

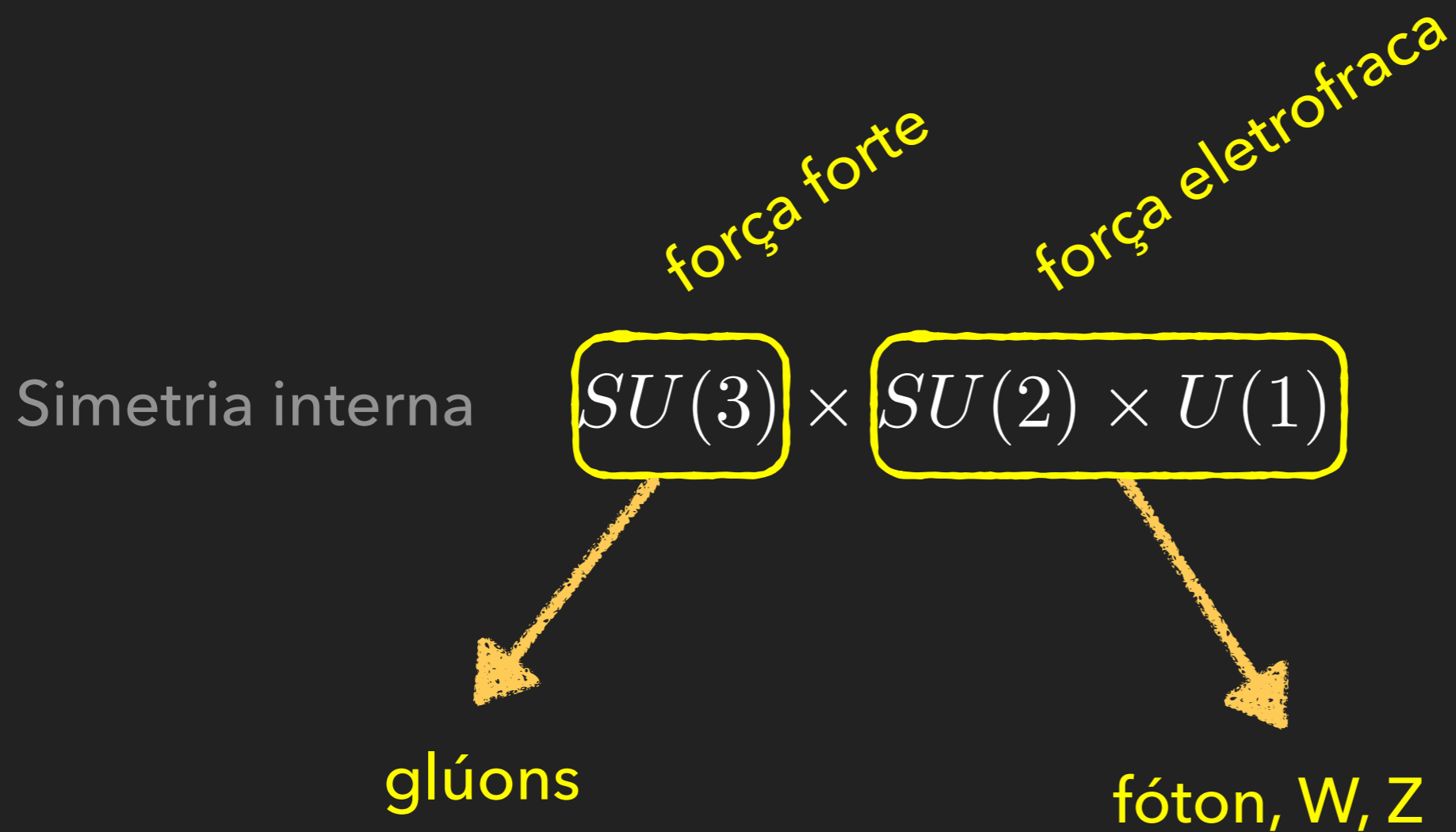
ENRICO BERTUZZO (DFMA-IFUSP)

UMA INTRODUÇÃO À FÍSICA DE PARTÍCULAS

PLANO DO CURSO

- ▶ Aula 1- Uma história da Física de Partículas (parte 1: 1897-1936)
- ▶ Aula 2 - Uma história da Física de Partículas (parte 2: 1936-1964)
- ▶ Aula 3 - Introdução à teoria quântica de campos
- ▶ Aula 4 - Modelo Padrão: previsões e confirmações
- ▶ **Aula 5 - Problemas do Modelo Padrão**

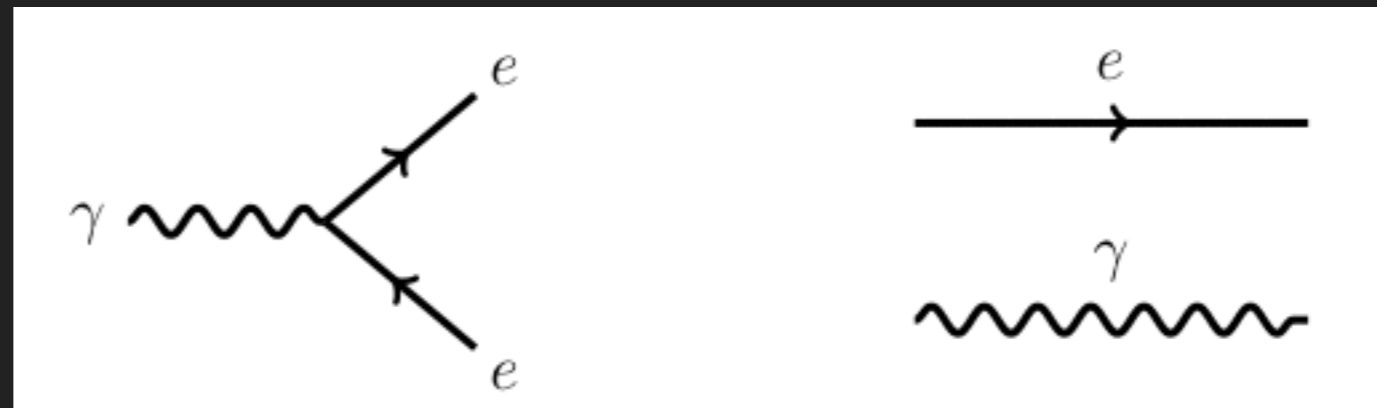
LEMBRETE: MODELO PADRÃO



LEMBRETE: MODELO PADRÃO

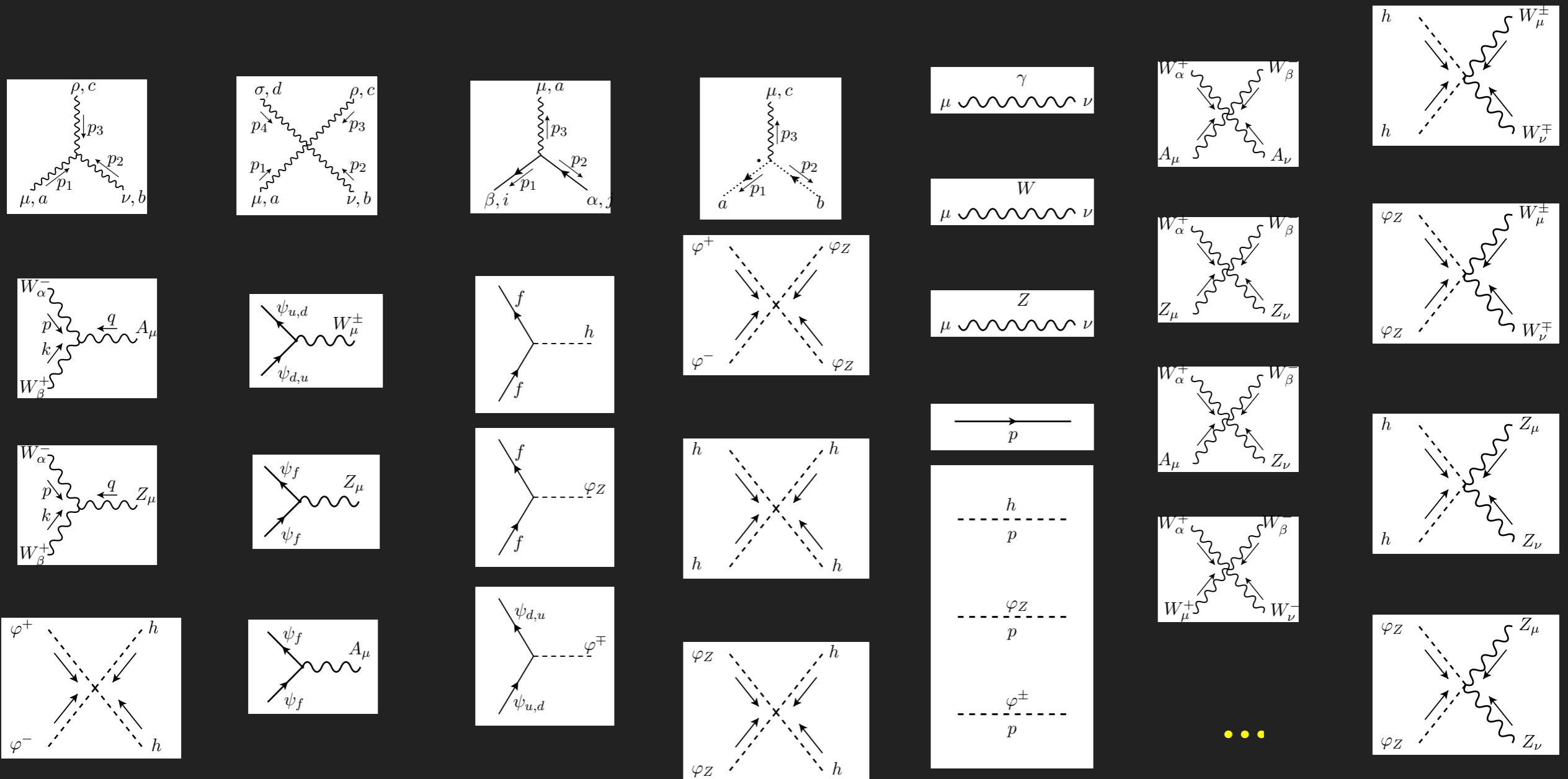
Apesar da “simplicidade” da simetria interna, o Modelo Padrão é uma teoria muito complicada

QED
diagramas de Feynman



LEMBRETE: MODELO PADRÃO

Modelo Padrão - alguns diagramas de Feynman



LEMBRETE: MODELO PADRÃO

Consegue explicar

- correções aos fenômenos atômicos e moleculares
- todos os fenômenos subatômicos conhecidos
- funcionamento das estrelas
- termodinâmica do universo em expansão
- ...

LEMBRETE: MODELO PADRÃO

Mas há alguns fenômenos que não são explicados pelo Modelo Padrão (apesar de serem observados experimentalmente)

- matéria escura
- assimetria matéria/antimatéria
- massa dos neutrinos
- gravidade

MATÉRIA ESCURA

1937 - ZWICKY

Primeira evidência que não toda a massa de um cluster de galáxias é observada

1937 ApJ 86, 217

ON THE MASSES OF NEBULAE AND OF CLUSTERS OF NEBULAE

F. ZWICKY

The Coma cluster contains about one thousand nebulae. The average mass of one of these nebulae is therefore

$$\bar{M} > 9 \times 10^{43} \text{ gr} = 4.5 \times 10^{10} M_{\odot}. \quad (36)$$

Inasmuch as we have introduced at every step of our argument inequalities which tend to depress the final value of the mass \mathcal{M} , the foregoing value (36) should be considered as the lowest estimate for the average mass of nebulae in the Coma cluster. This result is somewhat unexpected, in view of the fact that the luminosity of an average nebula is equal to that of about 8.5×10^7 suns. According to (36), the conversion factor γ from luminosity to mass for nebulae in the Coma cluster would be of the order

$$\text{Mass/Light} = \gamma = 500, \quad (37)$$

as compared with about $\gamma' = 3$ for the local Kapteyn stellar system.

1970 – V. RUBIN, W.K. FORD

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, Vol. 159, February 1970

© 1970. The University of Chicago. All rights reserved. Printed in U.S.A.

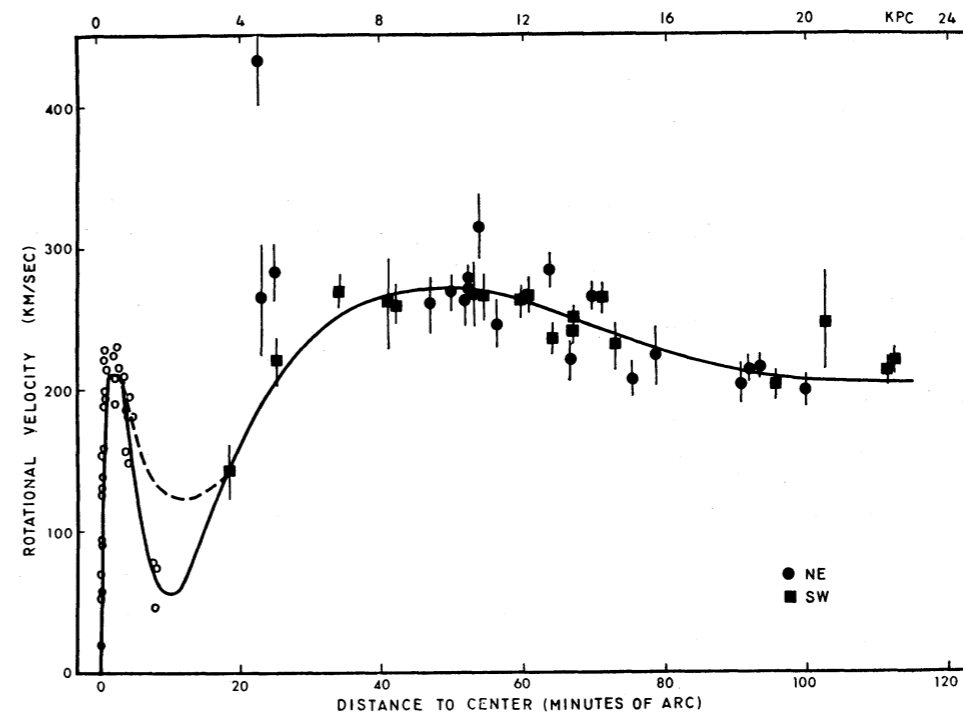
ROTATION OF THE ANDROMEDA NEBULA FROM A SPECTROSCOPIC SURVEY OF EMISSION REGIONS*

VERA C. RUBIN† AND W. KENT FORD, JR. †

Department of Terrestrial Magnetism, Carnegie Institution of Washington and Lowell Observatory, and Kitt Peak National Observatory‡

Received 1969 July 7; revised 1969 August 21

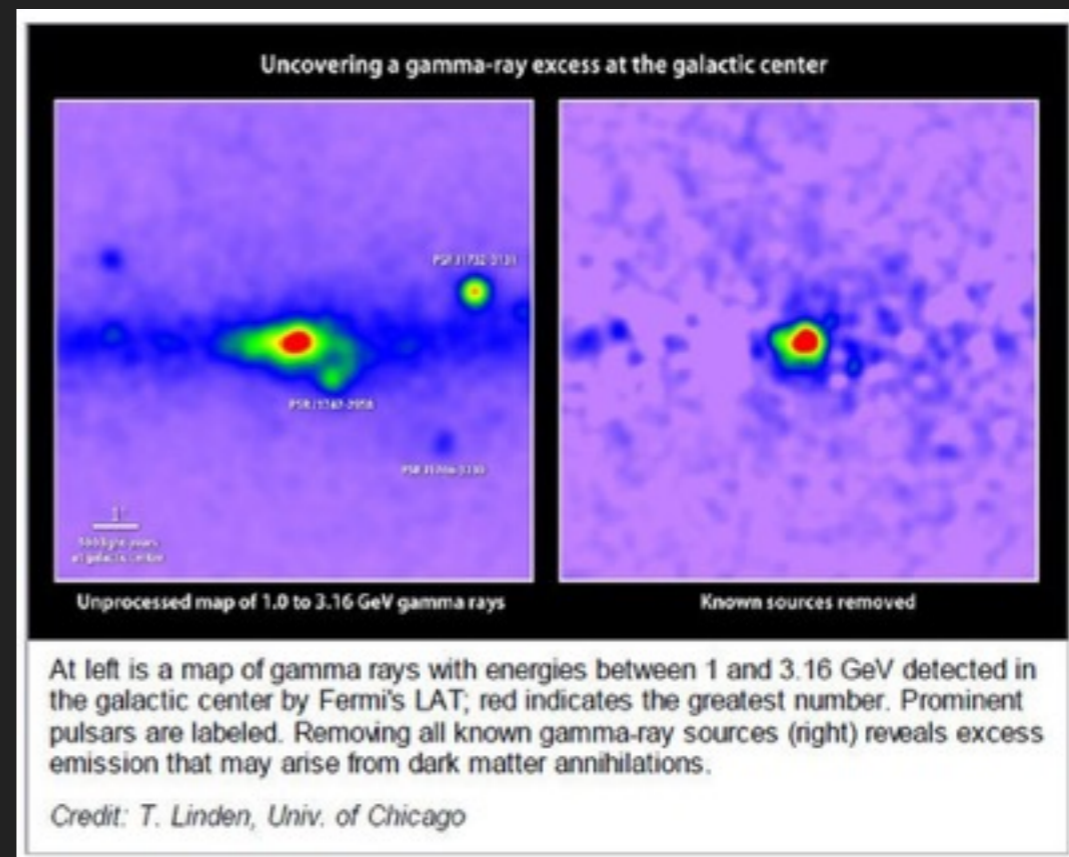
Curvas de rotação das galáxias



MATÉRIA ESCURA

Depois de mais de 80 anos da primeira observação de Zwicky, ainda a única evidência experimental certa* da matéria escura é de tipo gravitacional

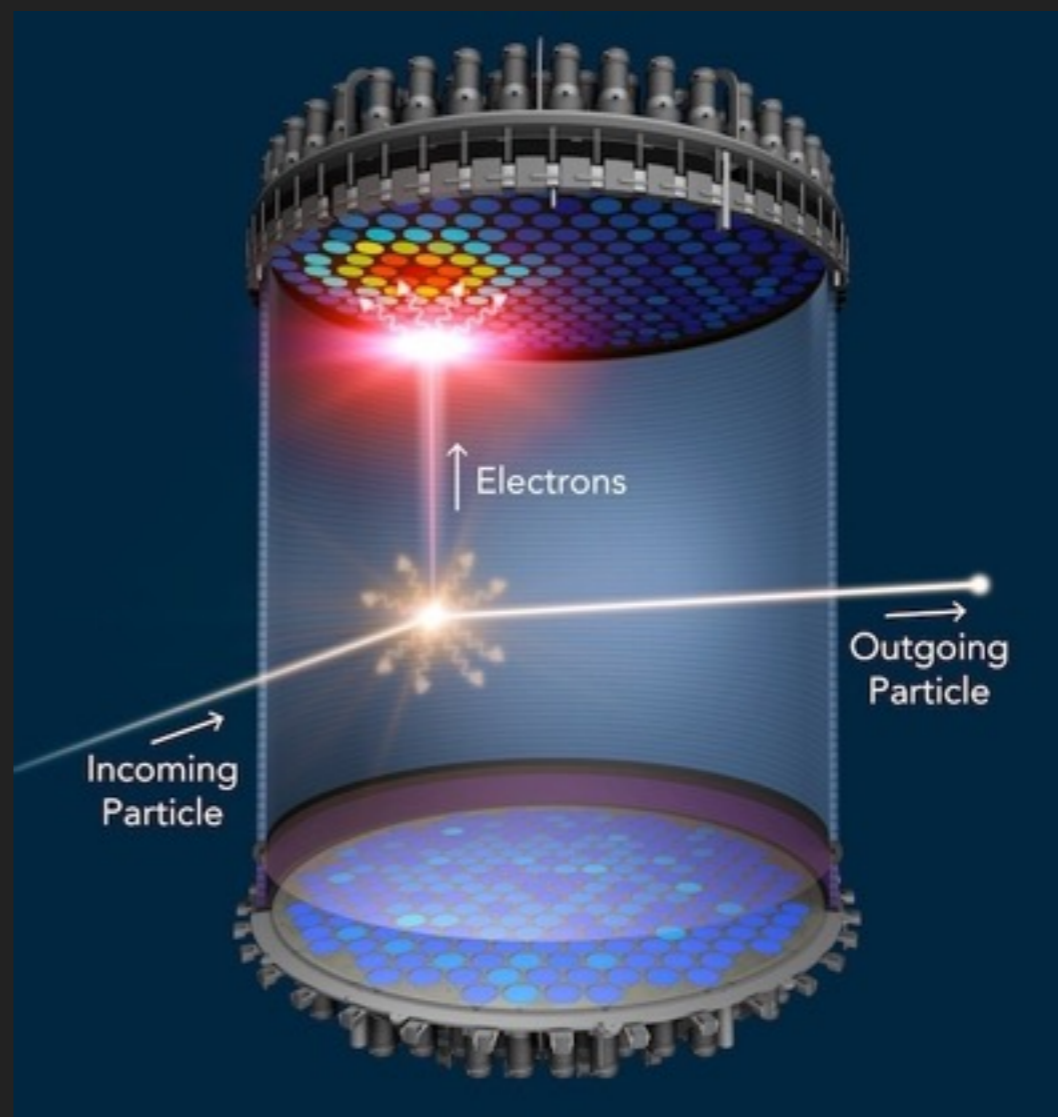
*Talvez exista outro sinal experimental: excesso de gamma-rays no centro galáctico



MATÉRIA ESCURA

Como não sabemos o que a matéria escura é, não temos uma teoria para descrevê-la (no Modelo Padrão nem temos um candidato para jogar o papel da matéria escura).

Vários experimentos para detectar a matéria escura na Terra e tentar entender as propriedades



ASSIMETRIA

MATÉRIA/ANTIMATÉRIA

OBSERVAÇÕES UNIVERSO

Partícula



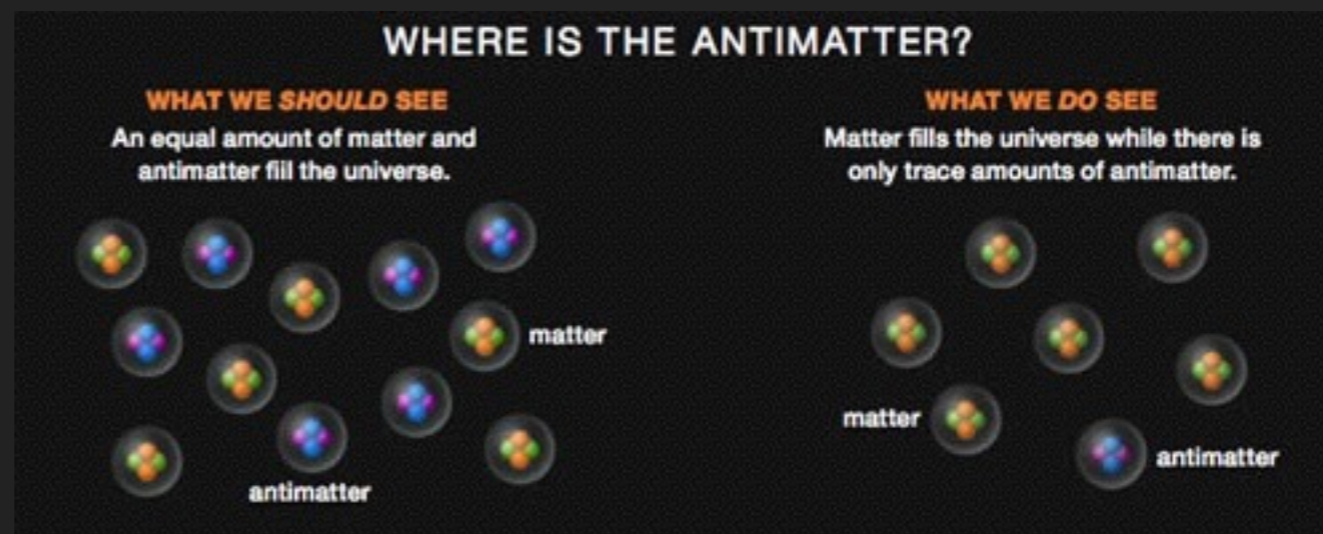
Anti-Partícula

Matéria

teoria
quântica
de
campos

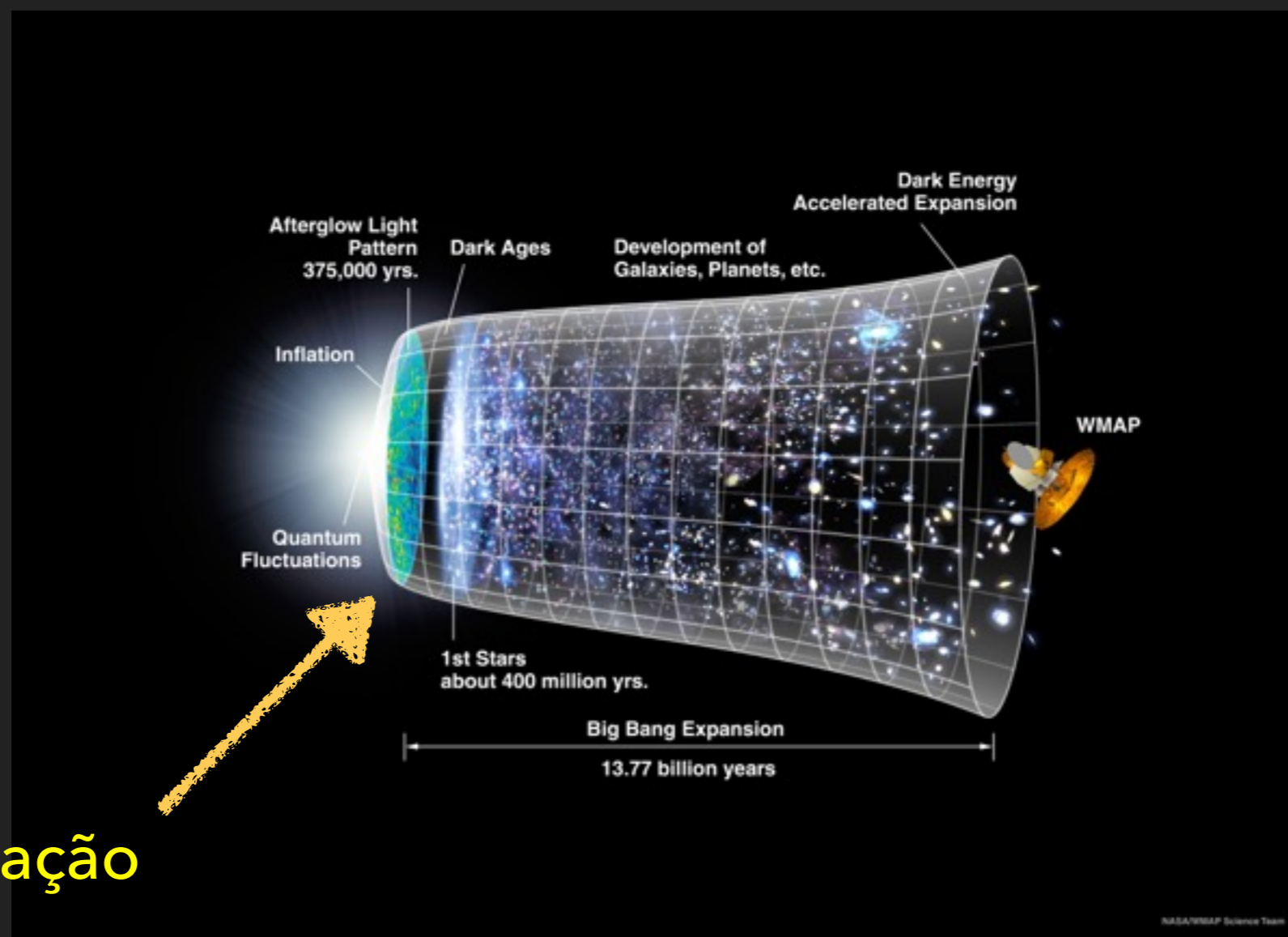
Anti-Matéria

O que observamos



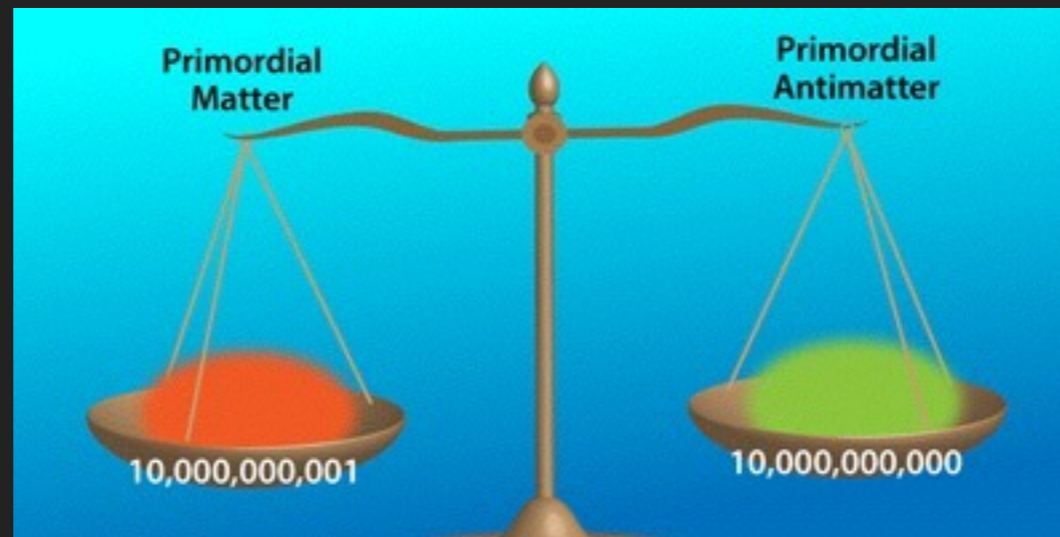
POR QUE É UM PROBLEMA?

Usando a cosmologia, podemos calcular quanta matéria e anti-matéria existiam no universo primordial para explicar as observações experimentais



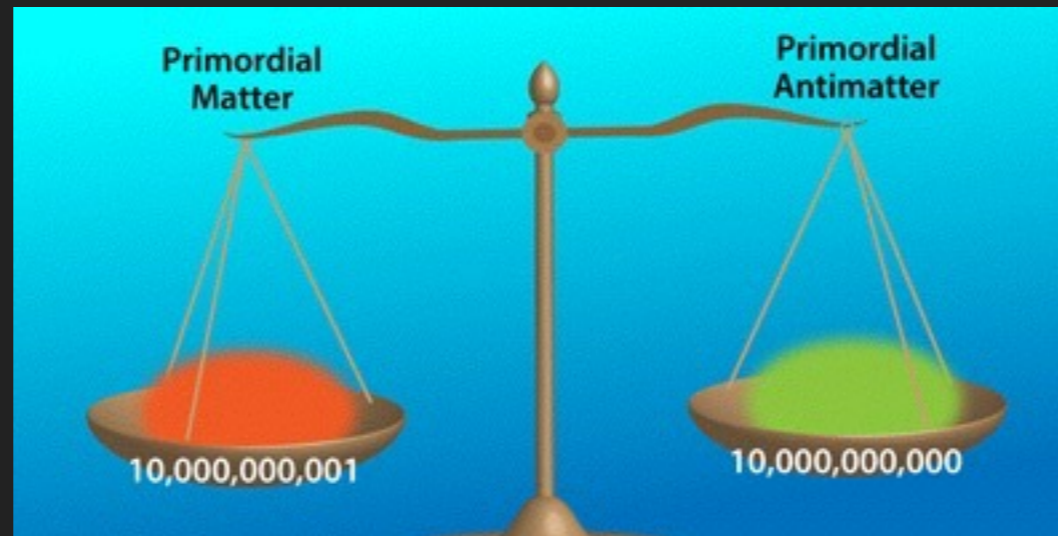
POR QUE É UM PROBLEMA?

Após a inflação, a expectativa seria matéria = anti-matéria
Em vez, para explicar as observações precisamos



De onde surgiu essa pequena assimetria?

POR QUE É UM PROBLEMA?



De onde surgiu essa pequena assimetria?

O modelo padrão não consegue explicar

MASSAS

NEUTRINOS

NEUTRINOS

Quando o Modelo Padrão foi introduzido (1962-1968) a ideia mais comum era que os neutrinos não tivessem massa

$$m_\nu = 0$$

No Modelo Padrão

Mas já em 1964 algumas anomalias que envolvem neutrinos estavam começando a ser observadas

NEUTRINOS

1964 - DAVIES, experimento HOMESTACK mede o número de neutrinos gerados no sol que chegam na Terra

1/3 dos neutrinos esperados é detectado

O resultado é confirmado no anos 1990. Contemporaneamente, é observado também um déficit de neutrinos produzidos na atmosfera

NEUTRINOS

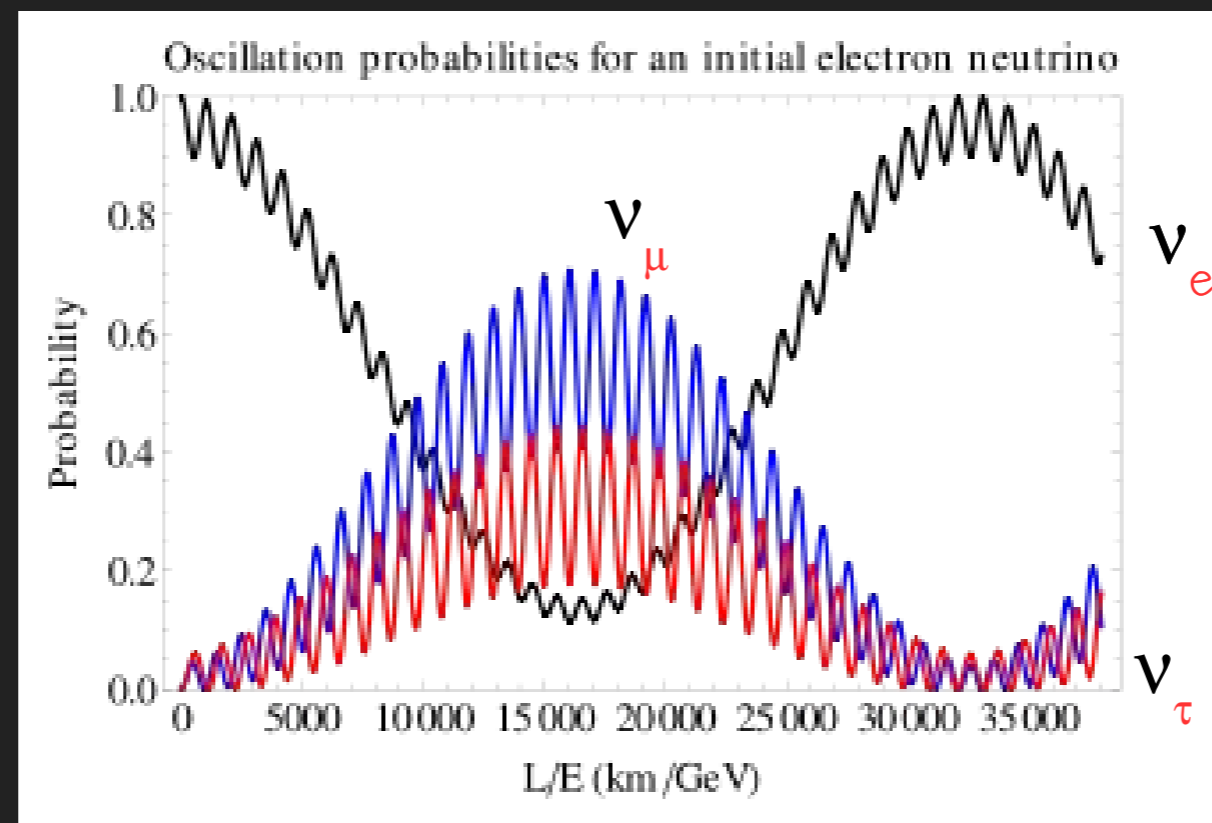
COMO É POSSÍVEL EXPLICAR O DÉFICIT DOS NEUTRINOS?

Se os neutrinos têm massa, o que acontece é o fenômeno das

OSCILAÇÕES

NEUTRINOS

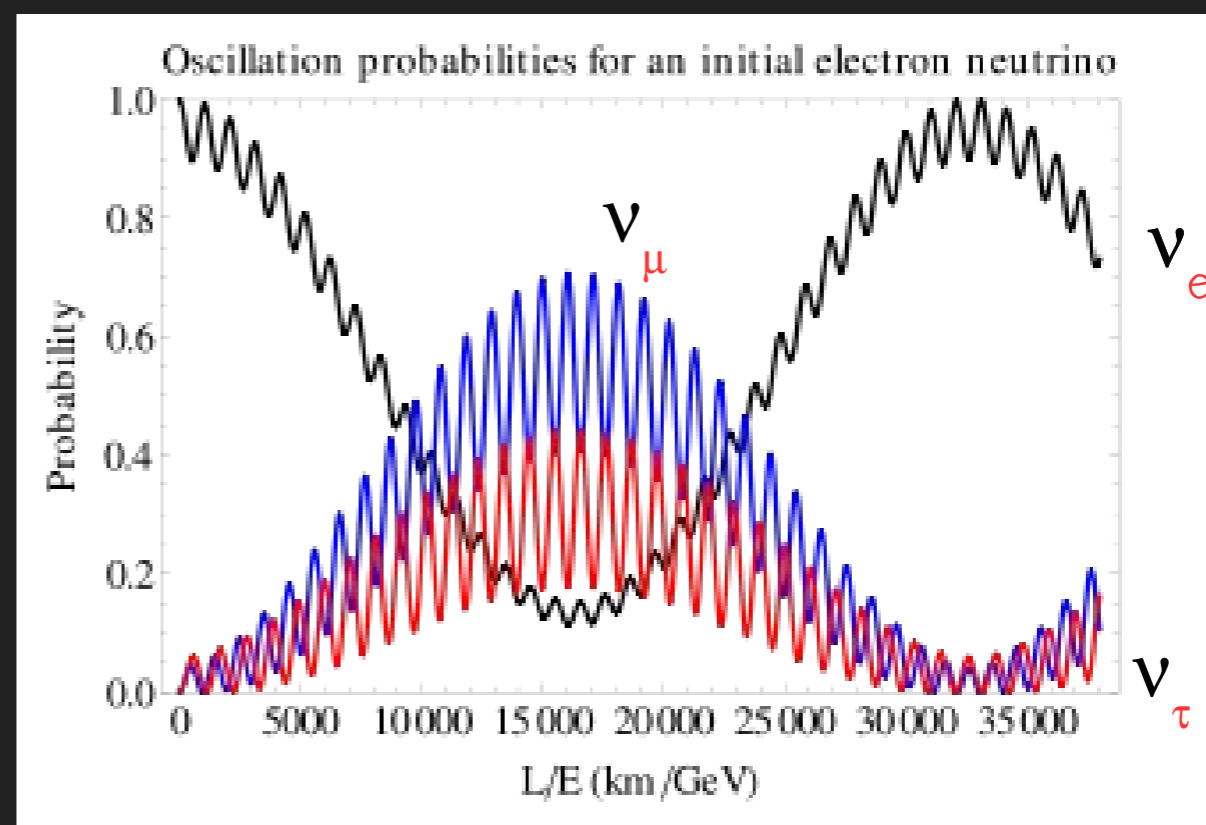
OSCILAÇÕES



OSCILAÇÕES DE NEUTRINOS

Observadas pelos experimentos
SuperKamiokande e SNO

Prêmio Nobel
2015



MASSAS DOS NEUTRINOS NA TEORIA

Apesar das massas dos neutrinos serem ingredientes que têm que ser explicados no Modelo Padrão, há um problema: podemos escrever massas geradas pelo mecanismo de Higgs (como acontece para as outras partículas) ou geradas por outros mecanismos

Atualmente, não temos informações experimentais em favor de uma ou da outra possibilidade

Ou seja, sabemos que os neutrinos têm massa, mas não sabemos como incorporá-la exatamente na teoria

GRAVIDADE

GRAVIDADE

- ▶ Relatividade geral = teoria clássica de campo da gravidade
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G_N}{c^4}T_{\mu\nu}$$
- ▶ Teoria quântica de campo da gravidade = ?
(ainda não temos uma teoria coerente e completa - teoria de cordas?)
- ▶ O que sabemos é que as massas das partículas do Modelo Padrão tem valores no máximo de 200 GeV; a escala típica da gravidade é 10^{18} GeV

POR QUE ESSA DIFERENÇA ENORME?

GRAVIDADE

- ▶ Observamos experimentalmente que o universo está acelerando: $\Lambda \simeq 5 \times 10^{-84} \text{GeV}^2$
- ▶ Mas como $\Lambda =$ energia vácuo, o Modelo Padrão prevê essa energia ser o valor da energia do vácuo do bóson de Higgs: $\Lambda \simeq 10^4 \text{GeV}^2$
- ▶ Além disso, a teoria quântica de campo prevê que efeitos quântico empurrariam à escala típica da gravidade:

$$\Lambda \simeq m_h^2 \simeq (10^{18} \text{GeV})^2$$

GRAVIDADE

- ▶ Atualmente, não temos explicações coerentes

$$\Lambda \simeq m_h^2 \simeq (10^{18} \text{ GeV})^2$$

Problema da
constante
cosmológica e
da hierarquia

CONCLUSÕES

Ainda muito trabalho
é preciso para
resolver os
problemas!