将来計画と フレーバー物理俯瞰

石塚正基（東京理科大学）

FLAVOR PHYSICS WORKSHOP 2018

2018年11月2日

東京大学柏キャンパスカブリ数物連携宇宙研究機構

素粒子物理学実験の将来計画

- 大学生「クォークや電子など色々あるのに、なんでニュートリノを研究するのですか？」
- 私「何か一つを調べれば宇宙が全て理解できるなんてことはないのだよ。全部大事なんだよ。ニュートリノもミューオンもクォークもヒッグスも、いろいろなことを調べてわかっていって、それらを合わせて背後に存在するメカニズムを推察して、検証して。そういったことの積み重ねで宇宙がわかってくるのだよ。」

素粒子物理学実験の将来計画

- 大学生「クォークや電子など色々あるのに、なんでニュートリノを研究するのですか？」
- 私「何か一つを調べれば宇宙が全て理解できるなんてことはないのだよ。全部大事なんだよ。ニュートリノもミューオンもクォークもヒッグスも、いろいろなことを調べてわかっていって、それらを合わせて背後に存在するメカニズムを推察して、検証して。そういったことの積み重ねで宇宙がわかってくるのだよ。」

特にフレーバー物理では網羅的に探索することが重要

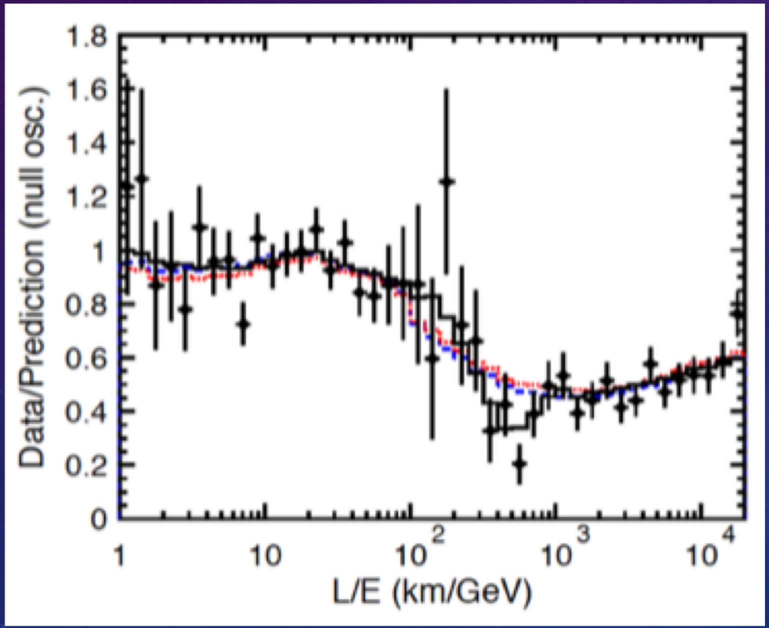
$A \rightarrow B + C$ は起きる（発見された）が

$D \rightarrow E + F$ は抑制される（観測されない） ⟵ これも重要な知見

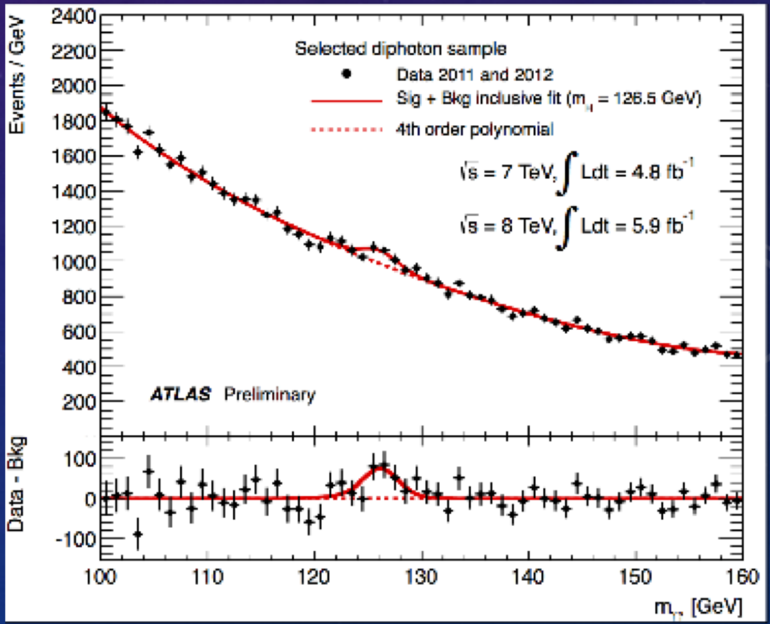
⇒ 将来計画でもプロジェクトの多様性を維持する必要がある

素粒子物理学実験の将来計画

- とは言え、実験のモチベーションはやはり「発見」
- 測定データから真実が明らかになる瞬間に立ち会えるのが実験屋の特権

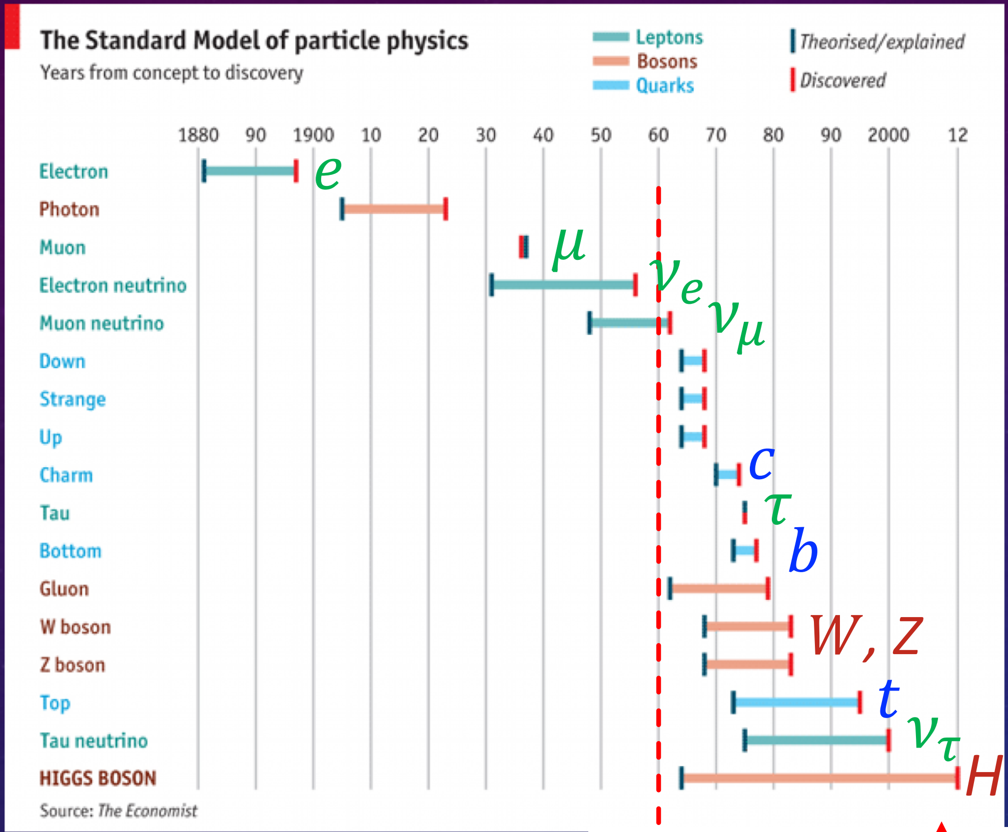


ニュートリノ振動の発見 → 振動確率の測定
（スーパーカミオカンデ）

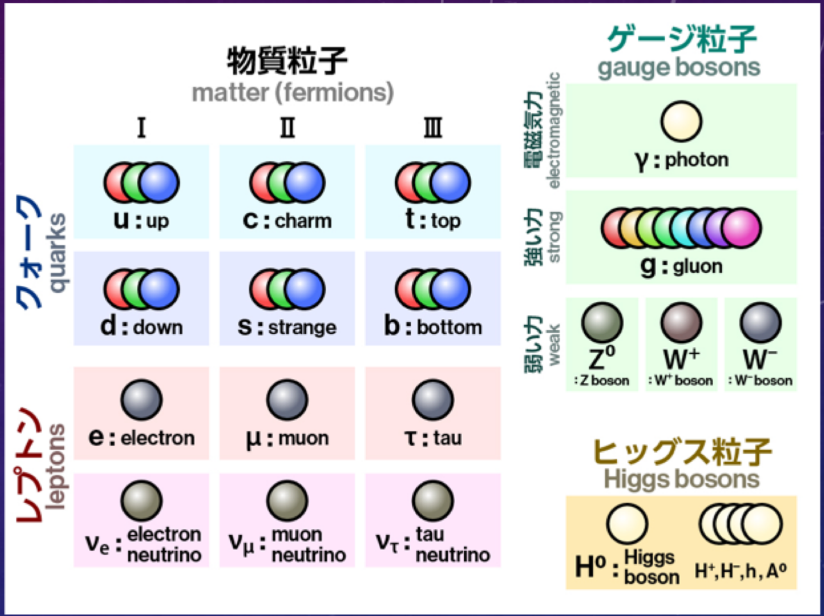


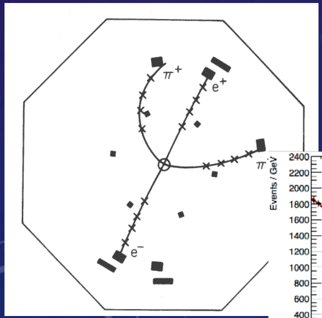
ヒッグス粒子の発見
（ATLAS実験、CMS実験）

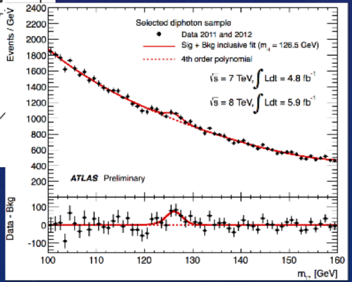
素粒子標準理論と実験による検証

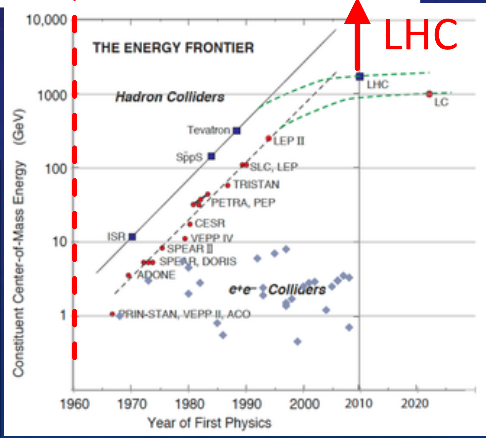


higgstan.com



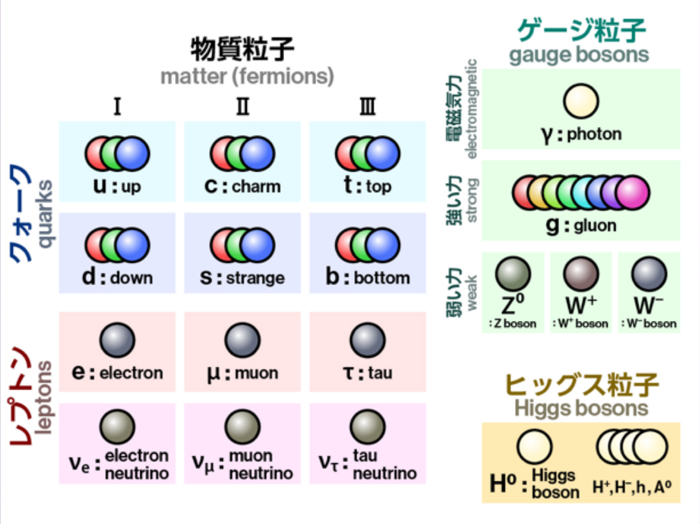






- 素粒子標準理論は観測結果を非常によく再現する
- 加速器の発展により様々な新粒子が発見された
- ヒッグス機構（粒子）まで確認できたのは驚くべき研究成果

素粒子標準理論から物質の起源・宇宙の起源に迫る新物理へ



なぜ新物理（将来計画）が必要か？

- 普通の物質（原子）は宇宙のたった5%
  → 95%は標準理論にない粒子か他の形のエネルギー
- 反物質は存在しなく物質のみが存在する
  → 標準理論の予言する10億倍ぐらいの物質
- 自然に決まらないパラメータが多い
  → もっと基本的な理論の「有効理論」か？

といった問いに答える

素粒子標準理論から物質の起源・宇宙の起源に迫る新物理へ

- 高エネルギー物理の課題（＝新物理探索）

新粒子探索

SUSY、Charged Higgs, Z'/W', etc

暗黒物質の正体

← 生成・散乱・対消滅・宇宙観測

ヒッグス粒子の性質

結合定数、自己結合、etc

標準理論の精密測定

→ 標準理論からのズレ

宇宙観測

CMB偏光、宇宙膨張（時間変化）

大統一理論の検証

ニュートリノの性質

世代間混合、CP対称性の破れ、

質量（階層性）、マヨラナ性

素粒子標準理論から物質の起源・宇宙の起源に迫る新物理へ

- 高エネルギー物理の課題（＝新物理探索）⇒ その先に

素粒子標準理論から物質の起源・宇宙の起源に迫る新物理へ

- 高エネルギー物理の課題（＝新物理探索）⇒ その先に ⇒ その先に

新粒子探索

SUSY、Charged Hi '/W'

暗黒物質

← 生成・散乱・

の性質

結合、etc

宇宙

の統一

源

論の検証

CMB偏光、

ニュートリノの質量
質量スペクトルの起源

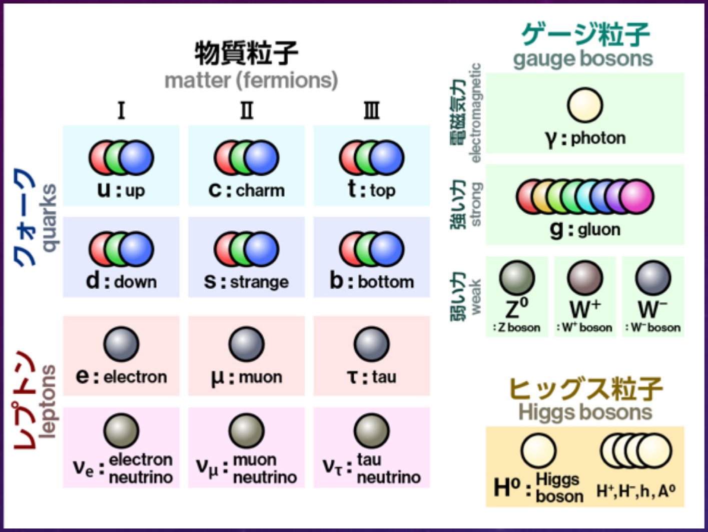
消えた反物質の謎
物質の起源

性の破れ、
質量（階層性）、マヨラナ性

究極の理論

そんなものに辿り着くか？

素粒子標準理論から物質の起源・宇宙の起源に迫る新物理へ



- 普通の物質（原子）は宇宙のたった5%
  → 95%は標準理論にない粒子か他の形のエネルギー
  → 95を担う粒子とエネルギーを説明して（27%は暗黒物質）
- 反物質は存在しなく物質のみが存在する
  → 標準理論の予言する10億倍ぐらいの物質
  → CP対称性の破れが予言する10億倍ぐらいの物質を生み出し
- 自然に決まらないパラメータが多い
  → もっと基本的な理論の「有効理論」か？
  → 最低限のパラメータで決まる基本的な理論

まずはその手がかりを

将来計画

素粒子標準理論から物質の起源・宇宙の起源に迫る新物理へ

- 高エネルギー物理の課題（＝新物理探索）

新粒子探索

SUSY、Charged Higgs, Z'/W', etc

暗黒物質の正体

← 生成・散乱・対消滅・宇宙観測

加速器で探る

ヒッグス粒子の性質

結合定数、自己結合、etc

標準理論の精密測定

→ 標準理論からのズレ

宇宙観測

CMB偏光、宇宙膨張（時間変化）

大統一理論の検証

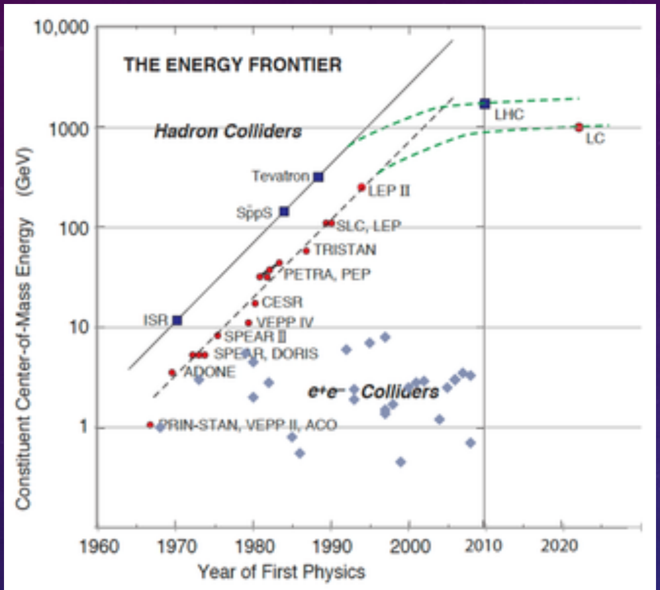
ニュートリノの性質

世代間混合、CP対称性の破れ、

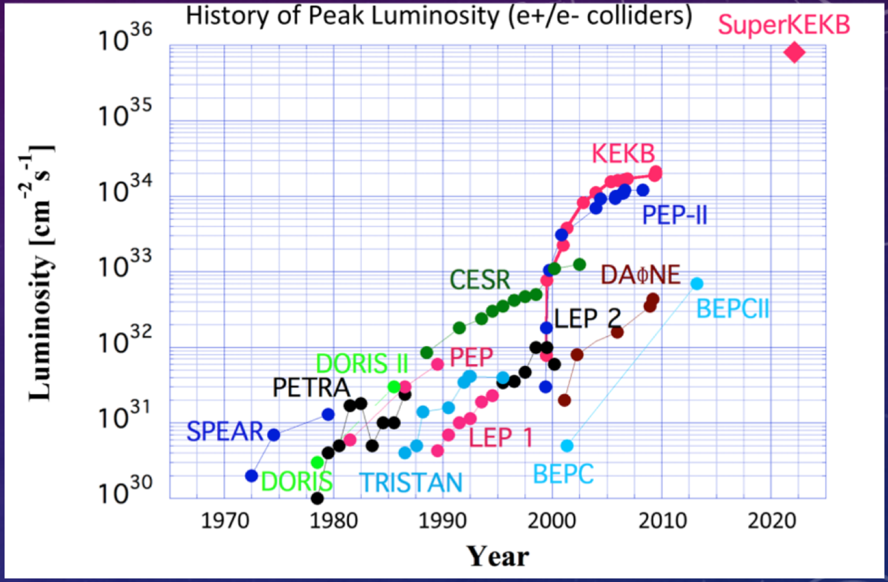
質量（階層性）、マヨラナ性

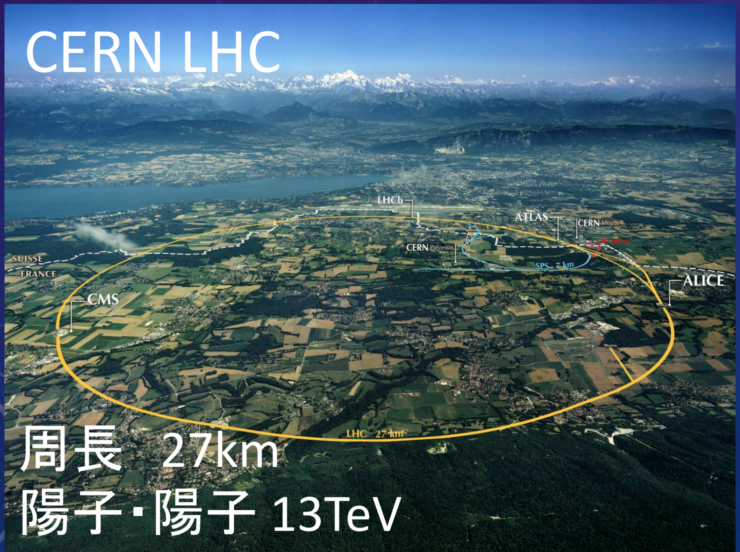
加速器の発展: エネルギーフロンティアとルミノシティフロンティア

エネルギーフロンティア



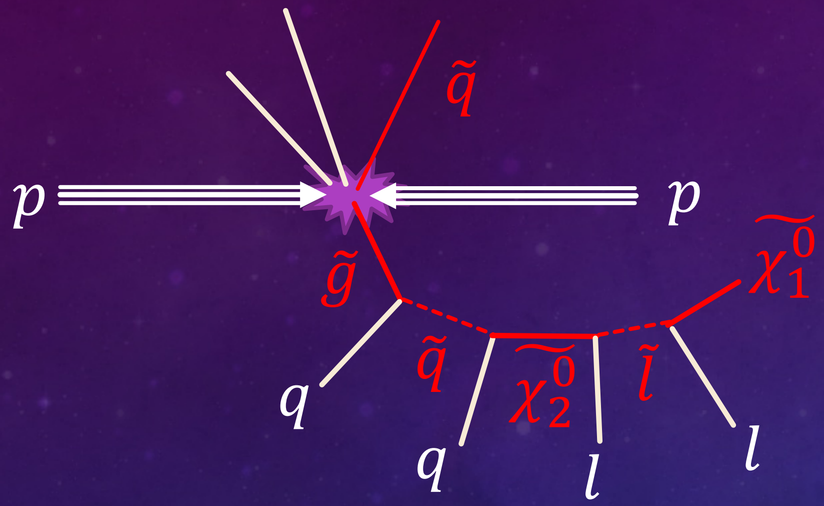
ルミノシティフロンティア



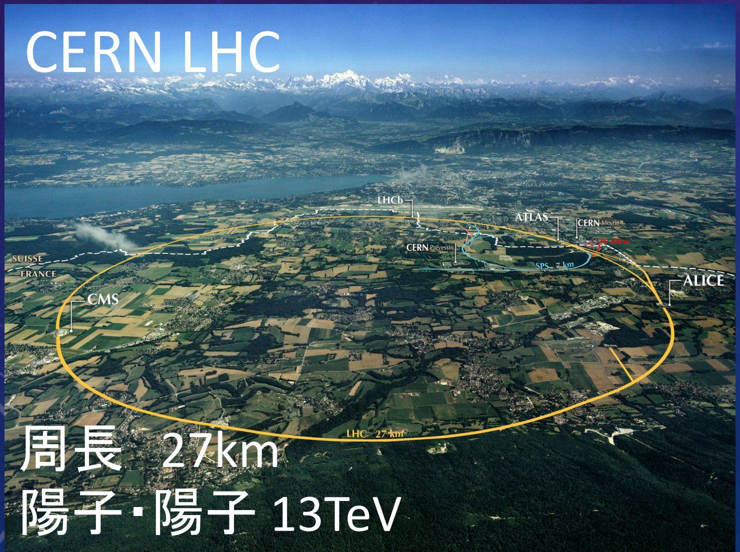


加速器の発展: エネルギーフロンティアとルミノシティフロンティア

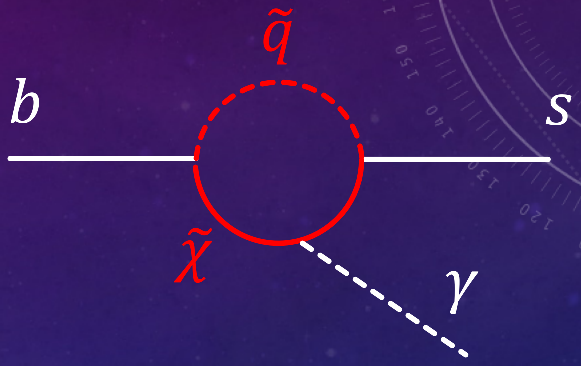
エネルギーフロンティア



- 高エネルギーで新粒子を作る



ルミノシティフロンティア

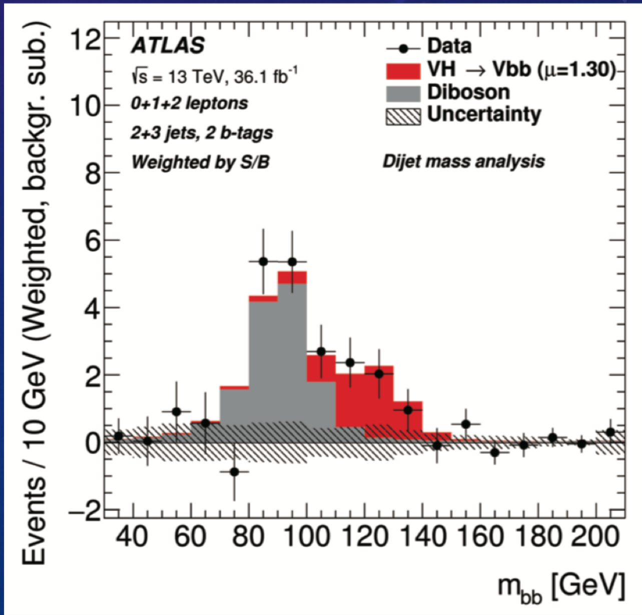


- 新粒子が稀に引き起こす量子力学的効果を探索

加速器の発展: エネルギーフロンティアとルミノシティフロンティア

- 現代のエネルギーフロンティア: LHC　重心系エネルギー 13TeV

- ヒッグス粒子
  - 質量125GeVに発見、スピン・パリティは0^+
  - 質量に比例した結合定数
    - ハドロンコライダーでは難しい $H \to b\bar{b}$ も測定
- 新粒子探索
  - 階層性問題を解消し・結合定数をうまく統一させ・暗黒物質の候補ともなる「超対称性（SUSY）粒子」が探索候補
    - 多数のジェット＋消失エネルギーで探す
    - しかし、今のところ有意な信号はない



加速器の発展: エネルギーフロンティアとルミノシティフロンティア

- 現代のエネルギーフロンティア: LHC　重心系エネルギー 13TeV

陽子・陽子

電子・陽電子

存在するとすれば、なぜ新物理の兆候は見えていないのか？

エネルギーは足りているが兆候が見えづらい

エネルギーが足りない

統計を上げて精査

HL-LHC

精密測定で間接的に探索

SuperKEKB Belle II

ILC

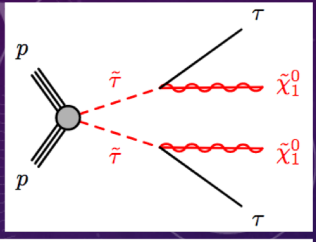
FCC-ee

エネルギーを上げて直接探索

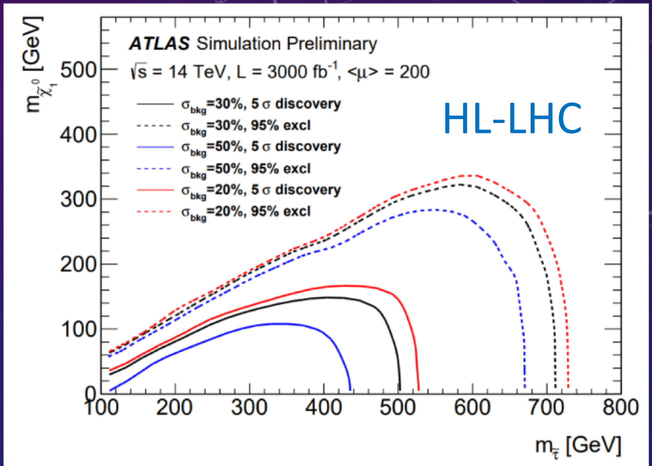
HE-LHC

FCC-hh

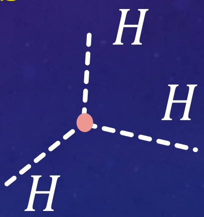
LHCの高輝度化: HL-LHC

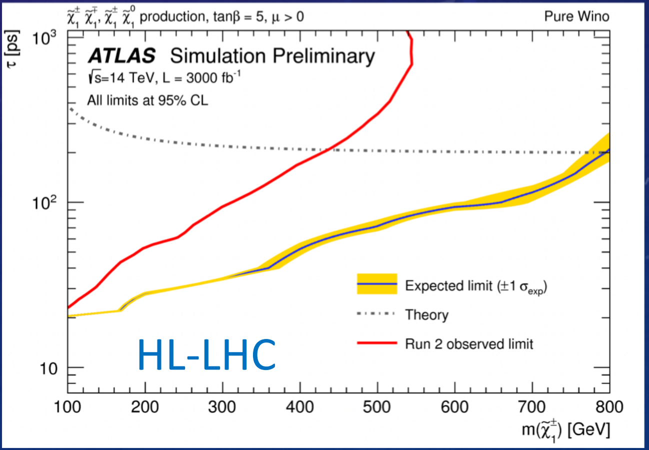


ATL-PHYS-PUB-2016-021



- LHC: 2023年(Run3終了)までに$300\mathrm{fb}^{-1}$
  ⇒ 高輝度化(検出器も大幅に改良)
- 2026年からHL-LHC稼働開始
  - 年間$300\mathrm{fb}^{-1}$程度⇒最終的に$3000\text{-}4000\mathrm{fb}^{-1}$
- ヒッグス粒子の性質を精密測定
  - 第二世代との結合 ($H \to \mu^+\mu^-$) の測定
  - 自己結合(ヒッグス対生成) $HH \to b\bar{b}\gamma\gamma$ で $\sim 1\sigma$
    - 複数の崩壊モードの統合・解析の最適化

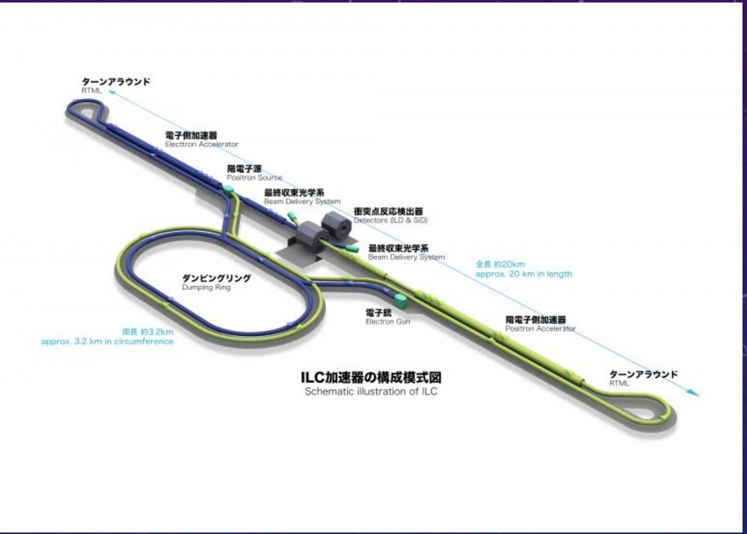




- 新粒子探索
  - 高輝度化により探索のパラメータ領域を広げる
    - 電弱相互作用による新粒子生成(比較的軽いSUSY粒子の発見もあり得る)

国際リニアコライダー: IHC

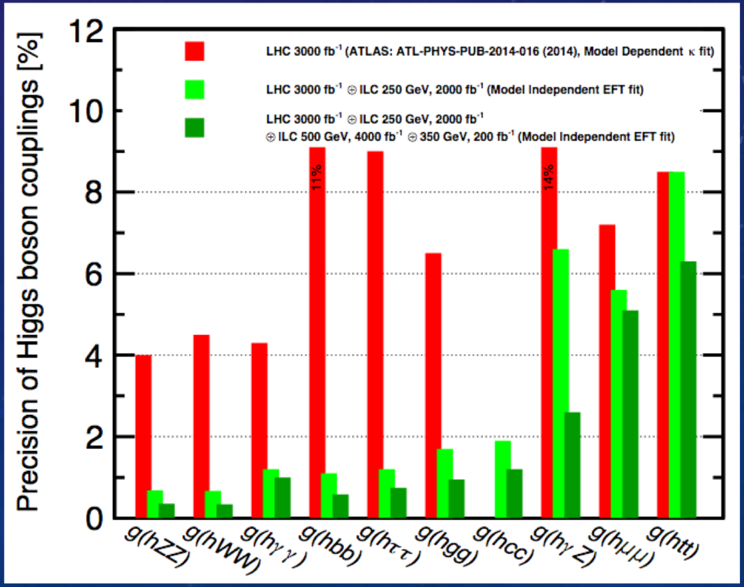
a view of the ILC complex, by Rey.Hori



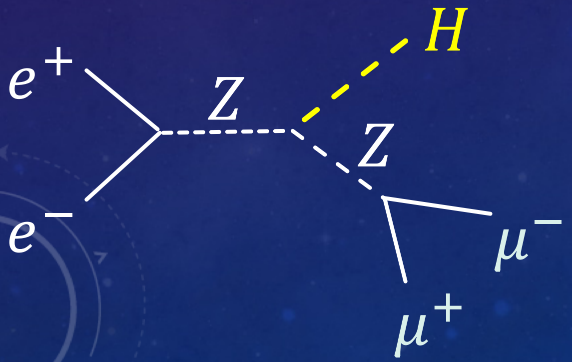
- 電子･陽電子衝突のエネルギーフロンティア
- 250GeV → 500GeV → 1TeVに拡張する計画
  - 拡張性は線形加速器の強み
  - まずは250GeVでヒッグス粒子を生成
    → クリーンな環境での精密測定

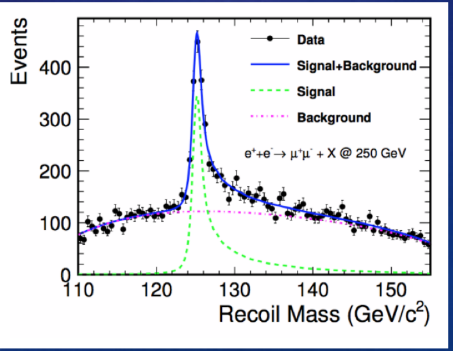
  結合定数を < 1%で測定するとモデルに
  制限がつく(SM, MSSM, 2HD, Composite H)

arXiv: 1710.07621



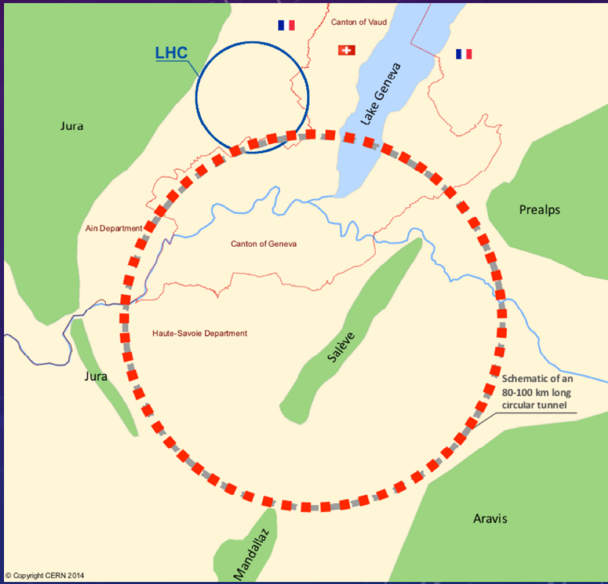
重心系での測定:
ヒッグス粒子が観測にかからない粒子に
崩壊する分岐比も観測できる





次世代のエネルギーフロンティア計画: HE-LHC / FCC

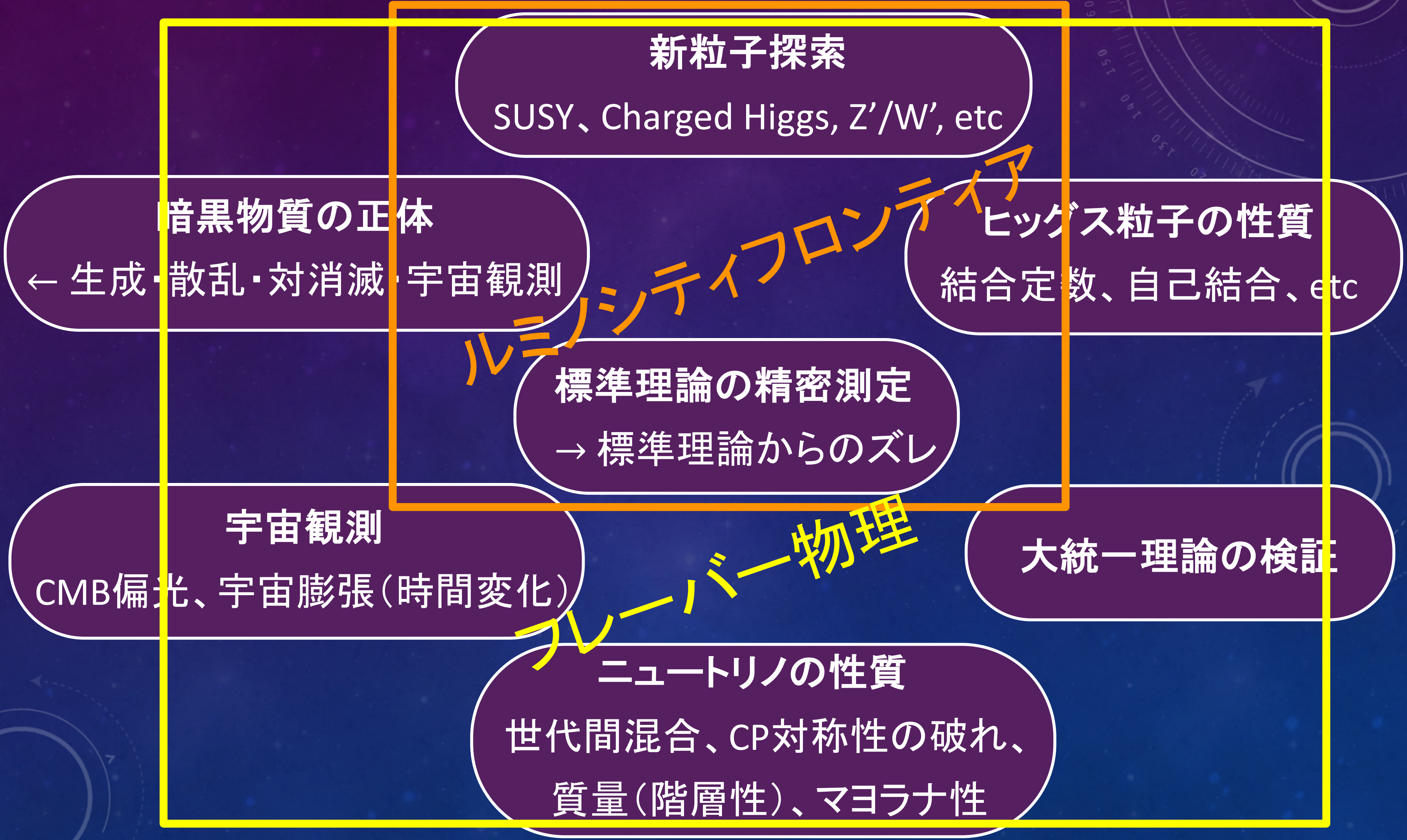
- 陽子加速器のエネルギー: $p = eBR \Rightarrow$ 周長を長くする and/or 磁場を強くする
- FCC-hh計画（CERN）: （FCC-ee, FCC-ehも検討）
  - 周長 100km + 16T超電導電磁石 → $\sqrt{s} = \mathbf{100TeV}$
  - Naturalnessに決着（~10TeV）、ヒッグスの自己結合
- HE-LHC計画
  - LHCのトンネル + 16T超電導電磁石 → $\sqrt{s} = \mathbf{27TeV}$
  - ルミノシティはHL-LHCからさらに増強
- 2020年のEuropean Strategyの改定に向けて準備中



	LHC	HL-LHC	HE-LHC	FCC-hh
周長 [km]	27	27	27	98
重心系エネルギー [TeV]	14	14	27	100
超電導電磁石 [T]	8.3	8.3	16	16
ルミノシティ $[10^{34}\mathrm{cm}^{-2}\mathrm{s}^{-1}]$	1	5	25	30
パイルアップ	27	135	800	1000
運転開始（目標）	稼働中	2026	~2040	~2043

素粒子標準理論から物質の起源・宇宙の起源に迫る新物理へ

- 高エネルギー物理の課題（＝新物理探索）



Ref: arXiv:1808.10567

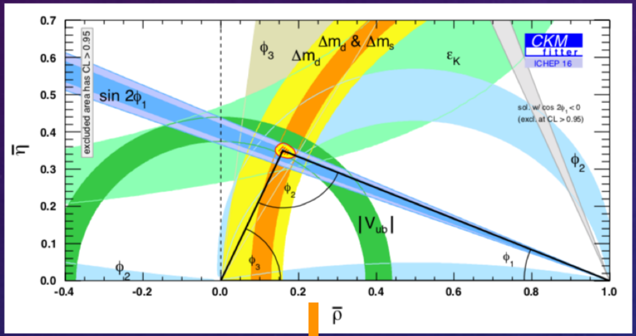
The Belle II Physics Book

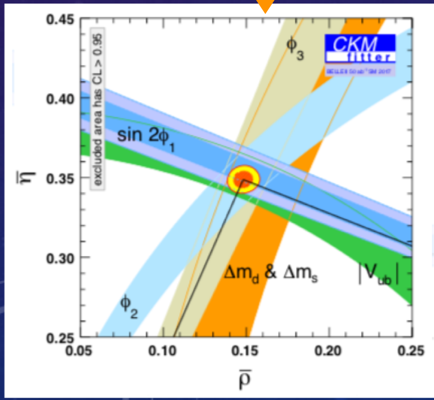
690ページ！

Belle II: ルミノシティフロンティア

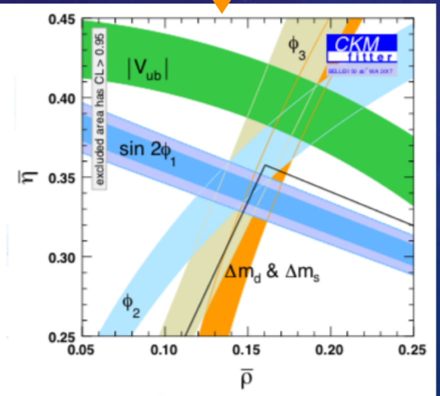
- $B(b), D(c), \tau$ を大量に生成 → フレーバー物理の精密測定から新物理を探る
  - エネルギーフロンティアと相補的な探索
  - 相補的≠クロスチェック: エネルギーフロンティアで探索が難しい新物理にも感度

Unitarity Triangle





標準理論



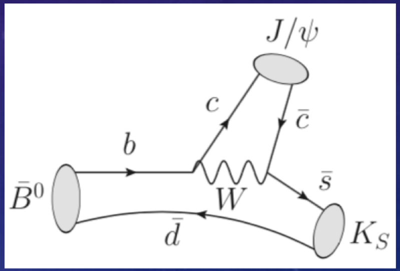
Current world average

New source of CPV

$b \to c$ transition

Tree diagramが主な寄与

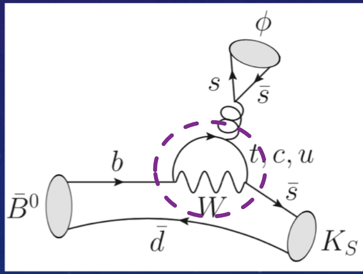
（標準理論のベンチマーク）

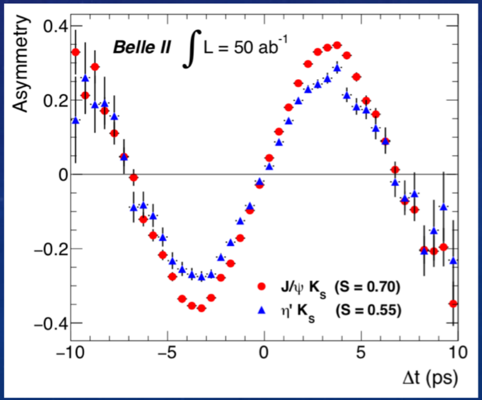


$b \to s$ transition

ループに寄与する

新物理を探す



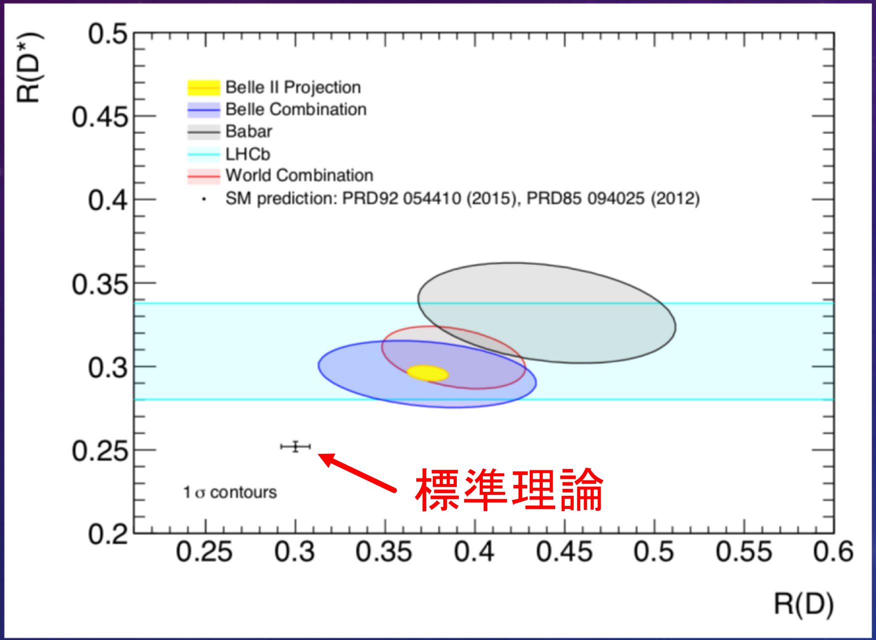


比較

LHCb と Belle II: B中間子アノマリーは新物理の兆候か？

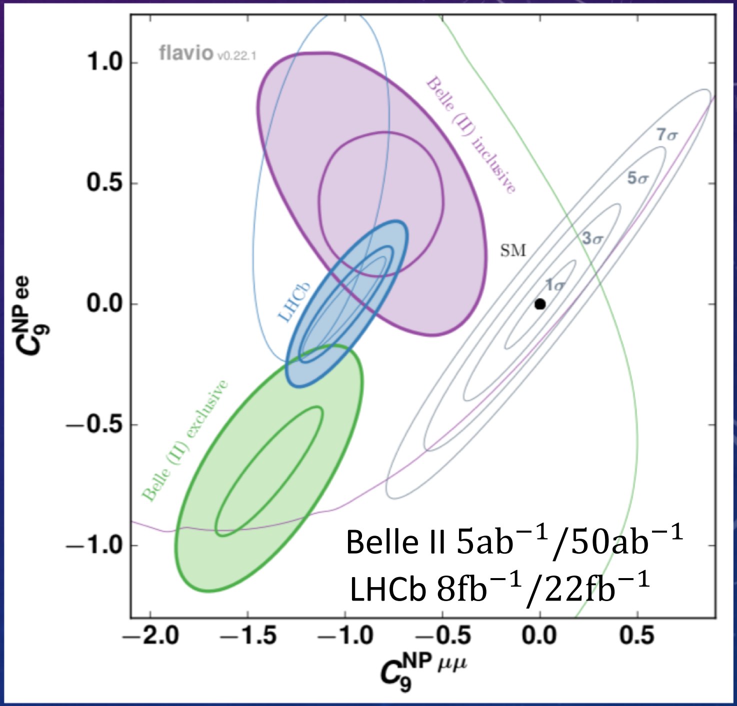
$b \to c\tau\nu$

$Br(B \to D^{(*)}\tau\nu_\tau)$がSMよりも大きい？



$b \to s\mu\mu$

$Br(B \to K^{(*)}\mu^+\mu^-)$が小さい（LHCb）？



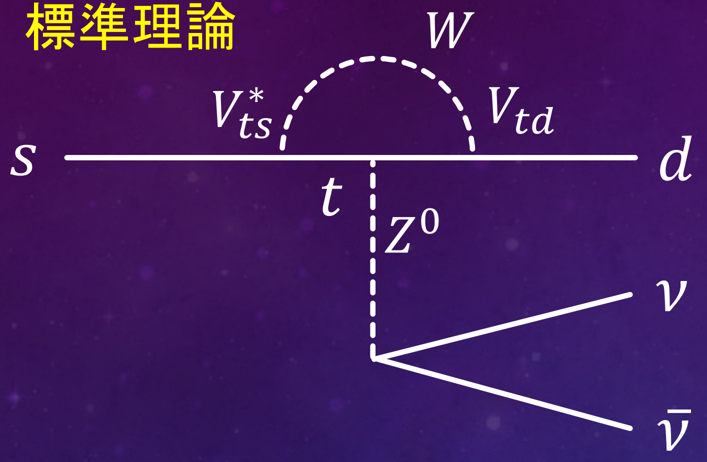
- レプトンフレーバー普遍性の破れ、Charged Higgs 、レプトクォークなどの**新物理**が議論されている ⇒ 今後の展開に注目

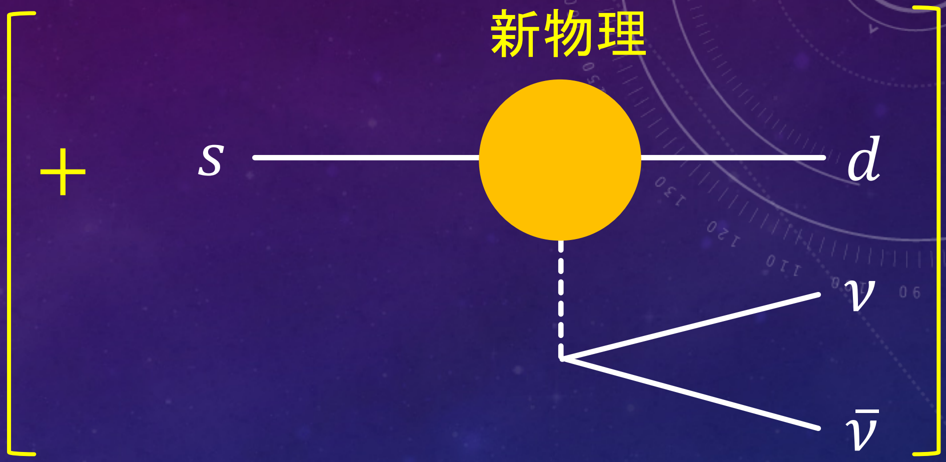
Ref: arXiv:1808.10567

The Belle II Physics Book

K中間子: 原理

標準理論





λ~0.23で

$$\begin{array}{c} u \\ c \\ t \\ \\ \end{array} \begin{pmatrix} 1 & \lambda & \lambda^3 \\ -\lambda & 1 & \lambda^2 \\ \boxed{\lambda^3 \quad -\lambda^2} & & 1 \end{pmatrix}$$
$$\qquad d \quad\; s \quad\; b$$

なので、 $|V_{ts}^* V_{td}| \sim 5 \times 10^{-4}$

標準理論は強く抑制される

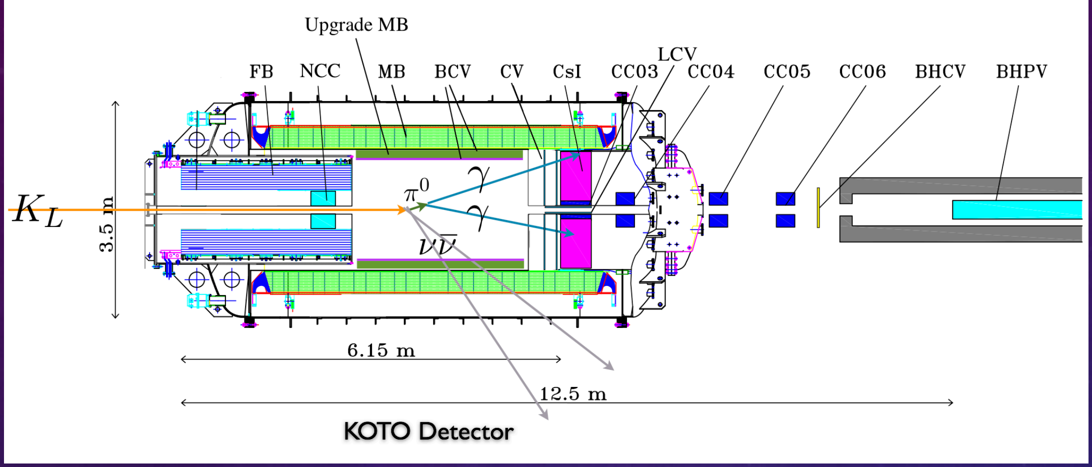
⇒ 新物理の寄与が見えやすい

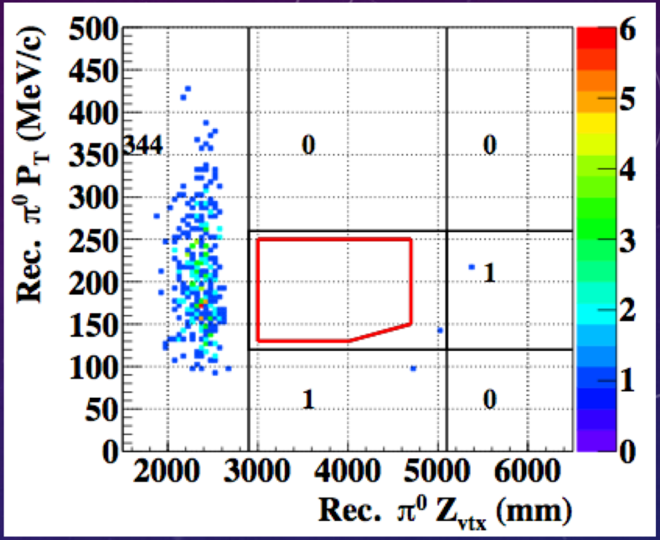
- $K^+ \to \pi^+ \nu \bar{\nu}$
- $K_L \to \pi^0 \nu \bar{\nu}$

の分岐比の測定が新物理に感度を持つ

K 中間子: 実験

KOTO実験 ref: ICHEP2018 by 塩見さん





$K^+ \to \pi^+ \nu\bar{\nu}$

$Br(SM) = (0.85 \pm 0.07) \times 10^{-10}$

現在の測定

E949: $Br = (1.73^{+1.15}_{-1.05}) \times 10^{-10}$

CERN: NA62実験 が稼働中

$O(100)$事象を集めて分岐比の精密測定へ

$K_L \to \pi^0 \nu\bar{\nu}$

$Br(SM) = (3.00 \pm 0.30) \times 10^{-11}$

現在の測定(上限)

KOTO:$Br < 3.0 \times 10^{-9}$ $at\ 90\%CL$

Grossman-Nir bound: $Br < 1.5 \times 10^{-9}$

J-PARC: KOTO実験

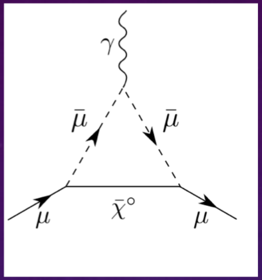
- 新しい標的を設置(2019)
- Beam power: 50kW → 90kW
- $Br < 10^{-10}$の測定へ

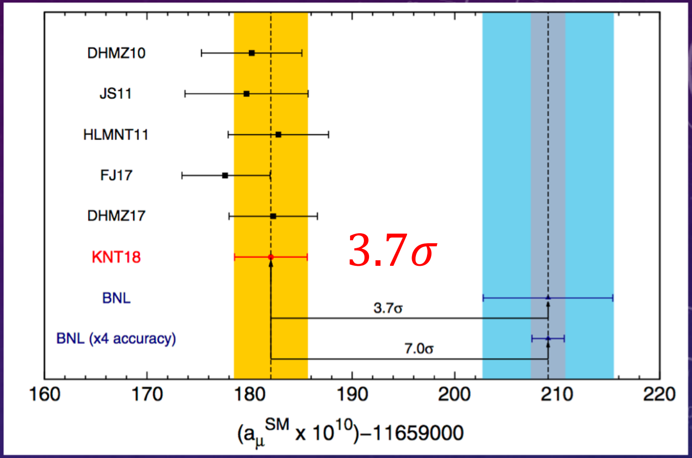
磁気モーメント($g-2$)と電気双極子モーメント(EDM)

PHYSICAL REVIEW D97, 114025 (2018)

- $g-2$

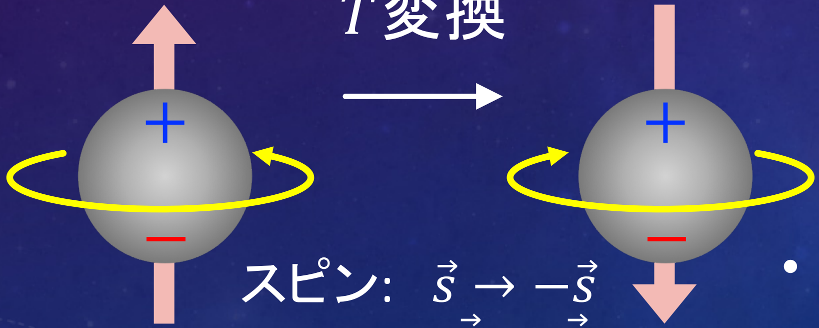
$$\vec{\mu} = g\frac{e}{2m}\vec{s}$$





- ディラック粒子は$g=2$
- 測定ではQEDなどの補正によりずれる
- BNL E821の測定に理論値からのずれ
    - ミューオン貯蔵リングをFermilabに移設して測定精度をあげる計画(E989)
    - J-PARC Muon g-2/EDM実験: 超冷ミューオンビームを用いる手法で検証へ
- EDM

T変換



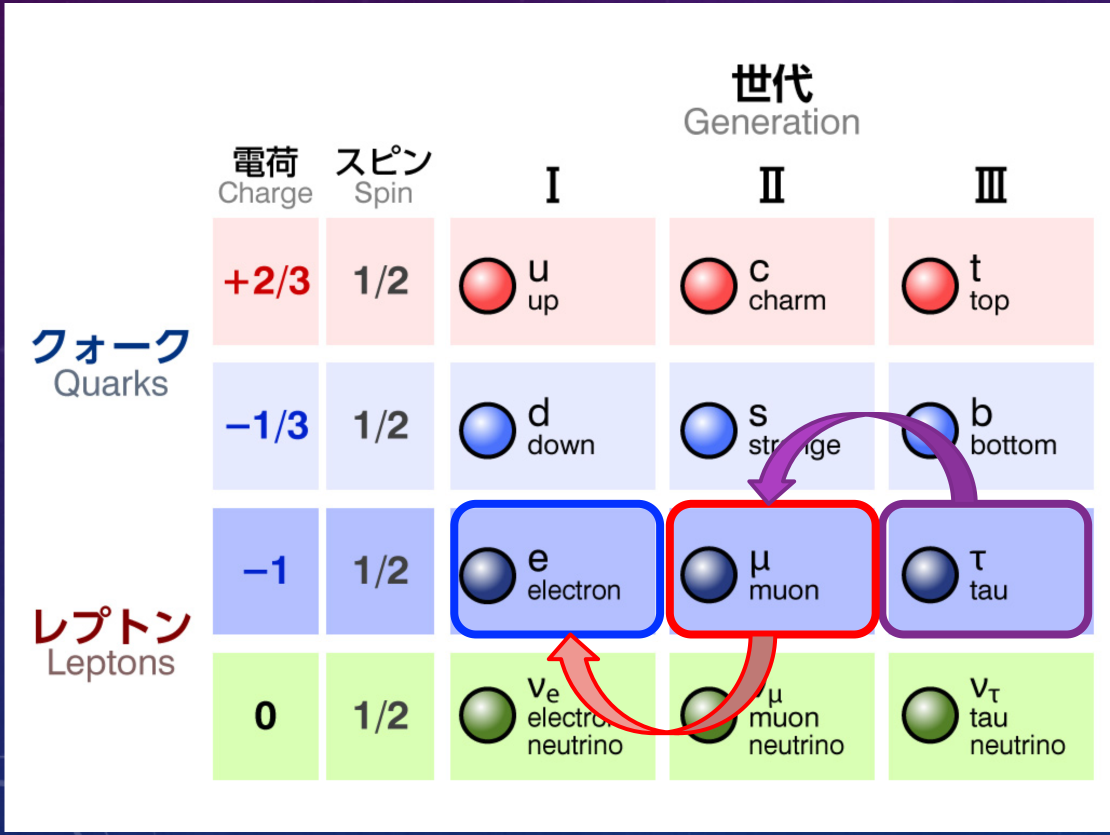
スピン: $\vec{s} \rightarrow -\vec{s}$

EDM: $\vec{d} \rightarrow \vec{d}$

- EDMの存在はT対称性の破れを示す
  標準理論: $|d_\mathrm{n}| \sim 10^{-32} e\ \mathrm{cm}$
  現在の上限: $|d_\mathrm{n}| < 10^{-26} e\ \mathrm{cm}$
- SUSYなどの新物理でEDMが大きくなりうる
- 中性子のEDMはStrong CPの問題にも関連
- TRIUMFのUCNを使った実験(KEK・RCNPが協力): $10^{-27} \sim 10^{-28} e\ \mathrm{cm}$が目標感度
- J-PARCの大強度中性子ビームを利用した実験計画も進められている

LFV: レプトンフレーバー数保存の破れ

- なぜ荷電レプトンでLFVの過程は見つかっていないのか？



	電荷 Charge	スピン Spin	世代 Generation I	II	III
クォーク Quarks	+2/3	1/2	u up	c charm	t top
	−1/3	1/2	d down	s strange	b bottom
レプトン Leptons	−1	1/2	e electron	μ muon	τ tau
	0	1/2	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino

higgstan.com

探索候補

第２世代と第１世代の混合

$\mu \to e\gamma$

$\mu \to e$ 転換

相補的な探索

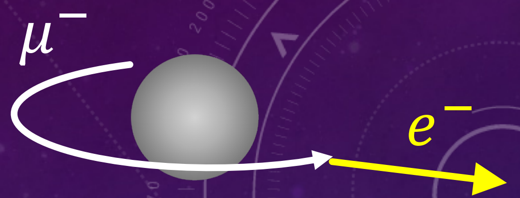
第３世代と第１、２世代の混合

$\tau \to \mu\gamma$

$\tau \to \mu\mu\mu$

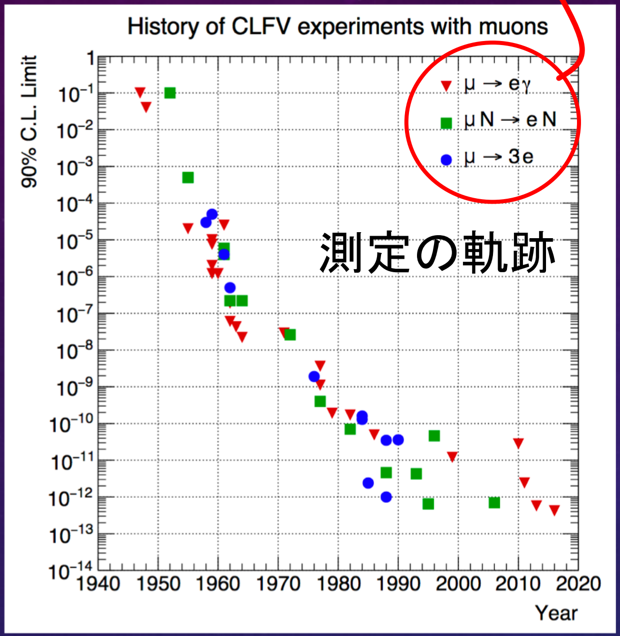
⋮

LFV: レプトンフレーバー数保存の破れ



arXiv:1801.04688

注: 単純に
比較できない



$\mu \to e\gamma$

MEG II (at PSI)

MEGから

- ビーム強度を2倍
- 検出効率を2倍
- 測定精度を2倍

で10倍の感度を狙う

2019年測定開始

3年で6×10^{-14}まで探索

$\mu \to e$ 転換

COMET (at J-PARC)

Phase-1: $Br\sim10^{-15}$

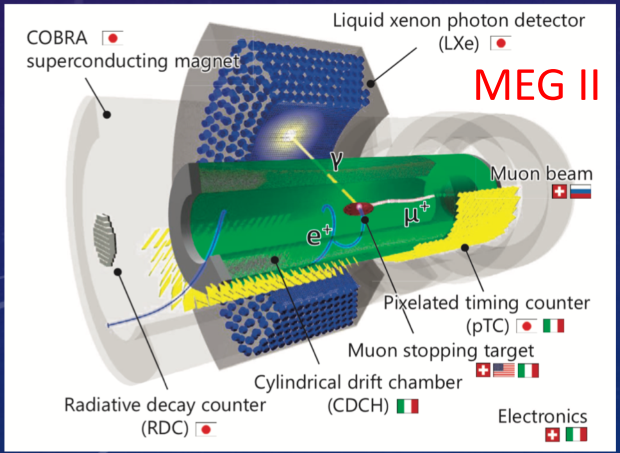
(2020年度以降に予定)

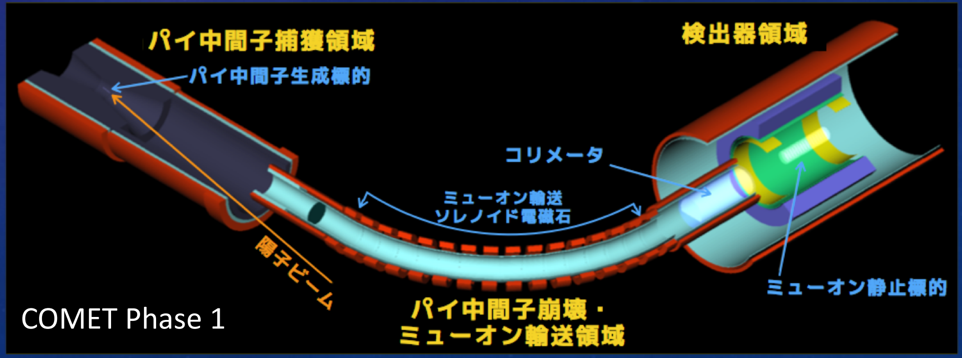
⇒ Phase-2: $Br\sim10^{-17}$

DeeMe (at J-PARC)

シンプルなセットアップで
2.5×10^{-14} を狙う

⇒ 標的変更で: 5×10^{-15}



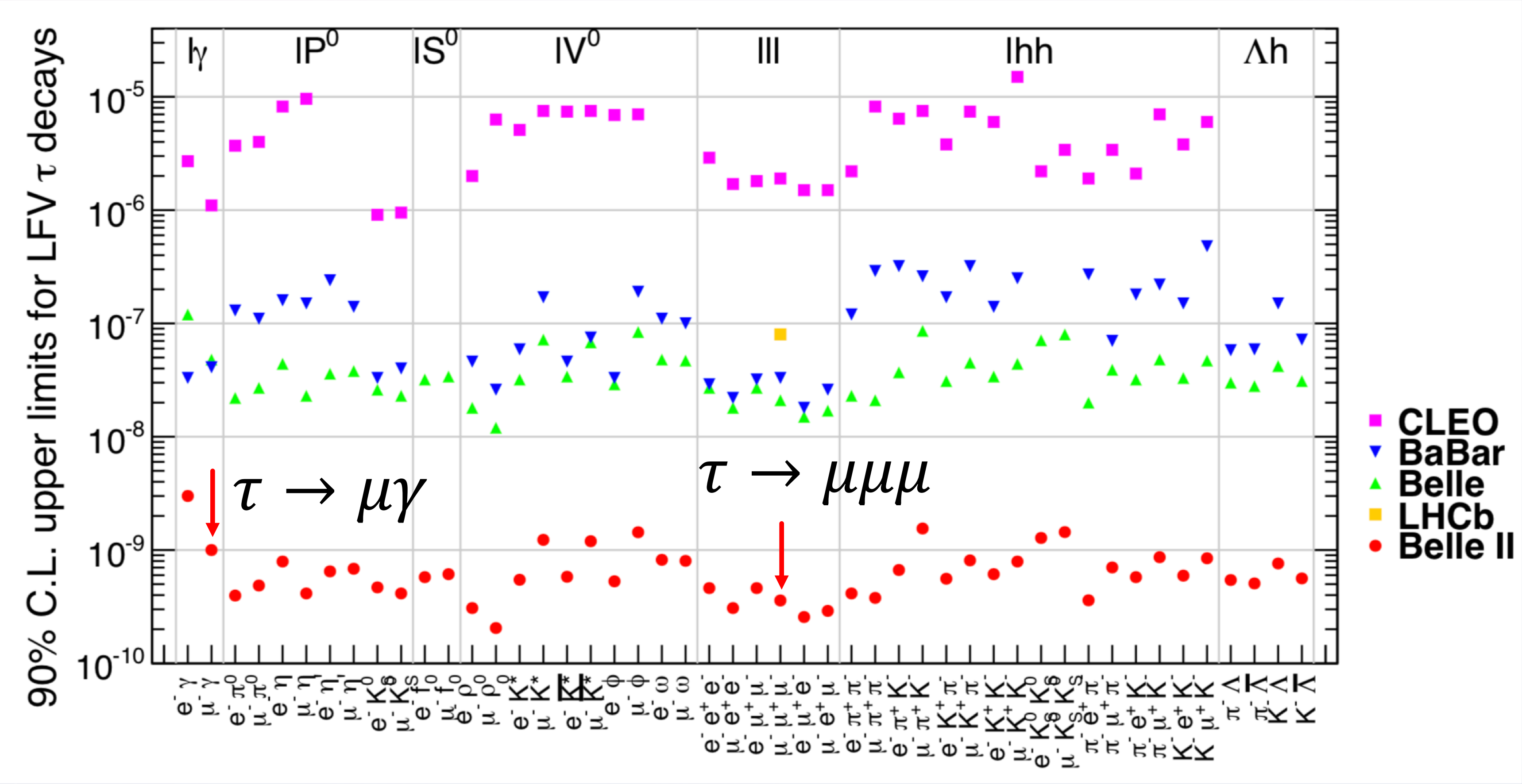


LFV: レプトンフレーバー数保存の破れ

第3世代と第2世代の混合

Ref: arXiv:1808.10567

The Belle II Physics Book



素粒子標準理論から物質の起源・宇宙の起源に迫る新物理へ

- 高エネルギー物理の課題（＝新物理探索）

新粒子探索
SUSY、Charged Higgs, Z’/W’, etc

暗黒物質の正体
← 生成・散乱・対消滅・宇宙観測

ヒッグス粒子の性質
結合定数、自己結合、etc

標準理論の精密測定
→ 標準理論からのズレ

宇宙観測
CMB偏光、宇宙膨張（時間変化）

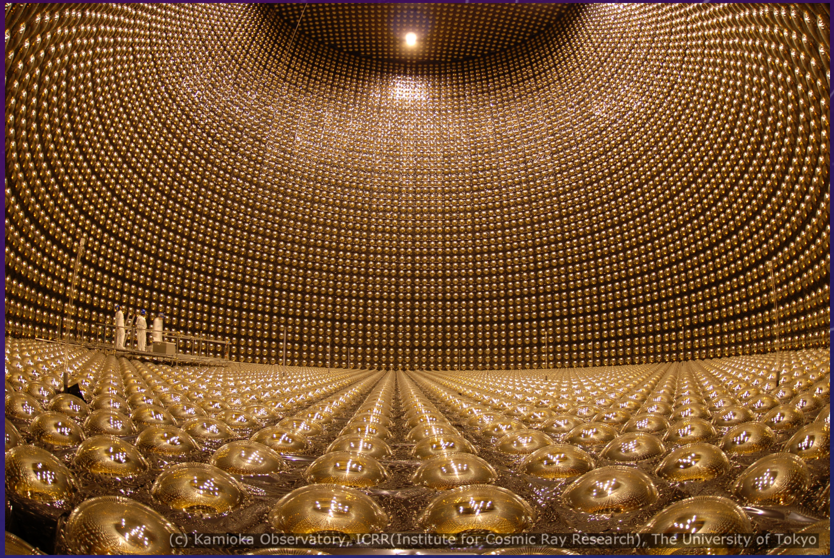
大統一理論の検証

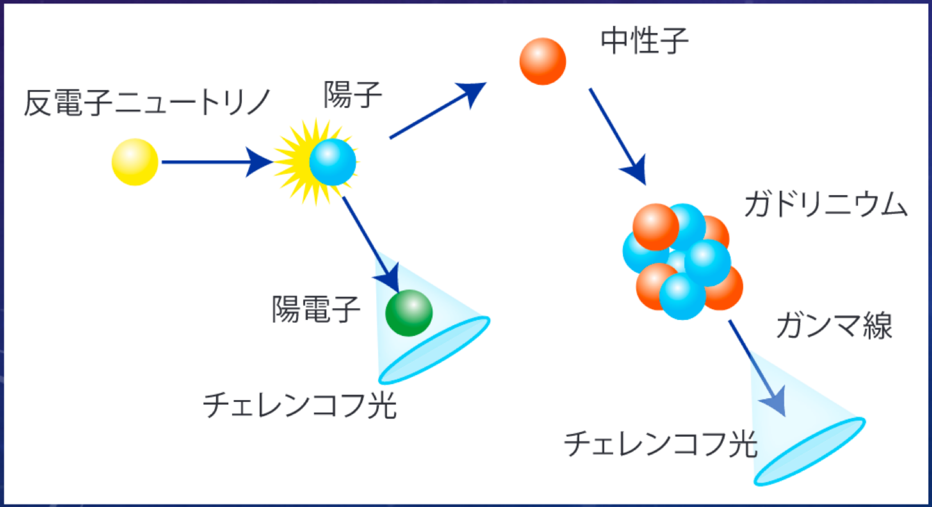
ニュートリノの性質
世代間混合、CP対称性の破れ、
質量（階層性）、マヨラナ性

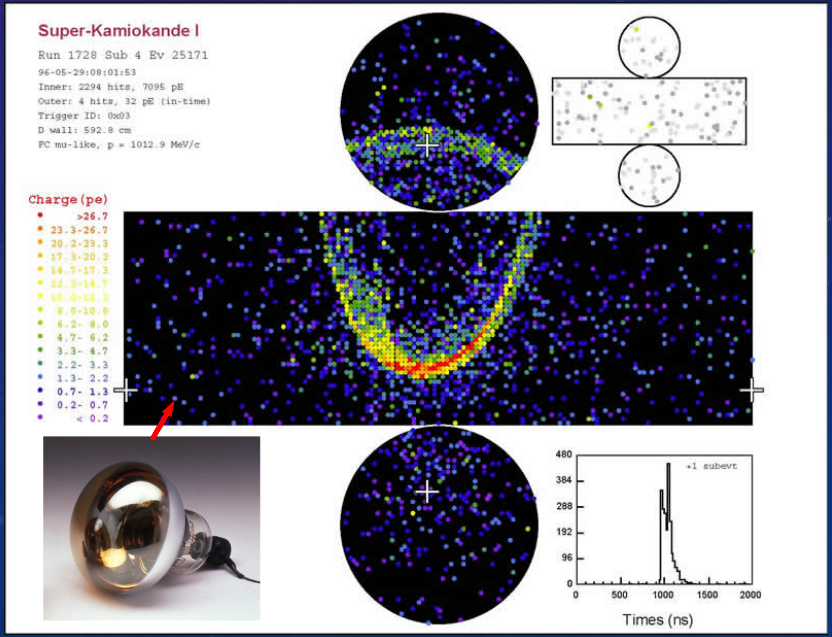
巨大な検出器で探る

スーパーカミオカンデ

- 水チェレンコフ型検出器
  - 有効体積 22.5kton
  - 約11,000本の20インチ光電子増倍管
  - ニュートリノ振動の発見（1998年）
    - 全ての混合角とΔm^2を測定
  - 超純水 → ガドリニウムを入れてSK-Gdへ
    - 超新星背景ニュートリノの観測
    - 1年に1~数イベント（10年で~3σ）



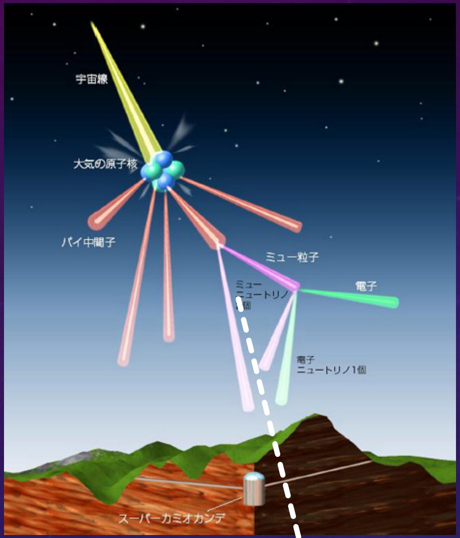


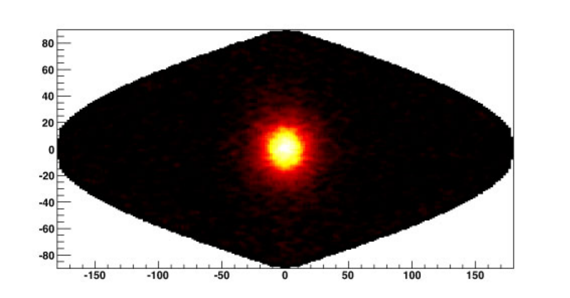


ハイパーカミオカンデ

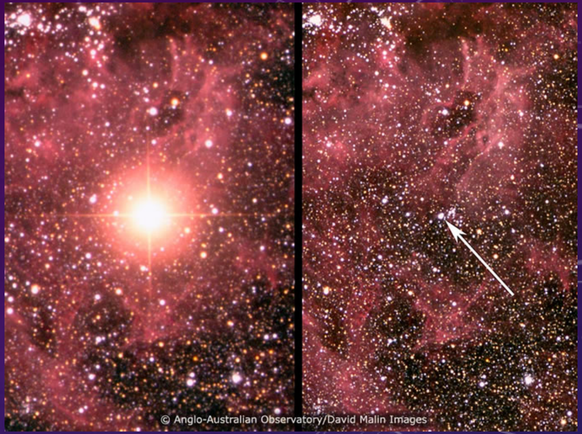
＝次世代のニュートリノ検出器

大気ニュートリノ
質量階層性を決定



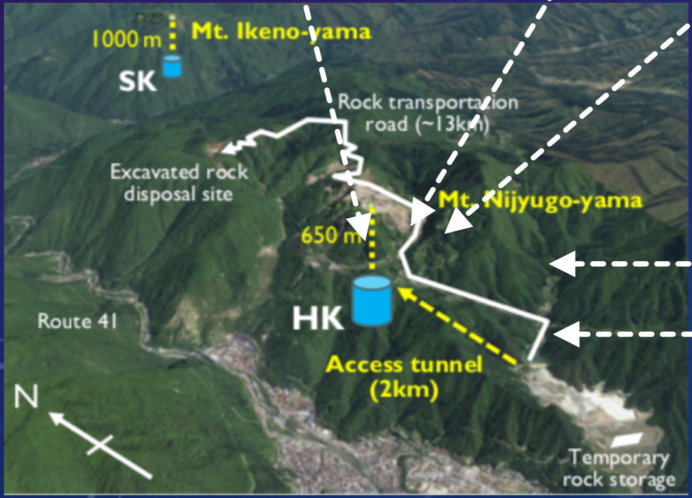


太陽ニュートリノ
太陽内部の物質効果



超新星ニュートリノ
バースト: 爆発メカニズムの解明
背景ニュートリノ: 宇宙の進化

加速器ニュートリノ
ニュートリノのCP対称性の破れ
ニュートリノ混合の精密測定

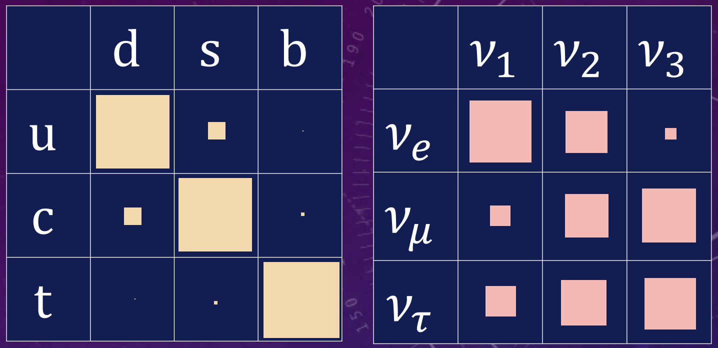


ニュートリノ

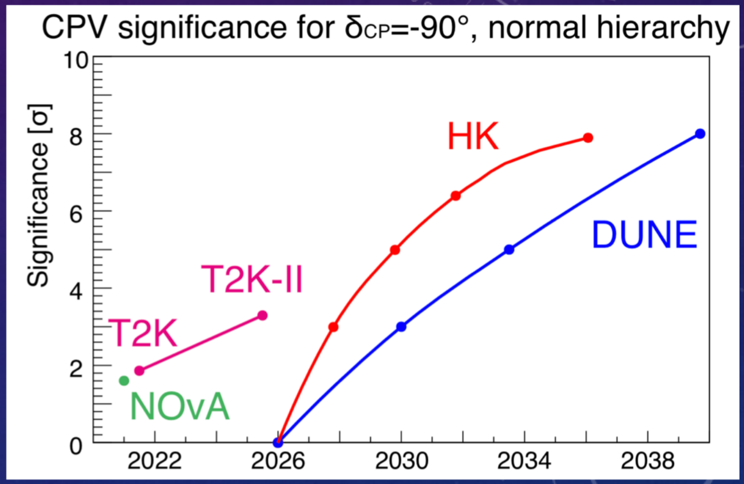
反ニュートリノ

ニュートリノの3世代混合

- クォークセクターと異なり大きく混合
- ニュートリノセクターにおけるCP対称性の破れ
  - T2KがCP対称性の破れを 2σ で示唆
    → ビームを増強しつつ3σを目指す（T2K-II）
  - ハイパーカミオカンデでは 5σ → 精密測定へ
- クォークセクターとの比較から世代間混合とCP対称性の破れの起源を探る
  - Unknown CPVの解明 → 物質の起源に迫る



CKM　　PMNS



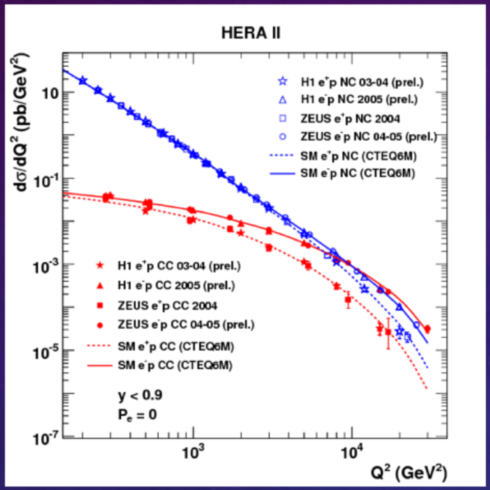
$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$

比較

$P(\overline{\nu_\mu} \rightarrow \overline{\nu_e})$

大統一理論の検証: 陽子崩壊探索

電弱統一理論の検証
（HERA加速器）

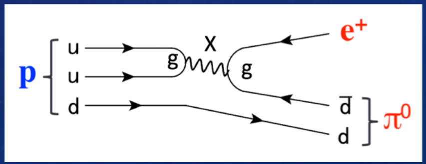


Eur.Phys.J.C75 (2015) 12, 580

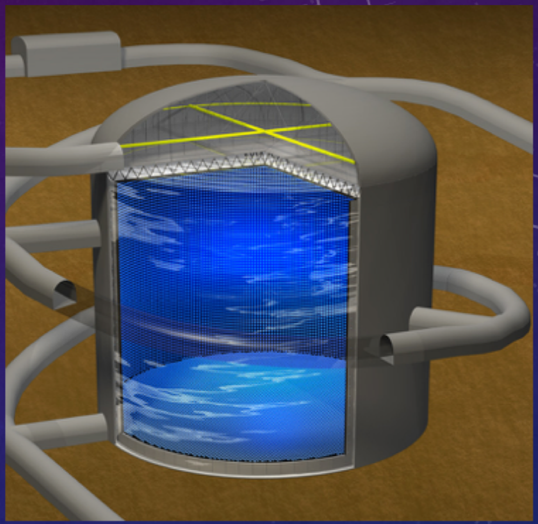
> 10^{15}GeVに大統一理論が？

・・・どうやってアクセスするか

GUTスケールの仮想粒子の
交換による稀事象
⟹ 陽子崩壊

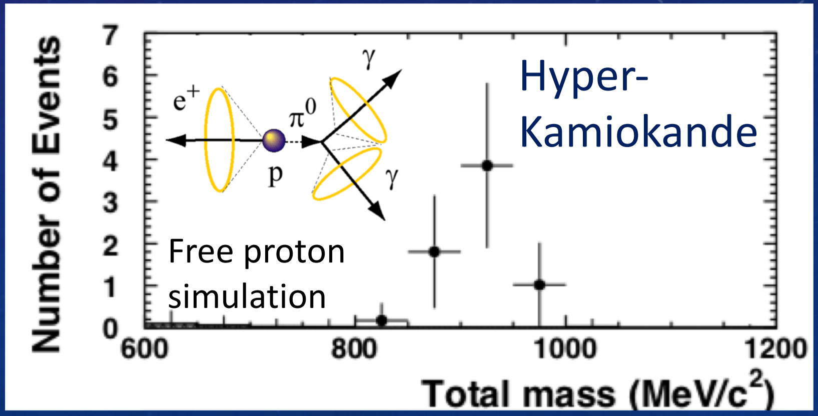


ニュートリノ検出器は大量の
陽子を含む陽子崩壊検出器

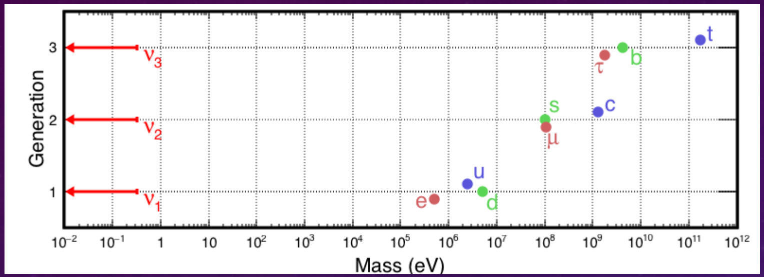


$\tau \sim 10^{34}$yr（SK）→ 10^{35}yr へ

もし、現在のlimitに寿命があれば・・・



マヨラナ性の検証: ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊の探索



ニュートリノの質量はなぜ極端に軽いか？

→ シーソー機構*による説明が有力

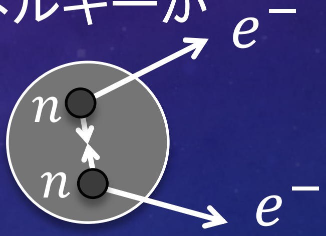
*Minkowski;Yanagida; Glashow; Gell-Mann, Ramond, Slansky; Mohapatra, Senjanovic

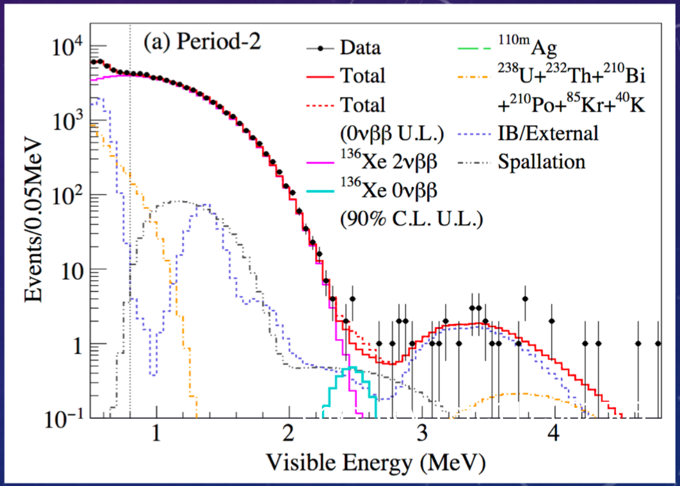
重い右巻きニュートリノで軽い左巻きニュートリノを説明

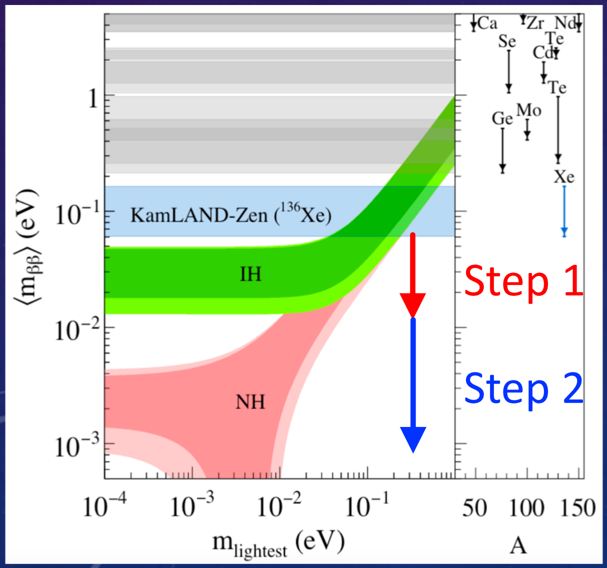
マヨラナ性（粒子と反粒子が同一粒子）が条件の一つ

→ ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊($0\nu2\beta$)を探す

信号はシンプル（2つの電子の合計エネルギーがピークを作る）だが頻度が少ない







- KamLAND-Zenが逆階層（ν_eが比較的重いケース）に迫る
- Step 1: 逆階層を探索範囲に入れた実験が各国で準備中
  - 10年以内には結果が出る見込み
- Step 2: 順階層を視野に入れた将来計画はR&Dの段階
  - 高いエネルギー分解能が必須 → $2\nu2\beta$を抑える

まとめ

- ヒッグス粒子の発見で標準理論の粒子が揃う
- 次の問いに答えるには新物理が必要
  - 方向性はなんとなく見えている？ → 発見を狙った将来計画が進行中
- ~2040年ぐらいまでには次世代大型計画の結果も一通り出る見通し
  - まずは、フレーバー物理の結果に注目