

Desafios em Física de Partículas

A nossa compreensão da estrutura da matéria
A nossa INcompreensão da estrutura do universo

Pedro Abreu
LIP, IST

abreu@lip.pt



Escola de Professores no CERN em Língua Portuguesa

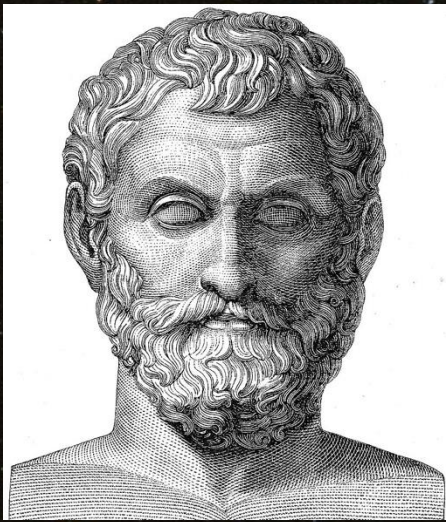
CERN, 6 de setembro de 2024



Universo visto pelos Egípcios(Nut – Deusa dos Céus), ~2000 a.C.



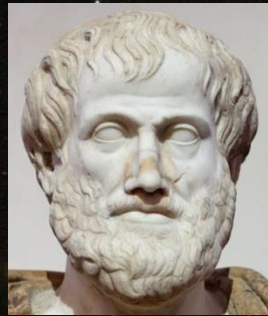
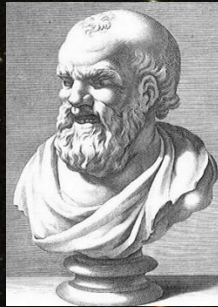
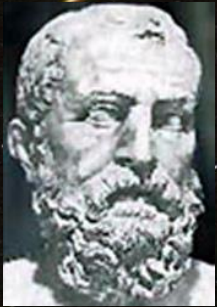
Nascimento da razão “pura”



Thales de Mileto, séc. VII a.C.:
o universo é feito de água!

Leucipo e Democritus, séc. V a.C.:
o universo é feito de Á-Tomos(*)

Empédocles, séc. V a.C.: os 4 elementos!



+quintessência

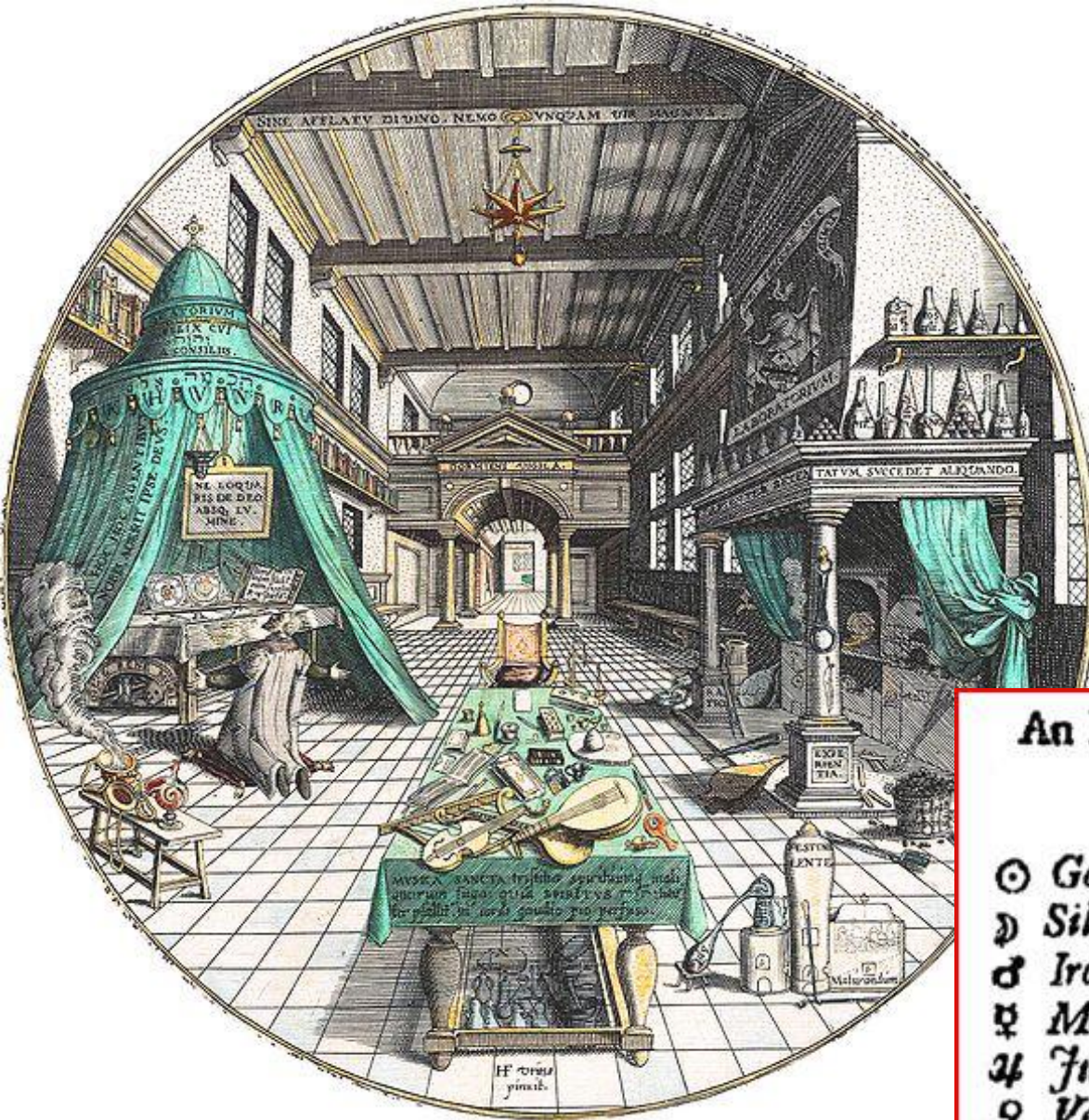
(Aristóteles, séc. 3 a.C.)



(*) ideia do átomo já introduzido na Índia no séc. ~VI a.C.

Idade Média, Europa: EXPERIMENTAÇÃO!

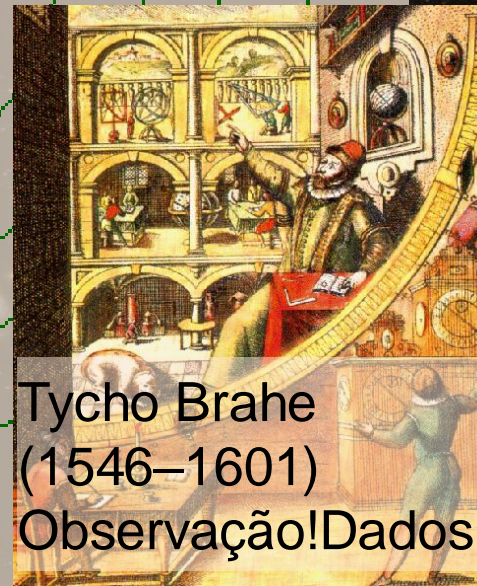
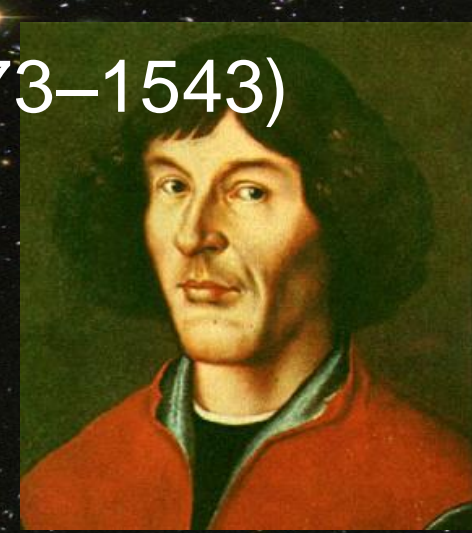
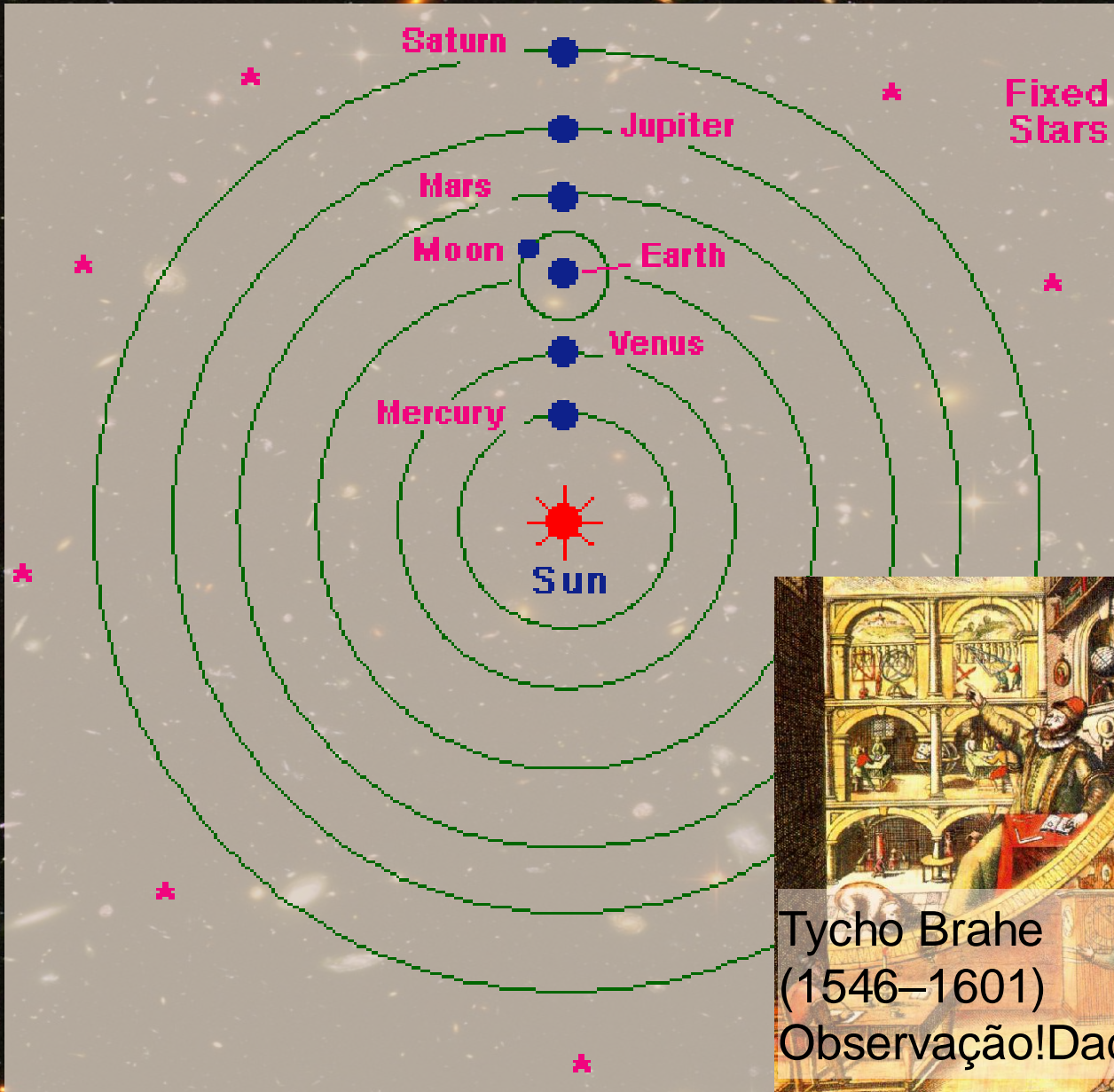
Laboratório de um alquimista



An Explication of the Characters which
are used in this Book.

☉ Gold.	A. F. <i>Aqua Fortis.</i>
♃ Silver.	A. R. <i>Aqua Regis.</i>
♁ Iron.	S. V. <i>Spirit of Wine.</i>
☿ Mercury.	☉ Sublimate,
♃ Jupiter.	☿ Precipitata.
♀ Venus.	☉☉☉ Amalgama.
♁ Lead.	▽ Water.
♁ Antimony.	△ Fire,
✽ Sal armoniac.	

Uma REVOLUÇÃO! COPERNICUS (1473–1543)



Tycho Brahe (1546–1601) Observação! Dados!

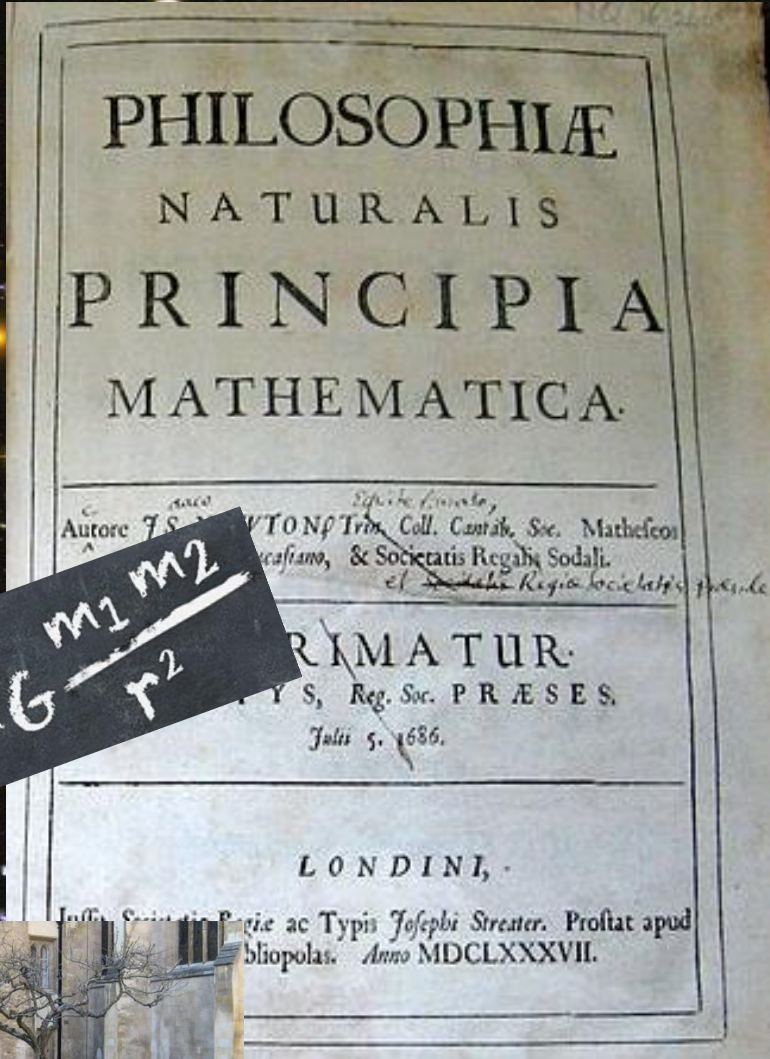
Sobre a **revolução** das órbitas celestiais

Idade Moderna, Europa: EXPERIMENTAÇÃO \Leftrightarrow TEORIA!

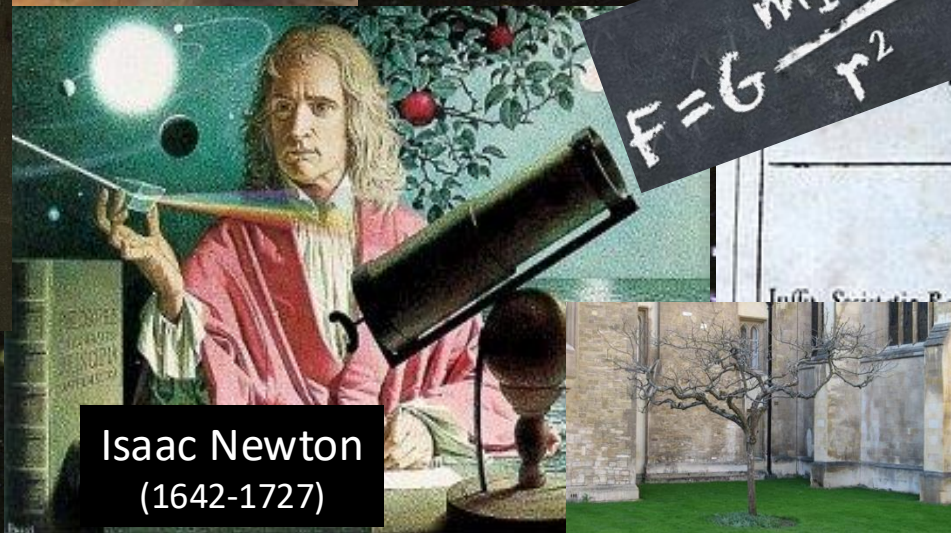
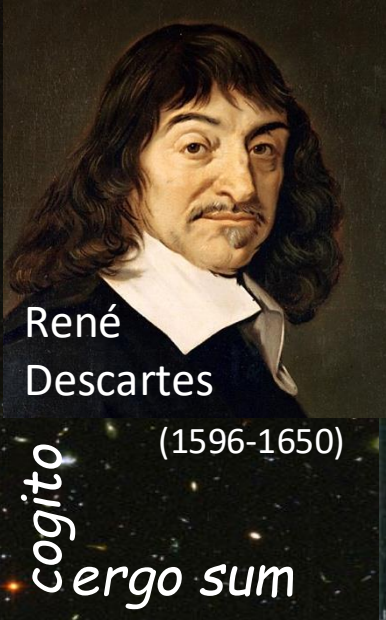


Física!:

Princípios
Matemáticos
da Filosofia
da Natureza!



$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$



O MODELO PADRÃO DAS PARTÍCULAS E INTERACÇÕES FUNDAMENTAIS



O Modelo Padrão é uma teoria quântica que resume o nosso conhecimento actual da física das partículas e interacções fundamentais (as interacções manifestam-se através das forças e dos decaimentos das partículas instáveis).

FERMIÕES

constituintes da matéria
spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...

Leptões spin = 1/2			Quarks spin = 1/2		
Sabor	Massa GeV/c ²	Carga Eléctrica	Sabor	Massa Aprox. GeV/c ²	Carga Eléctrica
ν_L neutrino* mais leve	$(0-2) \times 10^{-9}$	0	u up	0.002	2/3
e electrão	0.000511	-1	d down	0.005	-1/3
ν_M neutrino* intermédio	$(0.009-2) \times 10^{-9}$	0	c charm	1.3	2/3
μ muão	0.106	-1	s strange	0.1	-1/3
ν_H neutrino* pesado	$(0.05-2) \times 10^{-9}$	0	t top	173	2/3
τ tau	1.777	-1	b bottom	4.2	-1/3

*Ver em baixo o parágrafo sobre neutrinos.

Spin é o momento angular intrínseco das partículas. O spin é dado em unidades de \hbar , que é a unidade quântica de momento angular, com $\hbar = h/2\pi = 6.58 \times 10^{-25}$ GeV s $= 1.05 \times 10^{-34}$ J s.

Cargas eléctricas são dadas em unidades de carga eléctrica do próton. Em unidades SI, a carga eléctrica do próton é 1.60×10^{-19} coulomb.

A unidade de Energia

ao atravessar a difere em que 1 GeV = 10^9 e A massa do próton é

Neutrinos

Os neutrinos são produzidos no Sol, supernovas, reactores nucleares, colisões em aceleradores, e muitos outros processos. Qualquer neutrino pode ser descrito como um de três estados de sabor de neutrinos: ν_u , ν_d ou ν_e , de acordo com o tipo de leptão associado na sua produção. Cada estado destes é uma mistura quântica de três estados de massa de neutrinos ν_L , ν_M , e ν_H , para os quais os intervalos de massas são indicados na tabela. O estudo dos neutrinos pode ajudar à compreensão da assimetria matéria-antimatéria e da evolução das estrelas e das estruturas das galáxias.

Matéria e Antimatéria

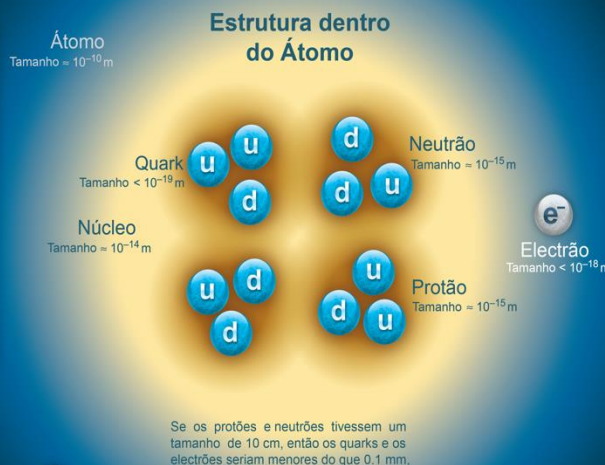
Para cada tipo de partícula existe o correspondente tipo de antipartícula, indicado com uma barra sobre o símbolo da partícula (excepto se se mostrar a carga + ou -). A partícula e a antipartícula têm a mesma massa e spin mas cargas eléctricas opostas. Alguns bósons electricamente neutros (por ex., Z^0 , γ , e $\eta_c = c\bar{c}$, mas não $K^0 = d\bar{s}$) são as próprias antipartículas.

Processos com Partículas

Estes diagramas são concepções artísticas. Áreas alaranjadas representam as nuvens de glúons.

Um neutrão livre (udd) decai para um próton (uud), um electrão, e um antineutrino, através de um bóson W virtual (mediador). Este é o decaimento β (beta) do neutrão.

Um electrão e um positrão (antielectrão), colidindo a altas energias, podem aniquilar-se para produzir mesões B^0 e B^0 por meio de um bóson Z ou fóton virtuais.



BOSÕES

mediadores da força
spin = 0, 1, 2, ...

Electrofraca spin = 1			Forte (cor) spin = 1		
Nome	Massa GeV/c ²	Carga Eléctrica	Nome	Massa GeV/c ²	Carga Eléctrica
γ fóton	0	0	g glúão	0	0
W⁻ bósons W	80.39	-1	Bosão de Higgs spin = 0		
W⁺ bósons W	80.39	+1	Nome	Massa GeV/c ²	Carga Eléctrica
Z bóson Z	91.188	0	H Higgs	126	0

Bosão de Higgs

O bóson de Higgs é um elemento fundamental do Modelo Padrão. A sua descoberta confirma o mecanismo pelo qual as partículas elementares adquirem massa.

Carga de cor

Só os quarks e os glúons é que possuem "carga de cor" e são sensíveis à interacção forte. Cada quark pode ter uma de três cores ("vermelho", "verde", "azul"). Mas estas não têm nada que ver com as cores da luz visível. Tal como as partículas electricamente carregadas interagem trocando

<http://www.cpepphysics.org/fundamental-particles.htm>

Propriedade	Interacção Gravitónica	Interacção Fraca (Electrofraca)	Interacção Electro magnética	Interacção Forte
Actua em:	Massa – Energia	Sabor	Carga Eléctrica	Carga de cor
Partículas afectadas:	Todas	Quarks, Leptões	Electricamente carregadas	Quarks, Glúões
Partículas mediadoras:	Gravitão (ainda por observar)	W⁺ W⁻ Z⁰	γ	Glúões
Intensidade a $\left\{ \begin{array}{l} 10^{-18} \text{ m} \\ 3 \times 10^{-17} \text{ m} \end{array} \right.$	10^{-41}	0.8	1	25
	10^{-41}	10^{-4}	1	60

forças de cor entre elas aumenta. Esta energia pode ser convertida em sucessivos pares quark-antiquark. Estes quarks (q) e antiquarks (\bar{q}) combinam-se em hadrões, que são as partículas observáveis.

Dois tipos de hadrões foram observados na natureza: mesões $q\bar{q}$ e bárions qqq . Entre os muitos tipos de bárions observados temos o próton (uud), antipróton ($\bar{u}\bar{u}\bar{d}$), e neutrão (udd). As cargas eléctricas dos quarks somam-se para o próton ter carga 1 e o neutrão carga 0. Entre os vários tipos de mesões temos o píon $u\bar{d}$ (π^+), kaão K^+ ($s\bar{u}$), e B^0 ($d\bar{s}$).

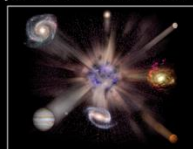
Saiba mais em ParticleAdventure.org



Mistérios por resolver

Motivados por novas questões na nossa compreensão física do Universo, os físicos de partículas seguem caminhos diferentes na direcção de novas descobertas maravilhosas. As experiências poderão vir a encontrar dimensões extra de espaço, buracos negros microscópicos, ou sinais da teoria das cordas.

Porque acelera o Universo?



A expansão do Universo parece estar a acelerar. Será devido à Constante Cosmológica de Einstein? Se não, poderão as experiências vir a revelar novas forças da Natureza ou até dimensões (escondidas) de espaço?

Onde está a Antimatéria?



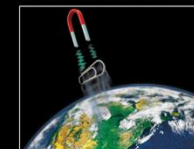
Matéria e antimatéria terão sido criadas em iguais quantidades no Big Bang. Porque é que agora vemos só matéria, à excepção de quantidades diminutas de antimatéria criadas em laboratório ou nos Raios Cósmicos?

O que é a Matéria Escura?



Grande parte da massa observada nas galáxias e aglomerados de galáxias é formada por matéria invisível. Pode esta matéria escura ser feita de novos tipos de partículas que apenas interagem fracamente com a matéria normal?

Existem Dimensões Extra?

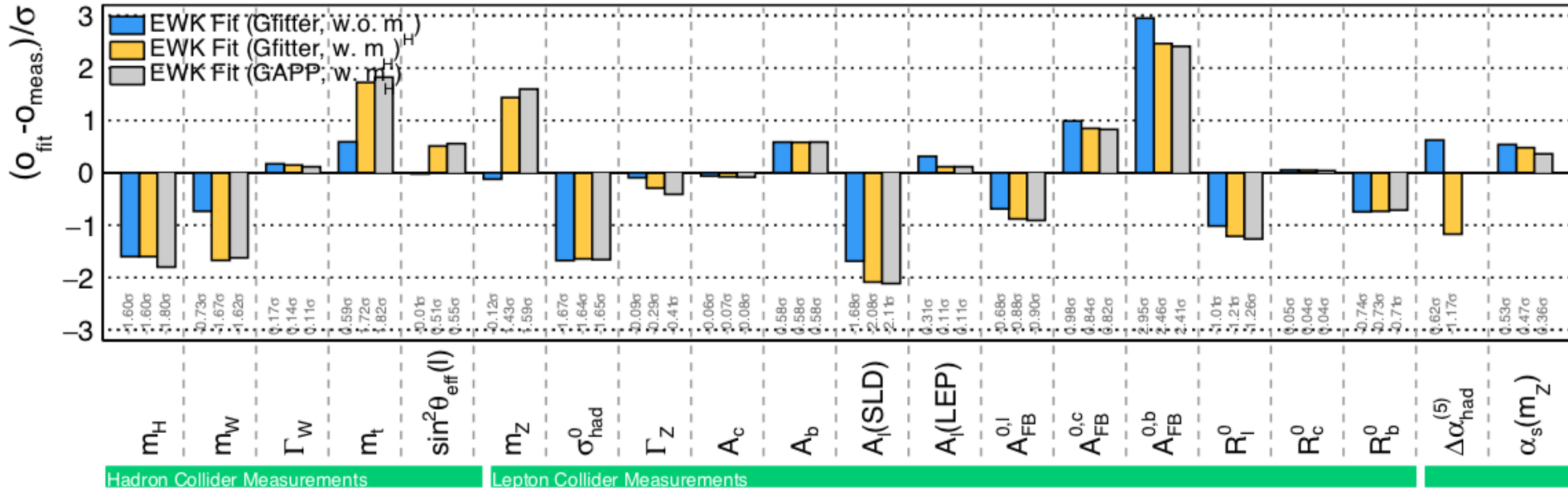


Uma indicação para dimensões extra de espaço pode ser a baixíssima intensidade da força gravitativa, quando comparada com as outras três forças fundamentais da Natureza (um íman pode levantar um clipe, sobrepondo-se à gravidade exercida por todo o planeta Terra).

Concordância com o Modelo Padrão



O = Observável ; mostra-se (Obs.esperado – Obs.medido)/Incerteza_medida



A medida mais precisa em física – o momento magnético do elétron(*):

$$\mu_e = -\frac{g}{2} \mu_B \frac{S}{\hbar/2}$$

$$a_e = \frac{g-2}{2} = 0.001159652181606(230) \text{ (teor.)}$$

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e} \left. \frac{g}{2} \right|_e = 1$$

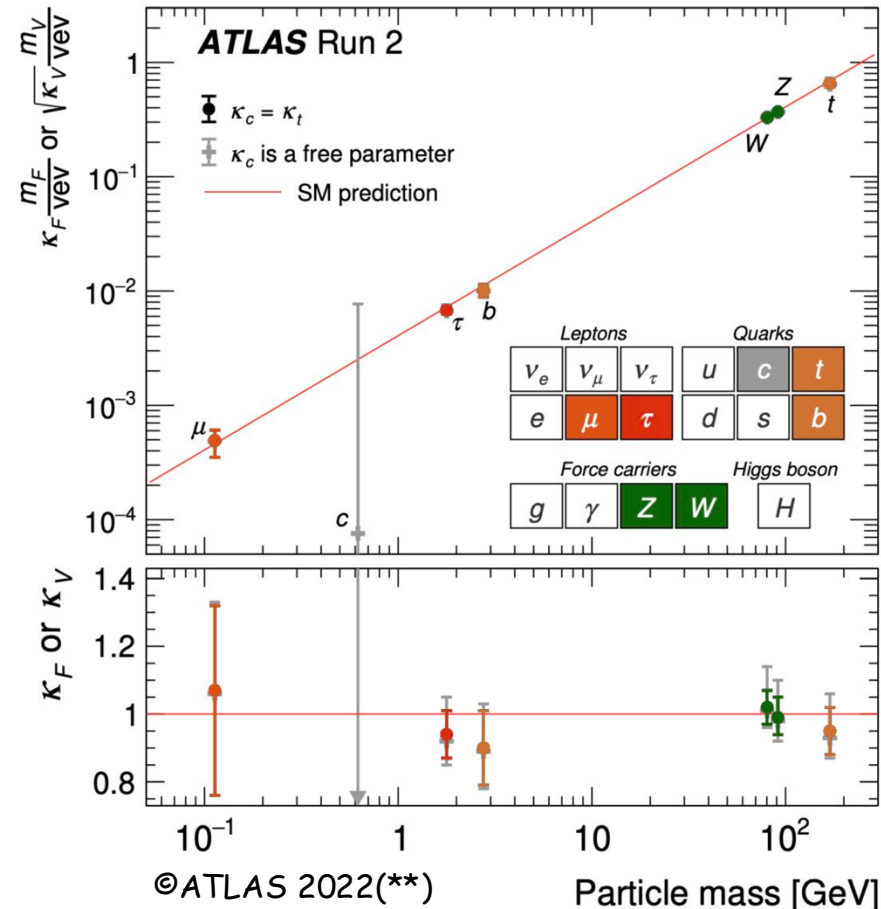
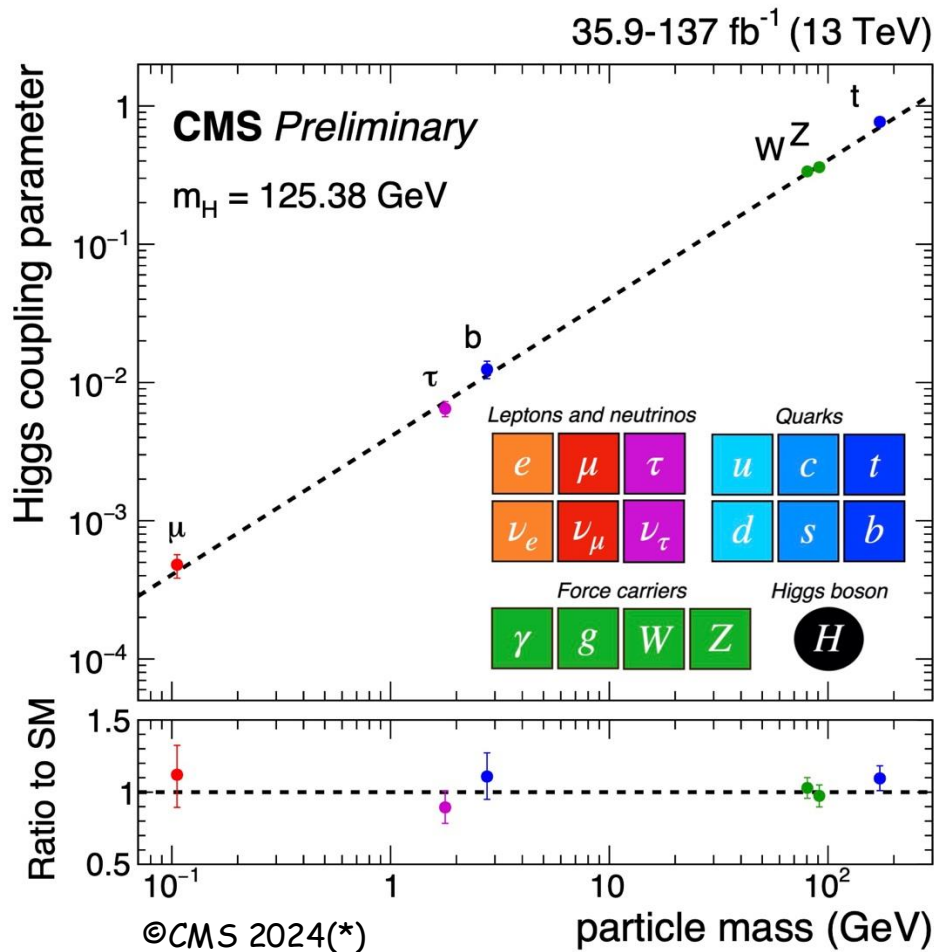
$$a_e = \frac{g-2}{2} = 0.001159652180590(130) \text{ (exp.)}$$

(*)X.F.,T.G.M.,B.A.D.S.,G.Gabrielse, PRL130,071801(2023) (teoria em Atoms 2019, 7(1), 28)

Bosão de Higgs = Bosão de Higgs da Teoria Padrão



“Acoplamento” proporcional à massa



(*) M. Gallinaro - "The Higgs boson and beyond" - April 13, 2024 (results from JHEP 01(2021)148.)

(**) Shuo Han, "Measurements of the Higgs boson couplings / cross sections and their interpretations at the ATLAS experiment", CIPANP 2022

Mas...muitos problemas sem resposta



PORQUÊ 3 FAMÍLIAS DE PARTÍCULAS ELEMENTARES ?!

Leptons spin = 1/2			Quarks spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c ²	Electric charge	Flavor	Approx. Mass GeV/c ²	Electric charge
ν_L electron neutrino*	$(0-2) \times 10^{-9}$	0	u up	0.002	2/3
e electron	0.000511	-1	d down	0.005	-1/3
ν_M muon neutrino*	$(0.009-2) \times 10^{-9}$	0	c charm	1.3	2/3
μ muon	0.106	-1	s strange	0.1	-1/3
ν_H tau neutrino*	$(0.05-2) \times 10^{-9}$	0	t top	173	2/3
τ tau	1.777	-1	b bottom	4.2	-1/3

Porquê esta distribuição de massas ?!

Porquê é que os neutrinos têm uma massa tão mais pequena ?!

Como é que os neutrinos têm massa?!

Mas...muitos problemas sem resposta



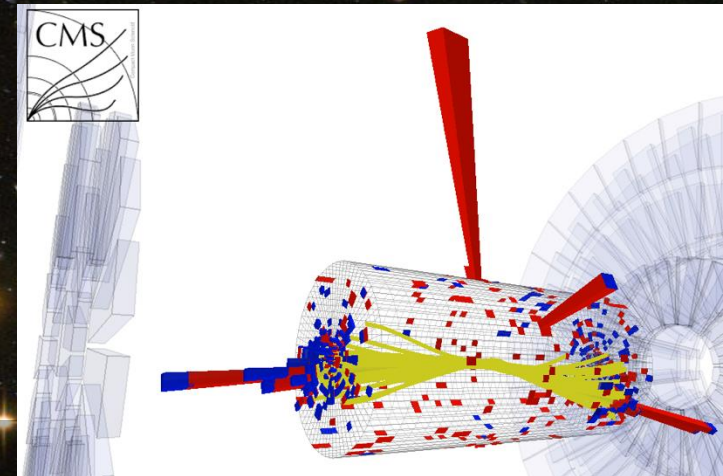
QUE ACONTECEU À ANTI-MATÉRIA NO BIG BANG ?!

Em todas as experiências no CERN, são produzidas iguais quantidades de matéria e anti-matéria

No Big Bang produziram-se iguais quantidades de matéria e anti-matéria

Mas vivemos num mundo (universo) dominado pela matéria

Há um [enorme] excesso de quarks (“cor”!) e de elétrões



Mas...muitos problemas sem resposta



O VALOR DA MASSA DO BOSÃO DE HIGGS !
(ou o problema da hierarquia)

O cálculo da massa do bosão de Higgs envolve vários termos
Termos podem ser tão grandes quanto a massa de Planck (10^{19} GeV)

(J.Varela)

$$m_h^2 = (m_h^2)_0 - \frac{1}{16\pi^2} \lambda^2 \Lambda^2 + \dots,$$

Tem que haver um cancelamento miraculoso para $m_H^2 = 125^2 \text{ GeV}^2$

$$(m_h^2)_0 = 314\,159\,265\,358\,979\,323\,846\,264\,338\,327\,950\,015\,625$$

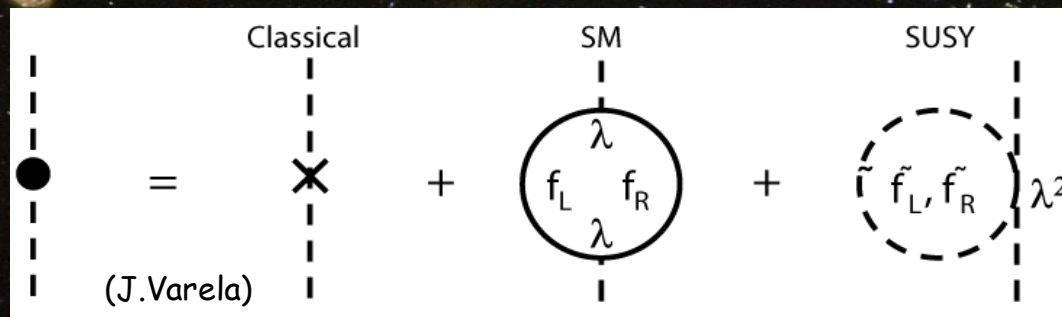
$$\lambda^2 \Lambda^2 / (16 \pi^2) = 314\,159\,265\,358\,979\,323\,846\,264\,338\,327\,950\,000\,000$$

Mas...muitos problemas sem resposta



Supersimetria ?!

Teoria que prevê parceiros para todas as partículas elementares do Modelo Padrão, com spin diferente de meia-unidade.



Cancelamento natural

$$m_h^2 = (m_h^2)_{\text{tree}} - \frac{1}{16\pi^2} \lambda^2 \Lambda^2 + \frac{1}{16\pi^2} \lambda^2 \Lambda^2 + \dots$$

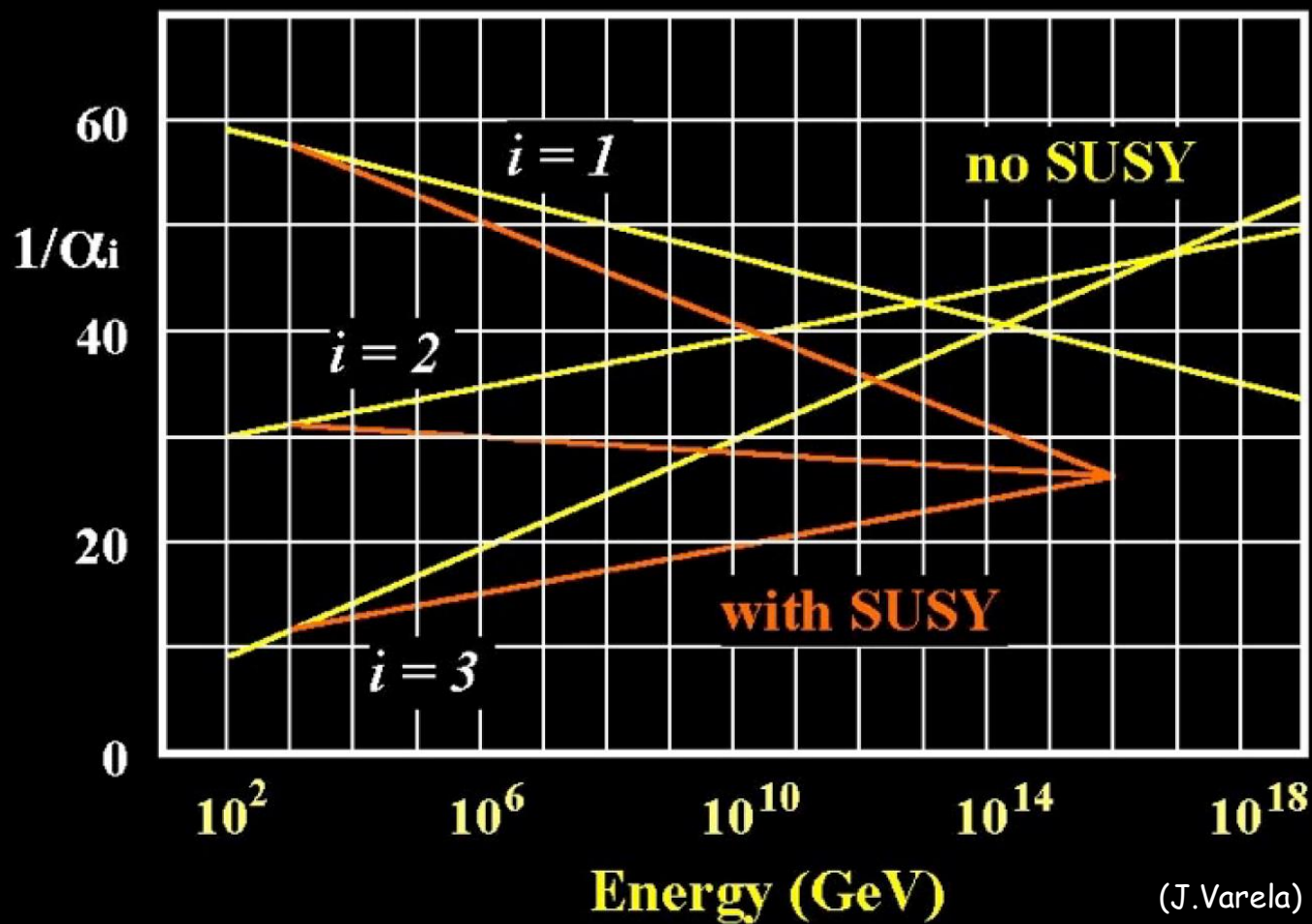
Teoria que prevê mais 4 bosões de Higgs (2 com carga elétrica)
...e prevê uma partícula estável, sem interação => Matéria Escura!

Contudo, massas dos parceiros supersimétricos têm de ser $< \sim 1-2 \text{ TeV}/c^2$

Mas...muitos problemas sem resposta



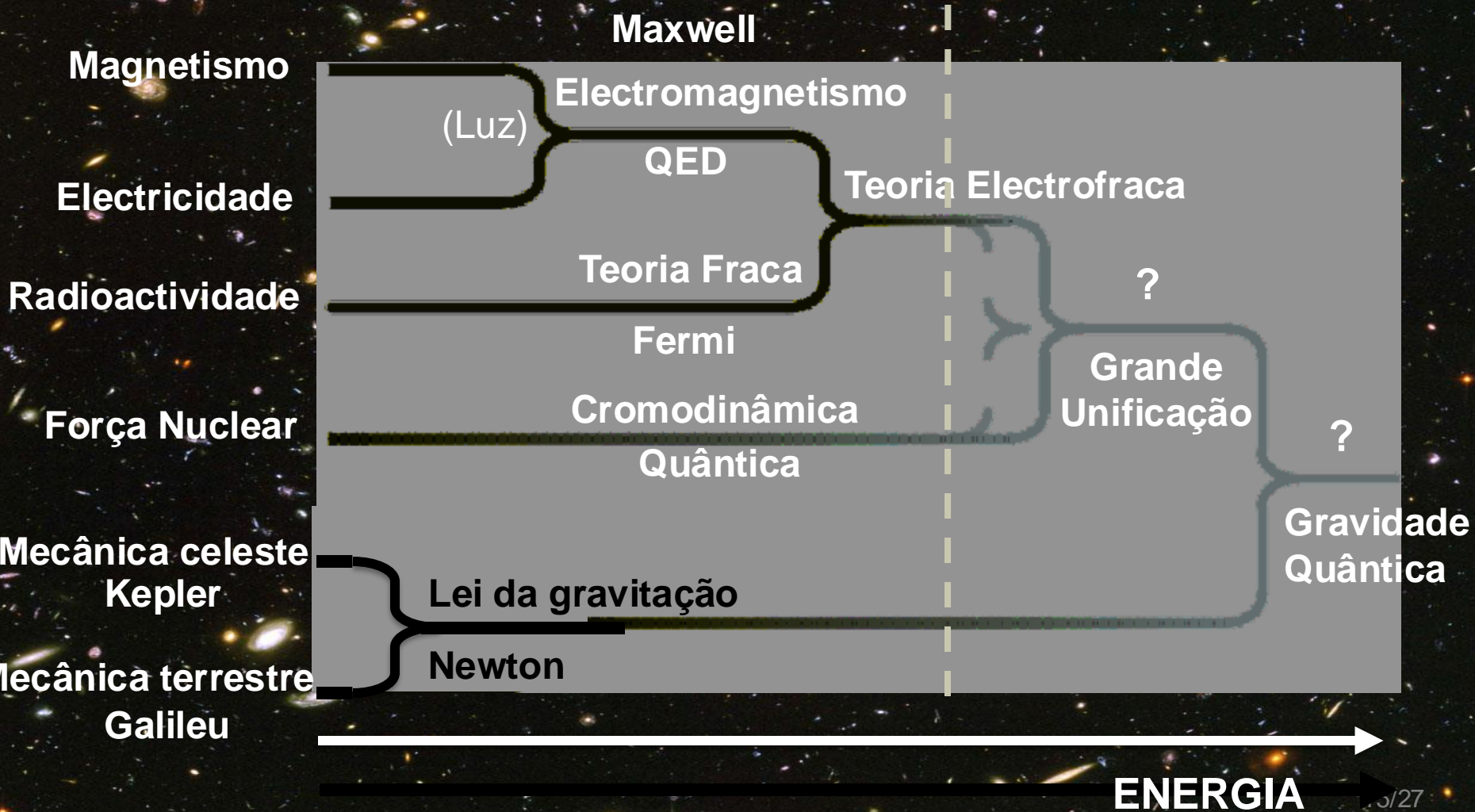
Unificação das Forças Fundamentais (com SuSy(?)) ?!



Mas...muitos problemas sem resposta



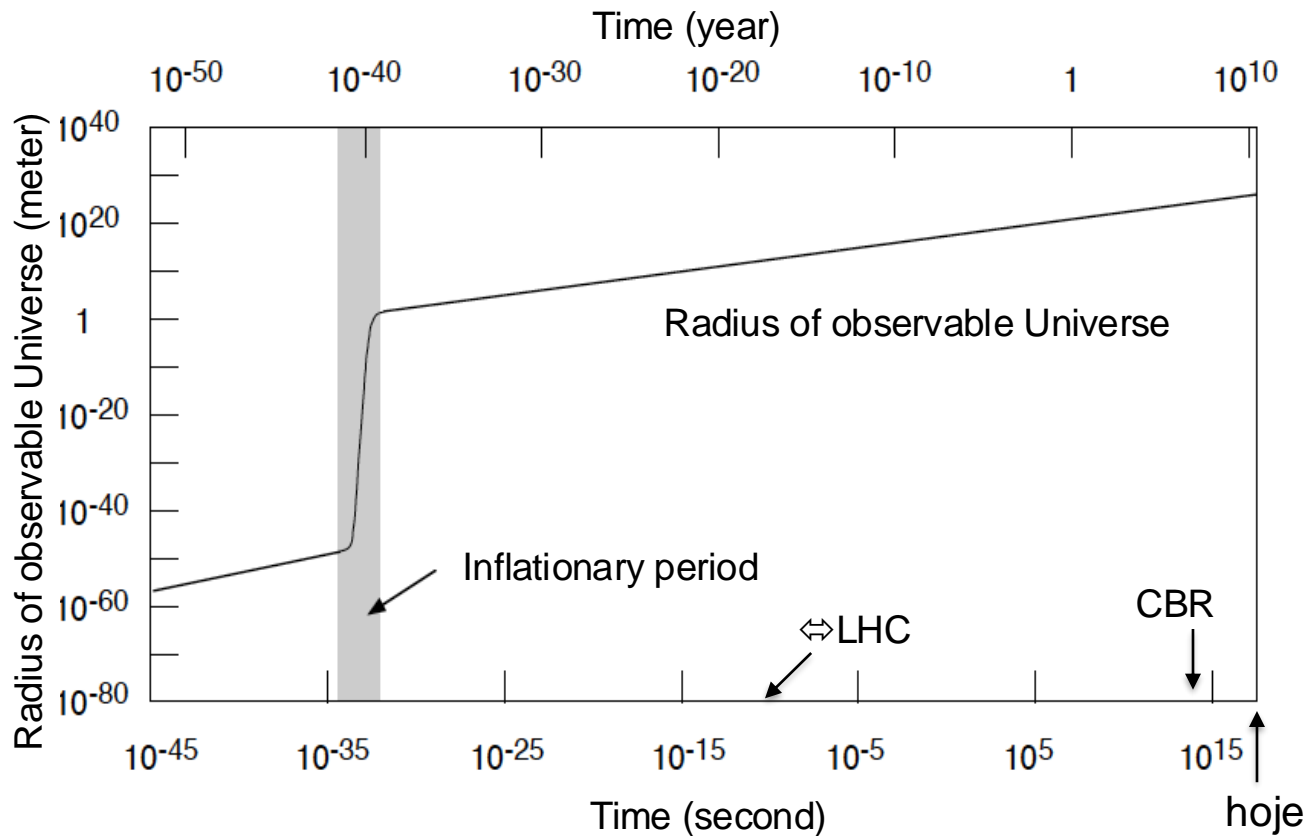
Unificação das Forças Fundamentais ?!



Inflação cosmológica



- **Teoria da inflação:** no universo primordial, o Universo terá sofrido uma expansão exponencial; (J.Varela)
- Explica porque é que o universo tem uma temperatura constante (2,725 K) e uma geometria plana.



A teoria da inflação foi desenvolvida independentemente nos 1970's por Alan Guth, Alexey Starobinsky, e outros

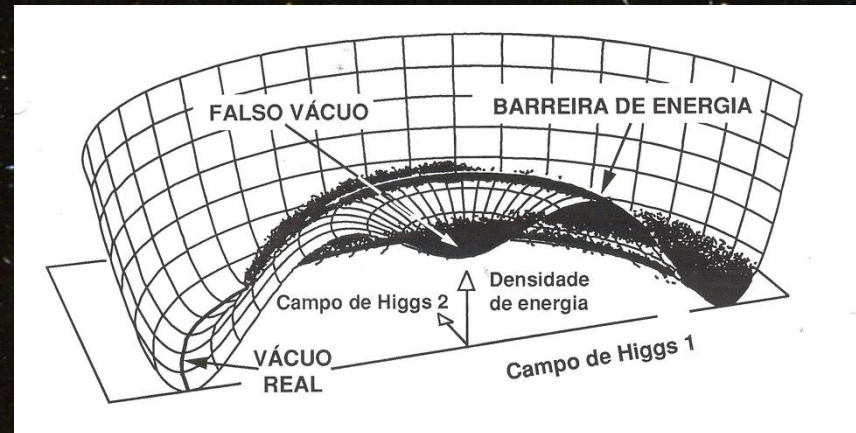
O campo de Higgs e a inflação



(J.Varela)

O modelo da inflação precisa de um campo tipo Higgs preenchendo todo o universo

Enquanto a densidade de energia deste campo for positiva, o universo expande a uma taxa acelerada (inflação)



A Inflação pára quando este campo tipo Higgs decai para o mínimo de densidade de energia.

A energia libertada pelo decaimento deste campo de Higgs é convertida em partículas de matéria (+antimatéria)

Será a energia escura devida a algum tipo de campo de Higgs?

A estimativa da densidade de energia do vazio, a partir da Teoria Padrão é 10^{120} vezes maior do que o valor da constante cosmológica medida!

Física de Partículas é Ciência em Grande

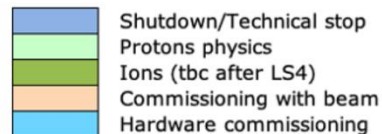
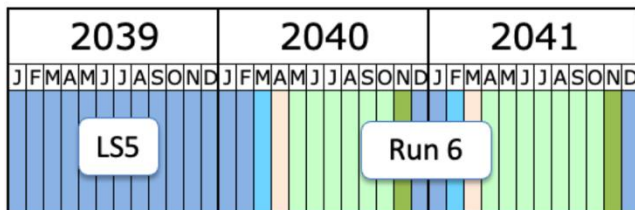
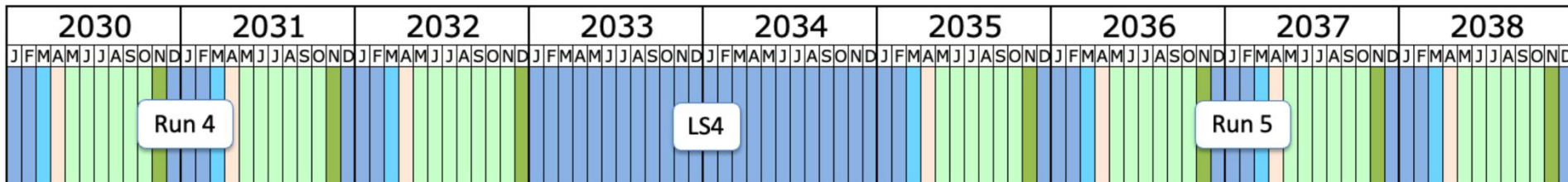
Não poderíamos fazer estas pesquisas sem aceleradores cada vez mais potentes?

Não haveria formas mais subtis de revelar os mistérios da Natureza?

Infelizmente, tanto quanto sabemos, a resposta a ambas as perguntas é NÃO.

A não ser que surjam algumas revoluções tecnológicas inesperadas, esta tendência manter-se-á.

O futuro do LHC



Motivos para o HL-LHC

LHC é o colisionador com a maior Energia e com a maior Luminosidade em funcionamento

→ Exploração plena ($E \sim 14$ TeV, 3000/fb) é obrigatória

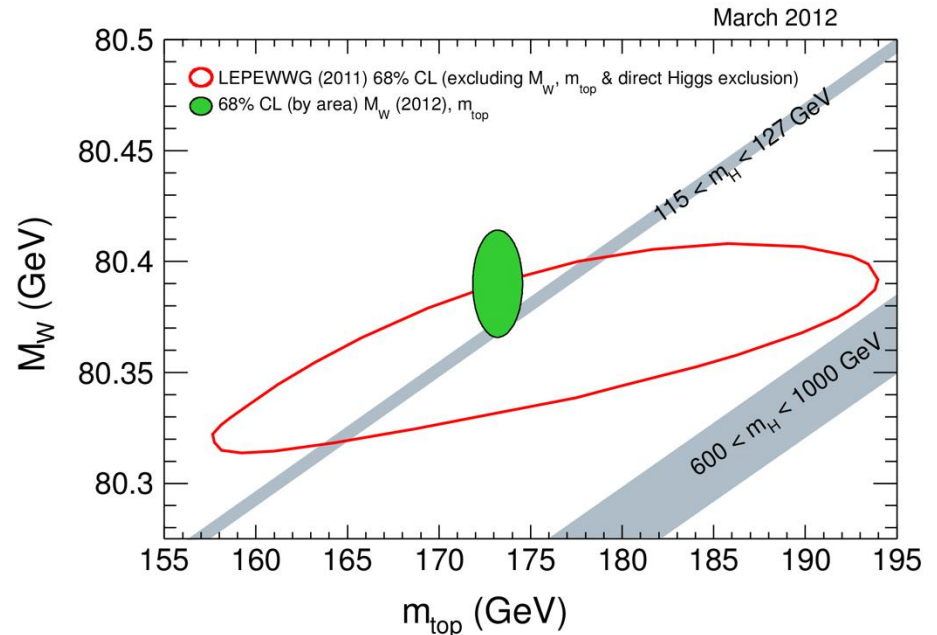
- ❑ Se nova física descoberta nos Runs 3-4:
 - Primeira exploração detalhada da nova física com uma máquina e experiências bem conhecidas

- ❑ Se não se descobrir nova física nos Runs 3-4:
 - Estende-se o potencial de descoberta por ~20-30% (até Massas ~8 TeV)
 - Em qualquer caso: medidas precisas das propriedades do Bosão de Higgs
 - Desvios relativamente à Teoria Padrão podem apontar direções para a nova física

O poder das medidas de precisão

A Teoria Padrão estabelece uma relação precisa entre as massas do bóson de Higgs, do quark top e do bóson W.

Mesmo antes da descoberta do bóson de Higgs, as medidas de precisão dos bósons W e Z feitas em colisões e^+e^- em LEP e do quark top em Fermilab apontavam para um bóson de Higgs leve.



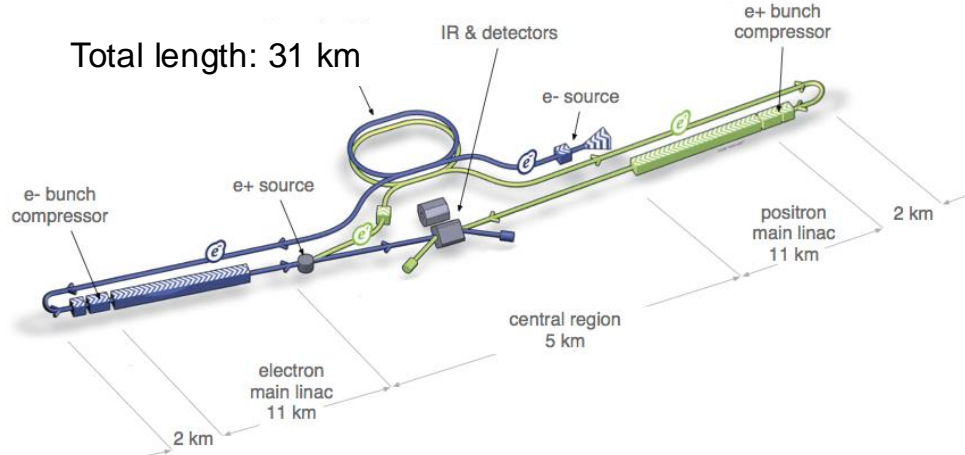
Medir desvios das propriedades do Bóson de Higgs relativas às previsões da Teoria Padrão, fornece uma excelente orientação para a Física para além da Teoria Padrão.

Uma precisão da ordem de 0.1-1% será necessária! Alta luminosidade será necessária.

Colisionadores $e^+ e^-$ lineares

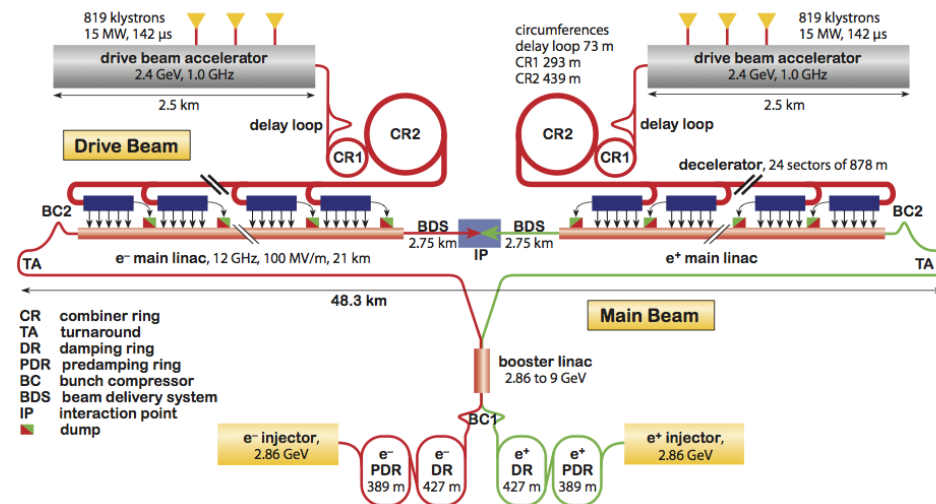
International Linear Collider (ILC)

- ❑ Máquina de 500 GeV: ~ 15000 cavidades SCRF, 31.5 MV/m
- Tecnologias maduras (20 anos de R&D em todo o mundo).
- Desafios: fonte de positrões; foco final (tamanhos de feixe em nm)
- ❑ Perspetivas
 - Japão interessado em ser anfitrião
 - Duração da construção ~10 years → física poderia começar em ~2035



Compact Linear Collider (CLIC)

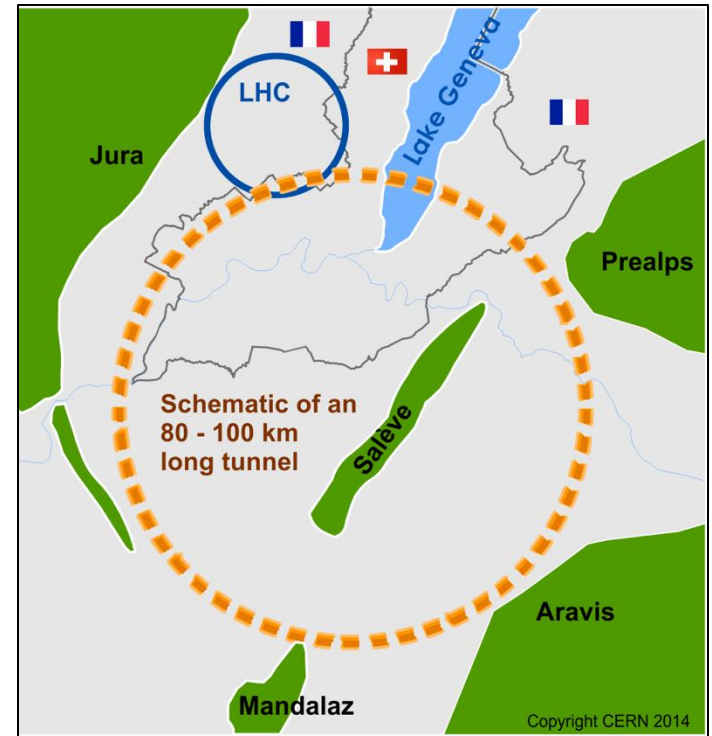
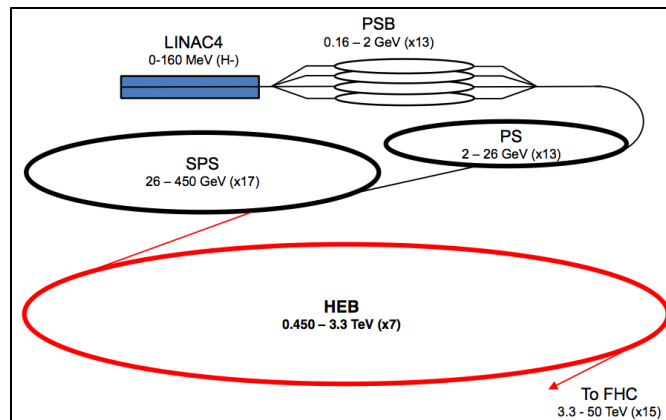
- ❑ Gradiente de aceleração de 100 MV/m necessário para um colisionador multi-TeV compacto (50 km, up to 3 TeV)
- ❑ Potência consumida de 600 MW a 3 TeV: redução sob investigação



O projeto FCC no CERN

Future Circular Collider num anel ~100 km:

- pp, $E = 100 \text{ TeV}$, $L \sim 2.5 \times 10^{35}$
- passo intermédio: $e^+ e^-$ – “Fábrica de Higgs’es”
 - (FCC-ee) $E=90\text{-}350 \text{ GeV}$, $L=2 \times 10^{36}\text{--}2 \times 10^{34}$
- Estudo de viabilidade em curso (até ~2025)
- FCC no CERN beneficiaria muito da infraestrutura existente
- Cadeia de injetores no FCC seria baseada no complexo de aceleradores atuais



Anel de 90-100 km adaptado à geologia na área de Genebra

Grandes desafios tecnológicos:

- Tecnologia dos dipolos magnéticos
- Radiação de sincrotrão
- Energia armazenada nos feixes

→ 2045–2060–2090

No final do Séc. XIX com a natureza descrita pela mecânica, termodinâmica, e electromagnetismo, a Física parecia completa:

"Tudo o que falta fazer em Física resume-se a preencher o valor da 6ª casa decimal"

(Albert Michelson, 1894)



**William Thomson
(Lord Kelvin)**

Mensagem à British Association for the Advancement of Science, 1900 :

"Não há nada fundamentalmente novo para ser descoberto. Tudo o que há a fazer é medir com mais precisão..."

(Lord Kelvin, 1900)

Mas Lord Kelvin também mencionou **'duas nuvens'** no horizonte da Física:

- 1) Radiação do Corpo Negro
- 2) Experiências de resultado nulo de

(Albert)Michelson – (Edward)Morley

No final do Séc. XX com a *nova* natureza descrita pela Teoria Quântica de Campos e pelo {partículas elementares} constituindo o Modelo Padrão das partículas e interações fundamentais, também aqui a Física parece resolvida:



“Com a descoberta iminente do bosão de Higgs, não há nada fundamentalmente novo para ser descoberto. Tudo o que há a fazer é medir com mais precisão...” (trad. livre, adaptado)

(Stephen Hawking, 1998)

(S.H. 2002: “...já não acho que não haja nada novo para ser descoberto”)

Mas ainda há algumas questões a resolver no horizonte da Física:

- 1) Matéria e energia escuras
- 2) Experiências de resultado nulo na pesquisa de sinais de nova física até ~ 1 TeV
(e Origem da enorme e pequeníssima assimetria matéria-antimatéria)

...e temos muito mais questões:

- Onde está a Antimatéria ? (ou a Assimetria M-aM?)
- As 3 forças fundamentais unificar-se-ão? (ou as 4) ?
- As partículas elementares são mesmo elementares ?

Ok, aqui temos alguns porquê's:

- Porquê é que há 3 famílias de partículas elementares ?
- Porque é que as partículas têm as massas que têm ?
- Porque é que os neutrinos são muito mais leves do que as outras partículas elementares ?
- **Porque é que os valores das constantes fundamentais na natureza estão tão adequadas à vida complexa ?**

Obrigado pela vossa atenção!



CERN PTLTP24

Albert Einstein [Prémio Nobel 1921]:

“ O facto mais incompreensível no nosso Universo é que aparentemente ele é compreensível! ”