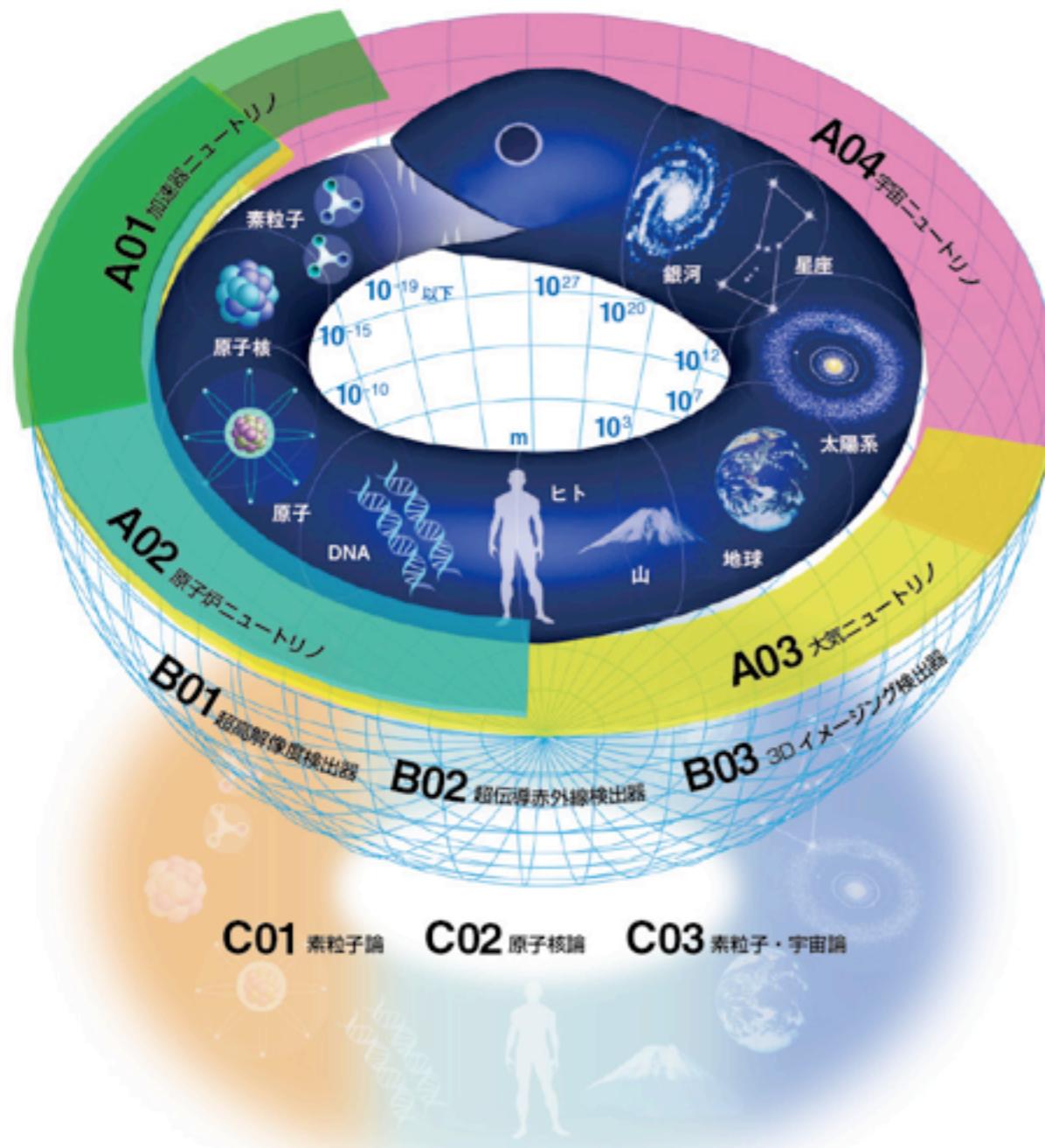


ニュートリノ研究の動向



中家 剛 (京都大学)

目次

- 目指す物理 --- p3-6
- 進展 --- p7-8
- 課題 --- p9-13
- 日本の実験 --- p14-18
- 世界の動向 --- p19-23
- 最後に --- p24-26

1. 目指す物理（素粒子物理学の観点から）

- 標準模型を超えて（統一理論を目指す）

- 極小のニュートリノ質量の存在

- ラグランジアンに質量項をどう加えるのか？右巻きニュートリノは（暗黒物質との関係？？）？ヒッグス粒子との結合は？
- $m_\nu < \sim 0.1 \text{ eV}/c^2$, $\sqrt{|m_{\nu 3}^2 - m_{\nu 1}^2|} = 0.05 \text{ (eV}/c^2)$
 $\Leftrightarrow m_e = 511,000 \text{ eV}/c^2$, $E_{\text{可視光}} \sim 2 \text{ eV}$, $E_{\text{室温}} \sim 0.026 \text{ eV}$

- レプトンとクォークの対称性

- 質量構造（階層性）の比較
- 混合パターンの比較
- ニュートリノは3世代か？

- 粒子と反粒子の対称性

- Dirac粒子かMajorana粒子か？
- CP対称性は保たれているのか？
- 物質優勢宇宙創造の起源か？

Three Generations of Matter (Fermions) spin $1/2$				
	I	II	III	
mass →	2.4 MeV	1.27 GeV	173.2 GeV	
charge →	$2/3$	$2/3$	$2/3$	
name →	u up	c charm	t top	
Quarks	Left Right	Left Right	Left Right	
mass →	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	
charge →	$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$	
name →	d down	s strange	b bottom	
Quarks	Left Right	Left Right	Left Right	
mass →	${}^0\nu_e$ electron neutrino	${}^0\nu_\mu$ muon neutrino	${}^0\nu_\tau$ tau neutrino	
charge →	-1	-1	-1	
name →	e electron	μ muon	τ tau	
Leptons	Left Right	Left Right	Left Right	
mass →	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	
charge →	-1	-1	-1	
name →				
Bosons (Forces) spin 1				
mass →	91.2 GeV	0	126 GeV	
charge →	0	0	0	
name →	Z weak force	H Higgs boson		
Bosons (Forces) spin 0				
mass →	80.4 GeV	± 1	0	
charge →	0	W weak force	0	
name →				

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{SM} + i\bar{\nu}_R \partial^\mu \nu_R - \bar{L}_L y \nu_R \tilde{H} - \bar{\nu}_R y^\dagger L \tilde{H}^\dagger - \frac{1}{2} (\bar{\nu}^c_R M_M \nu_R + \bar{\nu}_R M_M^\dagger \nu_R^c)$$

Minkowski 1979, Gell-Mann/Ramond/Slansky 1979, Mohapatra/Senjanovic 1979, Yanagida 1980

$$\Rightarrow \frac{1}{2} (\bar{\nu}_L \bar{\nu}_R^c) \begin{pmatrix} 0 & m_D \\ m_D^T & M_M \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_L^c \\ \nu_R \end{pmatrix}$$

The GUT seesaw

Pros:

- theoretically well-motivated in GUTs, e.g. SO(10)
- “naturally” explains small neutrino masses
- “naturally” leads to leptogenesis Fukugita/Yanagida
- indirect experimental access to very high scales

Cons:

- new states experimentally inaccessible
- adds to hierarchy problem

The electroweak / TeV seesaw

Pros:

- some theoretical arguments
 - no new scale Asaka/Shaposhnikov
 - classical scale invariance Khoze/Ro, ...
- allows for leptogenesis

The GeV seesaw

Pros:

- some theoretical arguments
 - no new scale Asaka/Shaposhnikov
 - classical scale invariance Khoze/Ro, ...

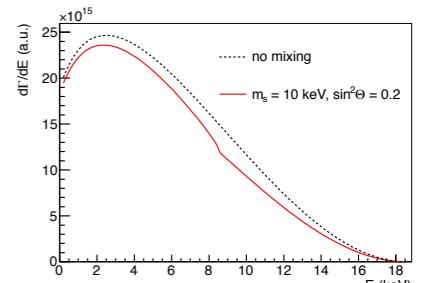
The keV seesaw

Pros:

- can in principle explain neutrino masses
- can be Dark Matter (cold, warm, non-thermal, ...)

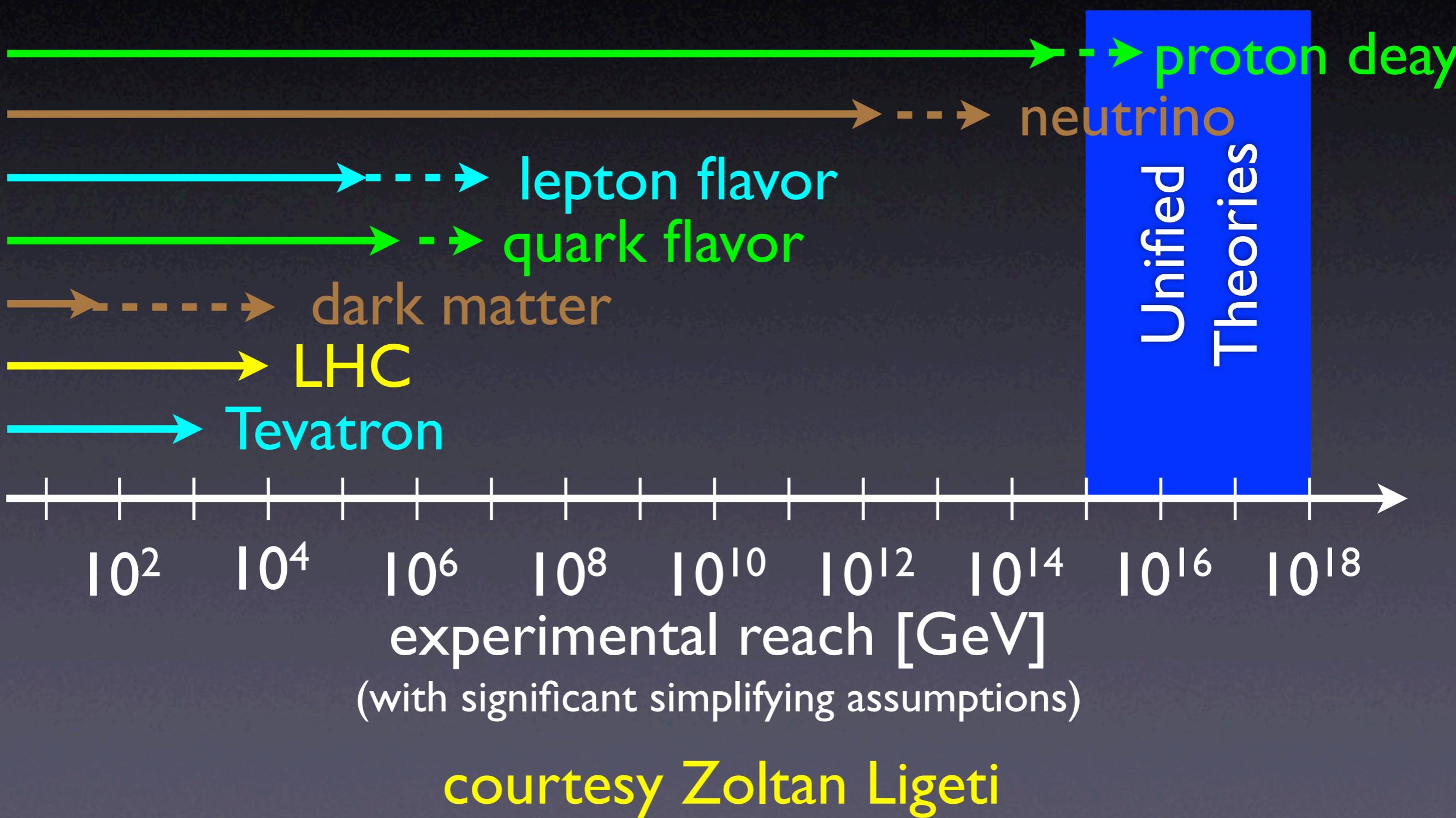
- can be tested
 - KATRIN type experiments
 - astrophysics / cosmology

courtesy S. Martens



Cons:

- very tiny Yukawa couplings y , cancellations
- a state can only **either** be DM **or** contribute to neutrino mass
- simplest scenario (Dodelson/Widrow) disfavoured by data



一例

$E_6 \rightarrow SO(10) \rightarrow SU(5)$

a GUT

I. 統一

I. 力 (ゲージ) の統一 (w/ SUSY)

$$SU(5) \supset SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$$

3. 粒子 (クオーク・レプトン) の統一

$$\begin{array}{c} Q \quad U_R^c \quad E_R^c \\ D_R^c \quad L \quad N_R^c \end{array}$$

$$10 + \bar{5} + 1 = 16$$

- $|10_i(Q_i)$ は階層性が $\bar{5}_i(L)$ より強い
- 階層性
- 混合: レプトン (大きい) \gg クオーク (小さい)
- 質量: Uタイプ \gg Dダイブ, 電子タイプ \gg ニュートリノ

2. これまでの進展

- 1987年：超新星ニュートリノの初観測：**Kamiokande**
- 1998年：ニュートリノ振動（質量）の発見：**Super-Kamiokande**
- 2000年：タウニュートリノの直接観測：**DONUT**
- 2002年：太陽ニュートリノ欠損の解明：**Super-Kamiokande**, SNO
- 2002～2004年：ニュートリノ振動の確証、精密測定
 - 長期線加速器ニュートリノ実験：**K2K**
 - 長期線原子炉反ニュートリノ実験：**KamLAND**
 - 大気ニュートリノによる精密測定：**Super-Kamiokande**
- 2005年：地球反ニュートリノの初観測：**KamLAND**
- 2011～2013年：第3のニュートリノ振動の観測
 - 長期線加速器ニュートリノ実験：**T2K**
 - 原子炉反ニュートリノ実験：Daya-Bay, **Double-Chooz**, RENO
- 2012年：高エネルギー宇宙ニュートリノの初観測：**IceCube**
- 2014年：ニュートリノ振動における タウニュートリノの直接観測：**OPERA**

日本のニュートリノ研究の成果（一部）

重要な結果を発表した論文の引用数

