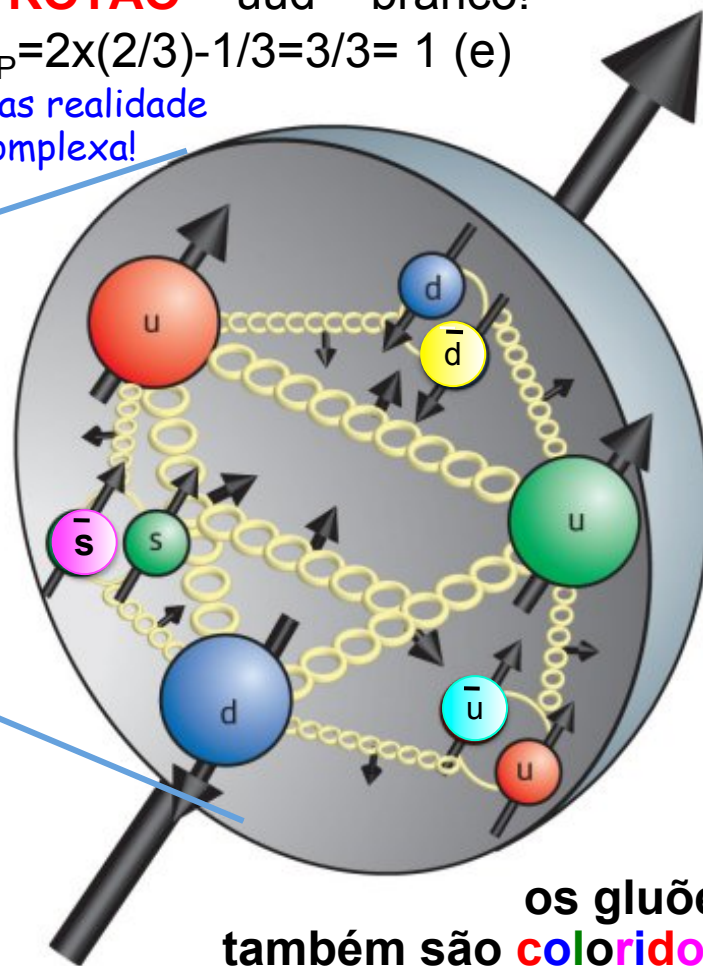
Nome Quark	Carga Eléctrica	Spin [h/(2π)]	"Cor" (r,g,b)
u (up)	+2/3 (e)	+1/2	● ● ●
d (down)	-1/3 (e)	+1/2	● ● ●



PROTÃO = uud = branco!

$$q_P = 2 \times (2/3) - 1/3 = 3/3 = 1 \text{ (e)}$$

mas realidade complexa!



os gluões também são coloridos

Contudo, $m_p = 0,938 \text{ GeV}/c^2 \approx 1 \text{ GeV} \gg \Sigma m_q$