

陽子崩壊

石塚正基（東京理科大学）

2021年6月10日

高エネルギー将来計画委員会：第11回 勉強会

Contents

- 陽子崩壊を探索するモチベーション
- 陽子崩壊（核子崩壊）を探索する実験（Super-Kamiokande）
- 陽子崩壊探索の展望

陽子崩壊を探索するモチベーション

素粒子標準模型

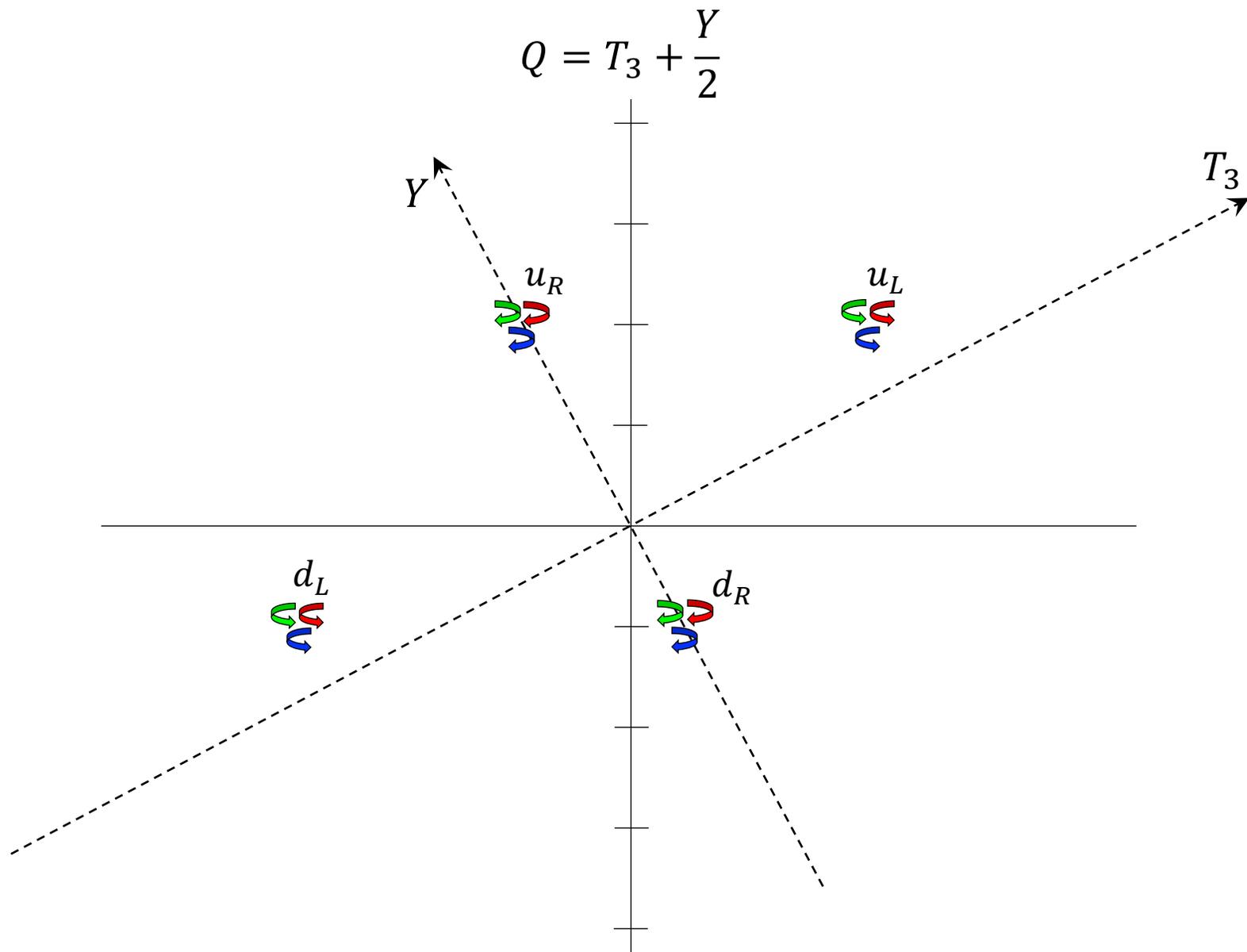
Fermions: quarks

$$\left(N_{SU(3)}, N_{SU(2)}, \frac{Y}{2} \right)$$

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L \quad \left(\mathbf{3}, \mathbf{2}, \frac{1}{6} \right)$$

$$u_R \quad \left(\mathbf{3}, \mathbf{1}, \frac{2}{3} \right)$$

$$d_R \quad \left(\mathbf{3}, \mathbf{1}, -\frac{1}{3} \right)$$



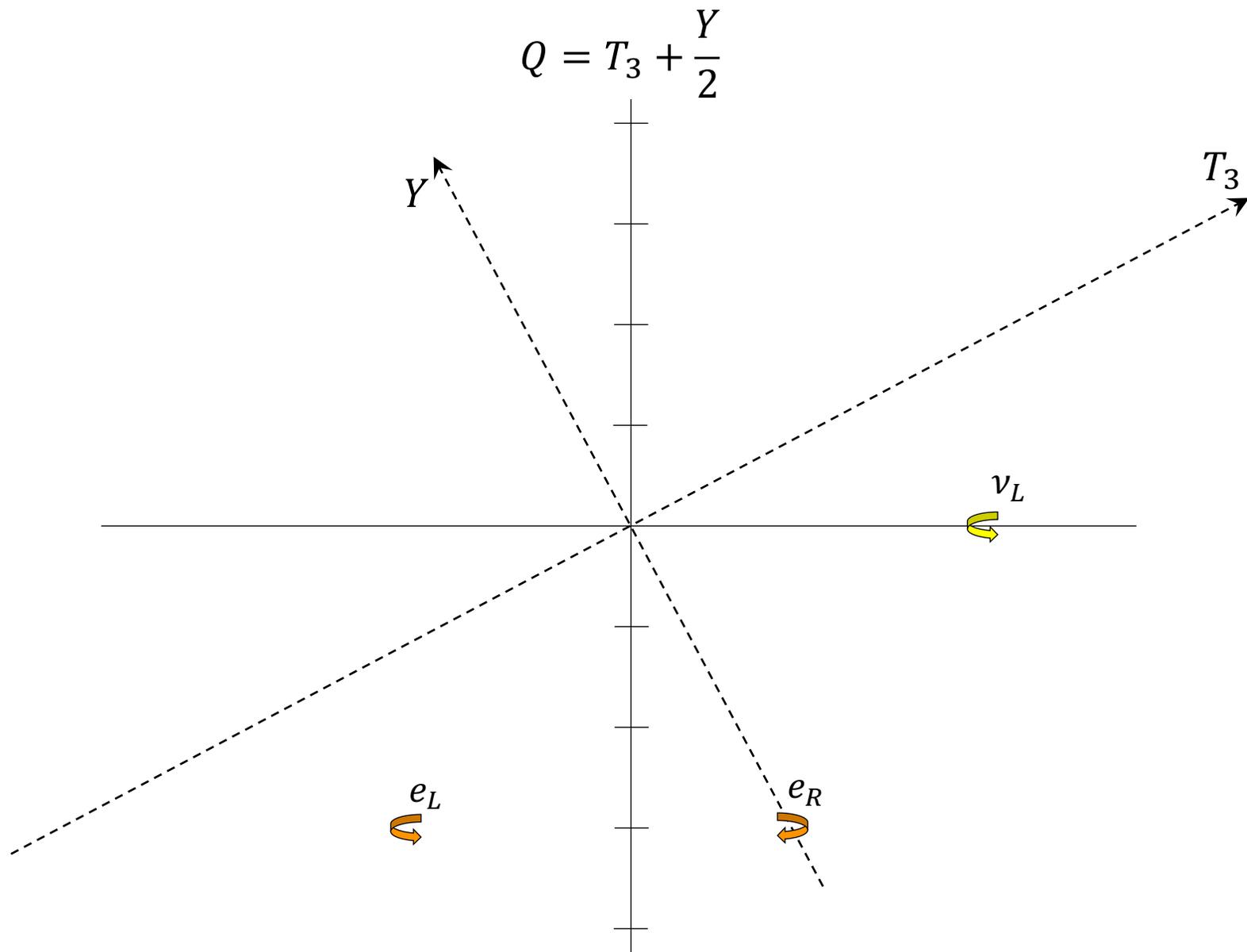
素粒子標準模型

Fermions: leptons

$$\left(N_{SU(3)}, N_{SU(2)}, \frac{Y}{2} \right)$$

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}_L \quad \left(\mathbf{1}, \mathbf{2}, -\frac{1}{2} \right)$$

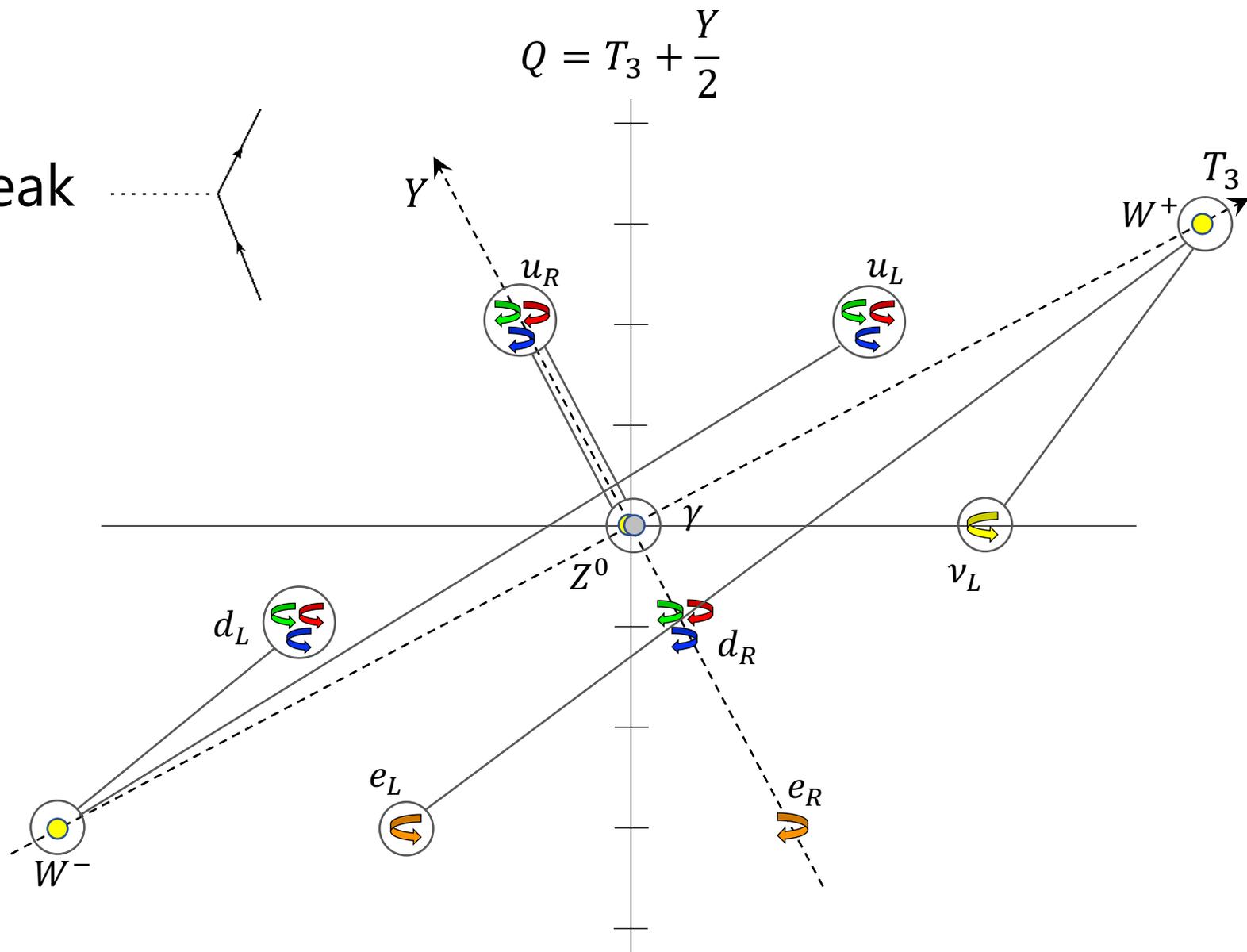
$$e_R \quad (\mathbf{1}, \mathbf{1}, -1)$$



素粒子標準模型

Gauge bosons: electroweak

$SU(2) \times U(1)$



素粒子標準模型

まとめると

Fermions (物質)

Quarks & Leptons

反粒子

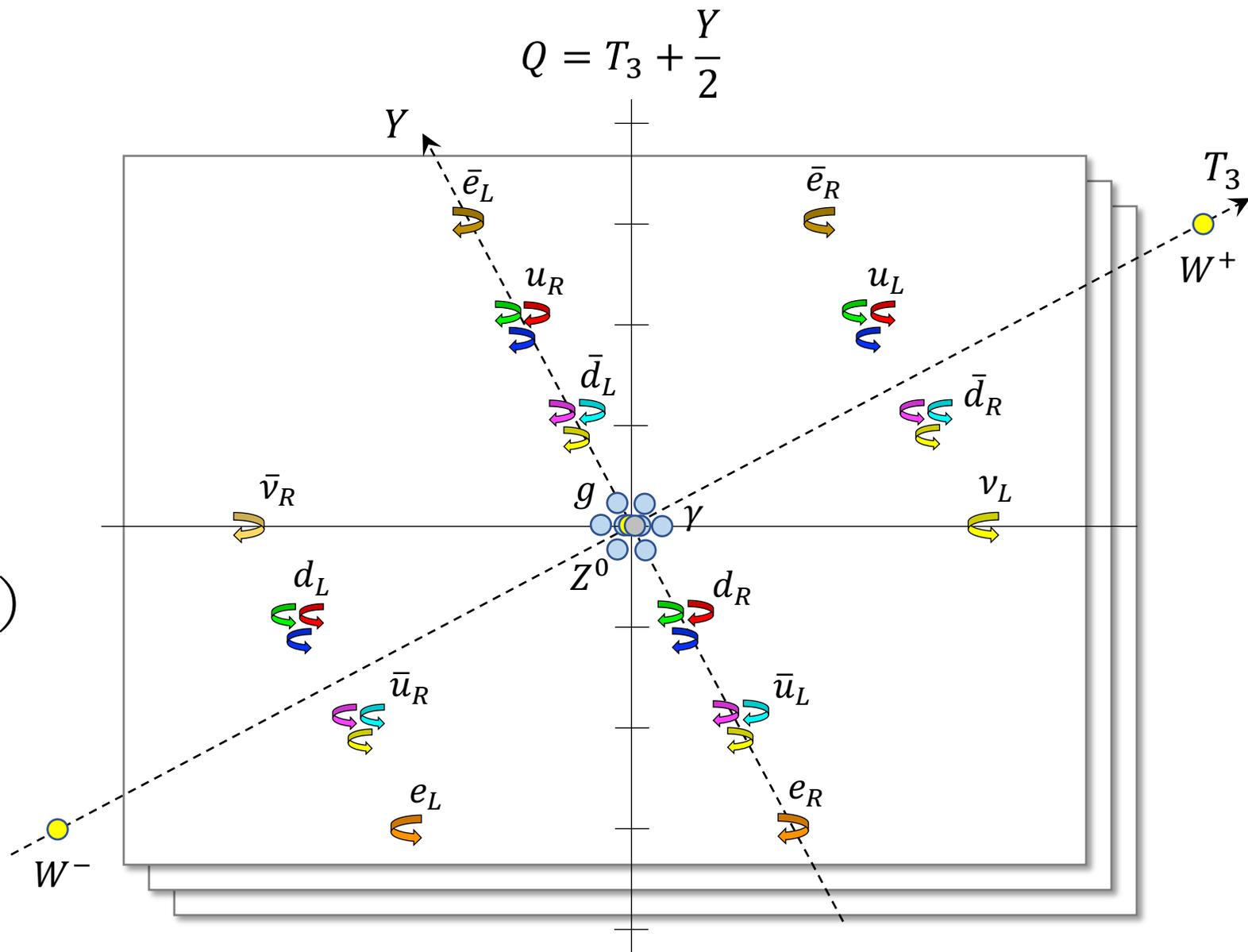
3 世代

Gauge bosons (相互作用)

$SU(3) \times SU(2) \times U(1)$

自然はそうなっている。

が、標準模型を一通り見ると、寄せ集め感はある。



素粒子標準模型 \Rightarrow 大統一理論

Fermions (物質)

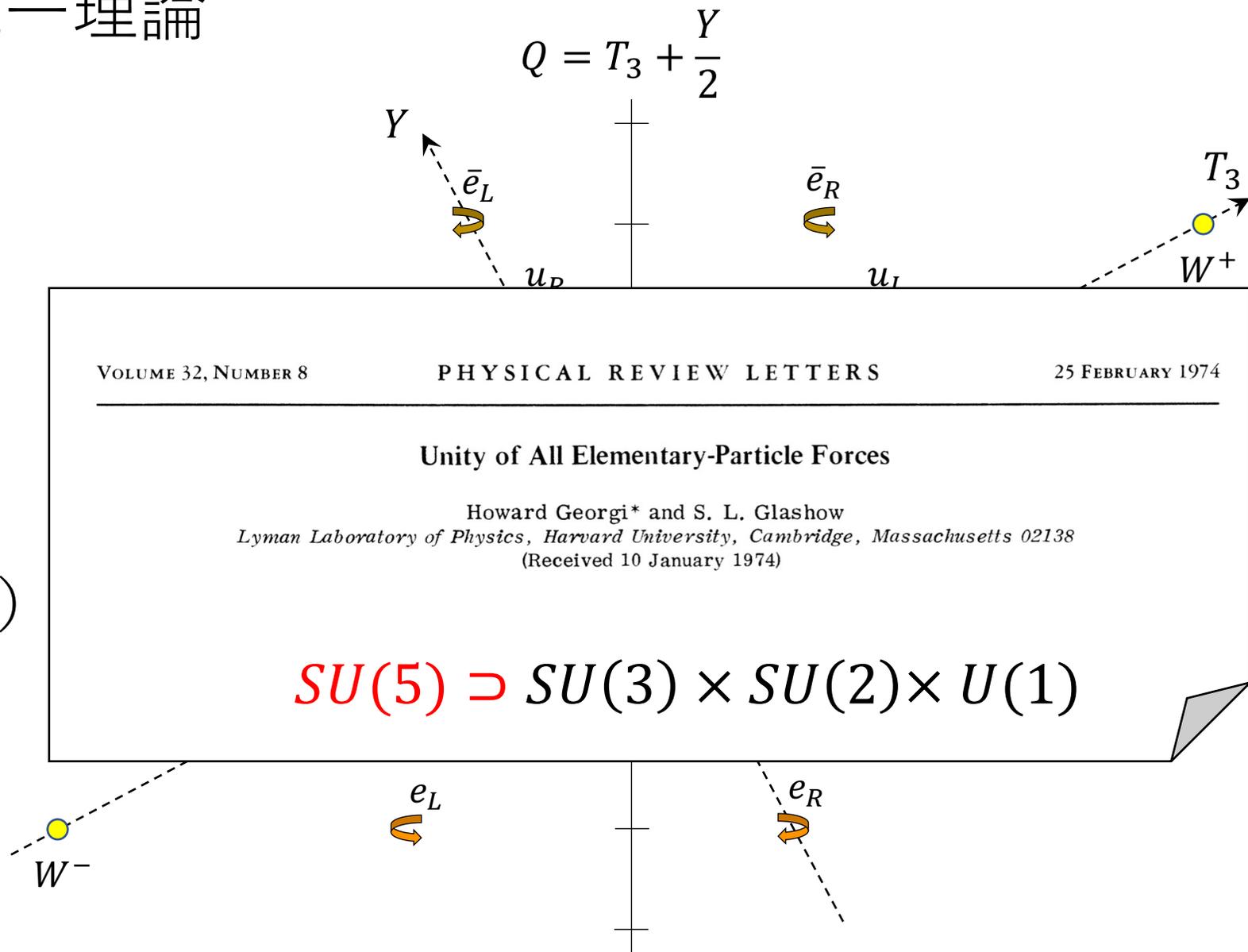
Quarks & **Leptons**

\Rightarrow 統一

Gauge bosons (相互作用)

$SU(3)$ \times **$SU(2)$** \times **$U(1)$**

\Rightarrow 統一



大統一理論: $SU(5)$

物質

5* 表現

$$5^* = \begin{pmatrix} d_R^c \\ d_R^c \\ d_R^c \\ e_L \\ -\nu_L \end{pmatrix}$$

10 表現

$$10 = \begin{pmatrix} 0 & u_R^c - u_R^c & -u_L & -d_L \\ -u_R^c & 0 & u_R^c & -u_L & -d_L \\ u_R^c & -u_R^c & 0 & -u_L & -d_L \\ u_L & u_L & u_L & 0 & -e_R^c \\ d_L & d_L & d_L & e_R^c & 0 \end{pmatrix}$$

1 表現

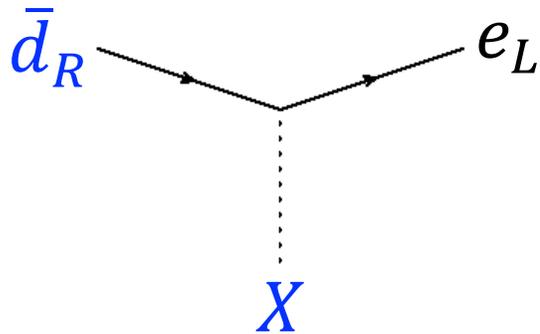
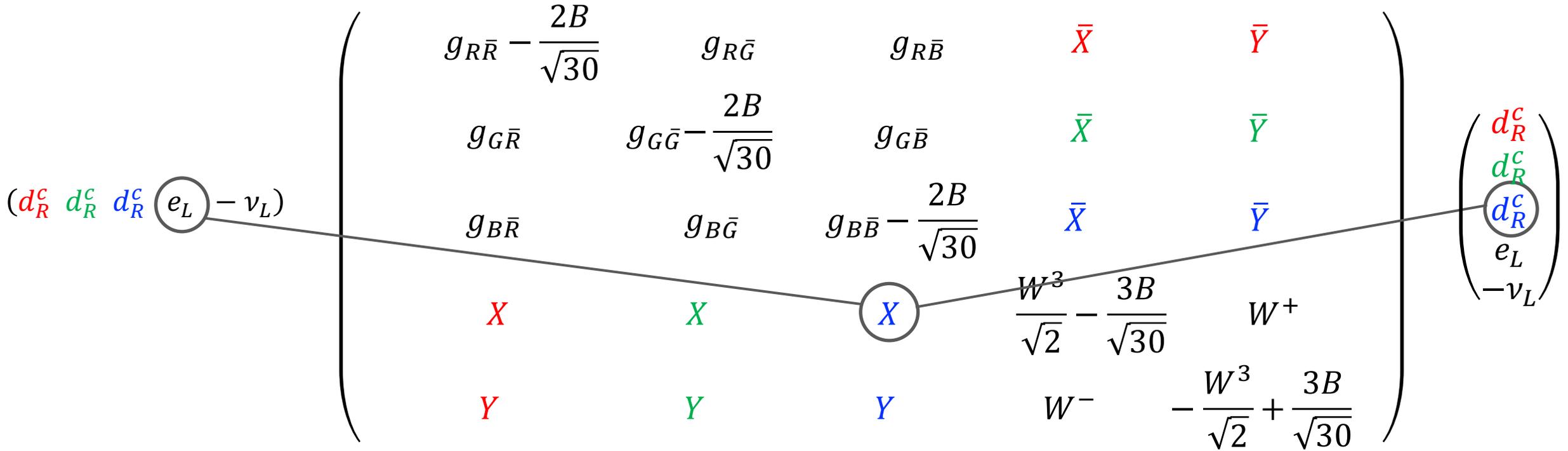
$$1 = \nu_R^c$$

相互作用

24 表現

$$V = \begin{pmatrix} g_{R\bar{R}} - \frac{2B}{\sqrt{30}} & g_{R\bar{G}} & g_{R\bar{B}} & \bar{X} & \bar{Y} \\ g_{G\bar{R}} & g_{G\bar{G}} - \frac{2B}{\sqrt{30}} & g_{G\bar{B}} & \bar{X} & \bar{Y} \\ g_{B\bar{R}} & g_{B\bar{G}} & g_{B\bar{B}} - \frac{2B}{\sqrt{30}} & \bar{X} & \bar{Y} \\ X & X & X & \frac{W^3}{\sqrt{2}} - \frac{3B}{\sqrt{30}} & W^+ \\ Y & Y & Y & W^- & -\frac{W^3}{\sqrt{2}} + \frac{3B}{\sqrt{30}} \end{pmatrix}$$

大統一理論: $SU(5)$



- 力の統一
- Quarks \leftrightarrow Leptons (バリオン数非保存)

大統一理論: $SU(5)$

$$\begin{pmatrix}
 (d_R^c \ d_R^c \ d_R^c \ e_L \ -\nu_L) &
 \begin{pmatrix}
 g_{R\bar{R}} - \frac{2B}{\sqrt{30}} & g_{R\bar{G}} & g_{R\bar{B}} \\
 g_{G\bar{R}} & g_{G\bar{G}} - \frac{2B}{\sqrt{30}} & g_{G\bar{B}} \\
 g_{B\bar{R}} & g_{B\bar{G}} & g_{B\bar{B}} - \frac{2B}{\sqrt{30}}
 \end{pmatrix}
 &
 \begin{pmatrix}
 X & Y & Y \\
 X & Y & Y \\
 X & Y & Y
 \end{pmatrix}
 &
 \begin{pmatrix}
 d_R^c \\
 d_R^c \\
 d_R^c \\
 e_L \\
 -\nu_L
 \end{pmatrix}
 \end{pmatrix}
 \begin{pmatrix}
 \frac{W^3}{\sqrt{2}} - \frac{3B}{\sqrt{30}} & W^+ \\
 W^- & -\frac{W^3}{\sqrt{2}} + \frac{3B}{\sqrt{30}}
 \end{pmatrix}$$

X, Y は非常に重いので低いエネルギー（現在の実験で調べられる範囲）では

Fermions (物質)

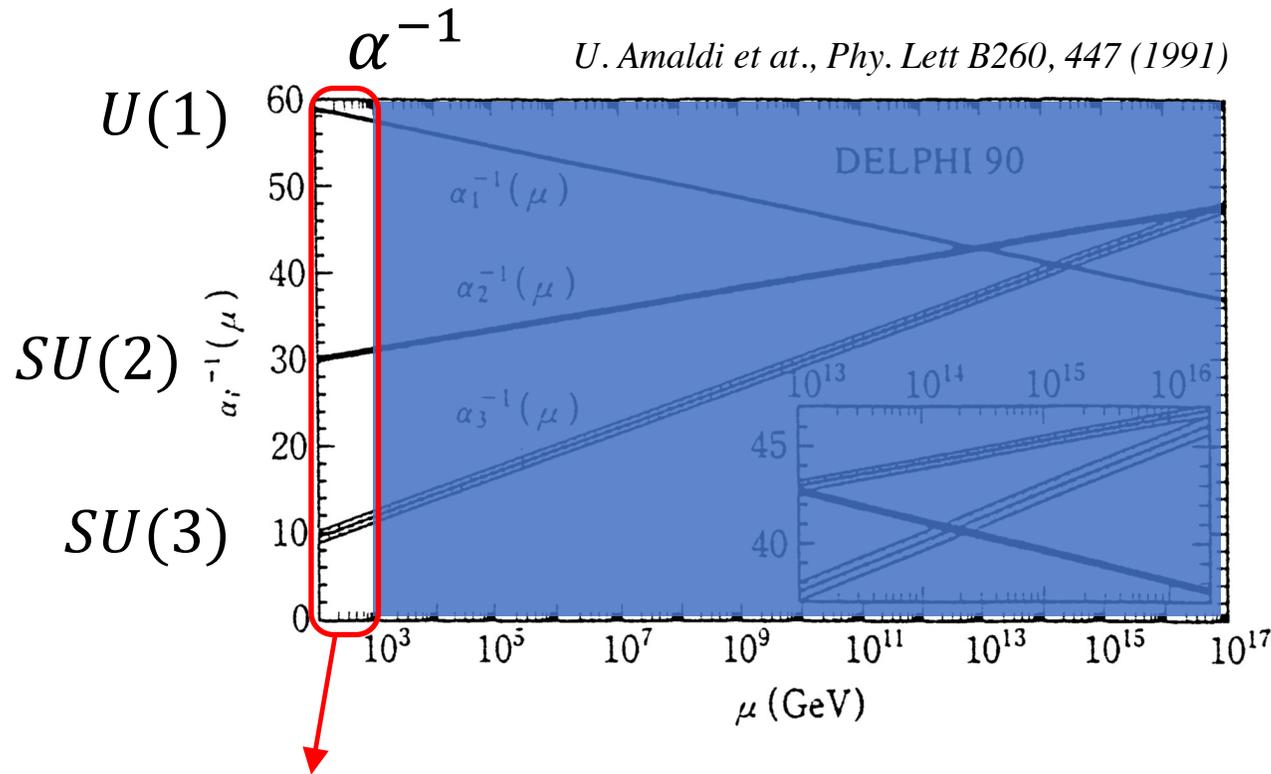
Quarks & Leptons

Gauge bosons (相互作用)

$SU(5) \rightarrow SU(3) \times SU(2) \times U(1)$

大統一理論：その他のモチベーション

① ゲージ結合定数の統一



それぞれのエネルギー依存性が高いエネルギーでの統一を示唆している

② 電荷の量子化

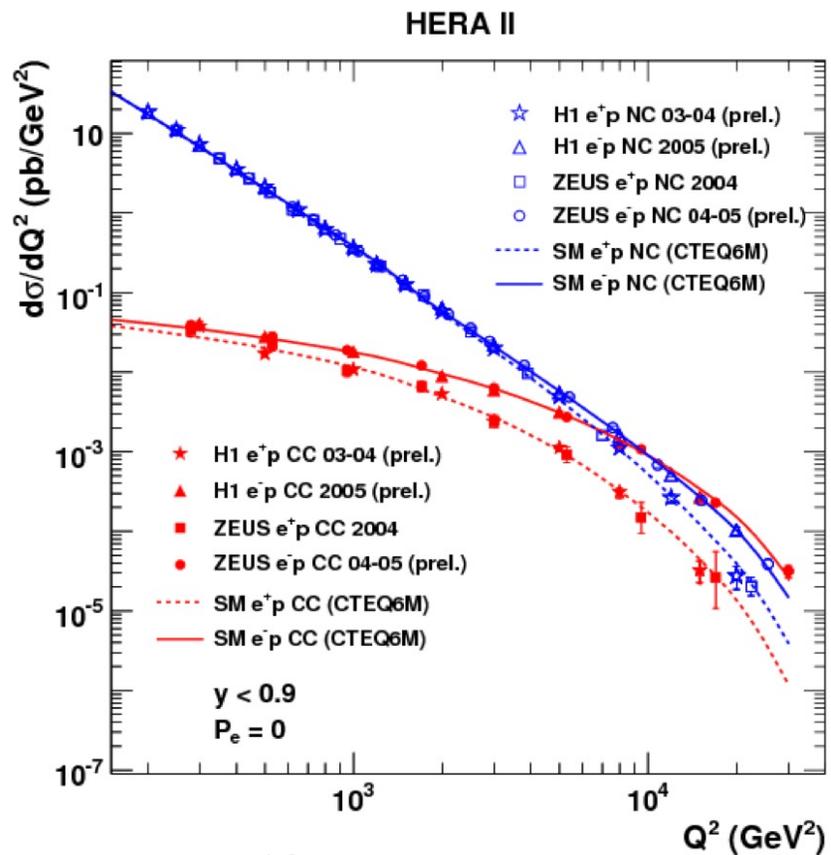
- 陽子と電子の電荷の和が 0 であることの自然な説明

③ バリオン数非保存の導入

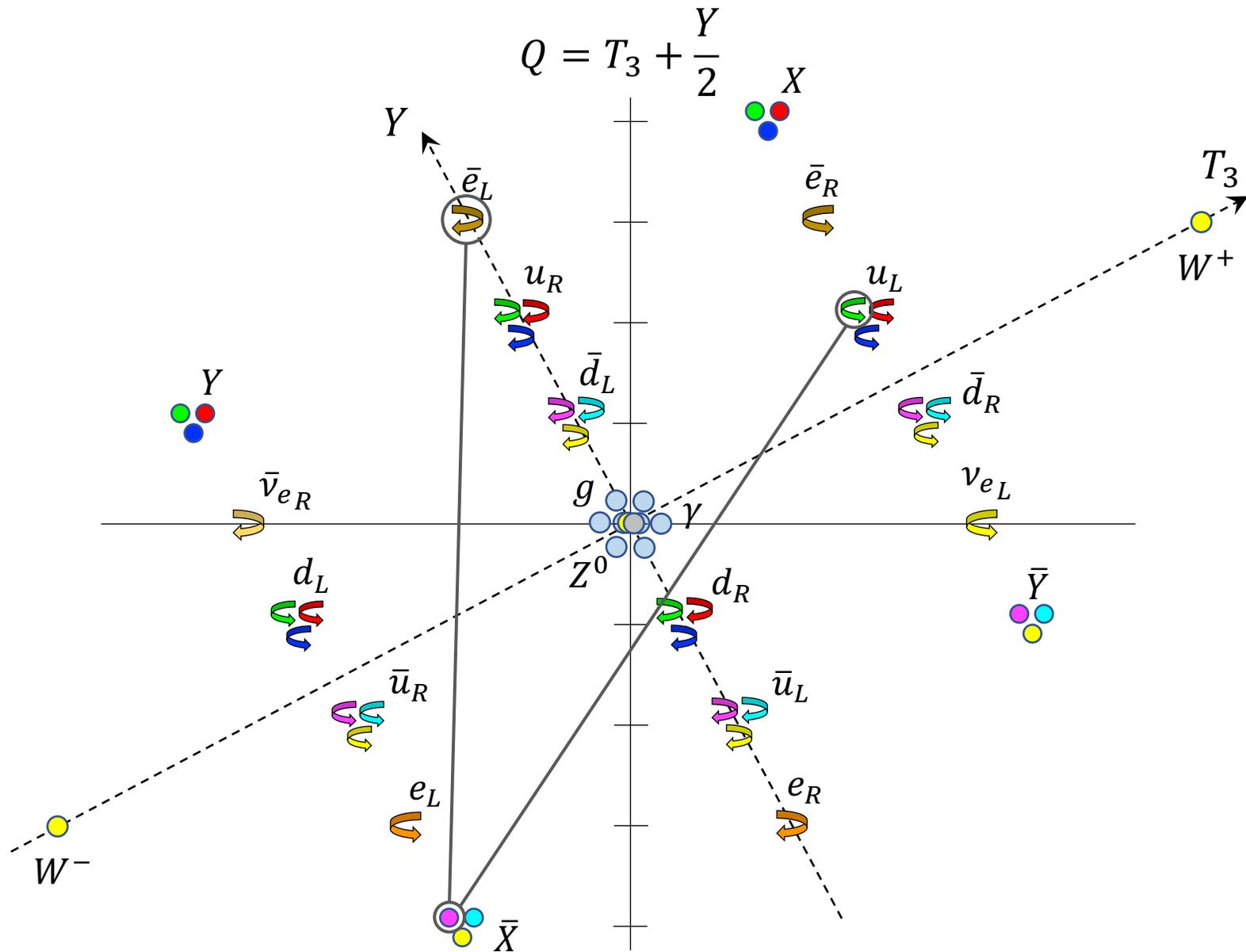
- バリオン数保存の理論的な裏付けがない
- 一方で、物質の起源を説明するためにはバリオン数の破れが必要とされる
 - サハロフの 3 条件

大統一理論：検証

どうやって検証するか？

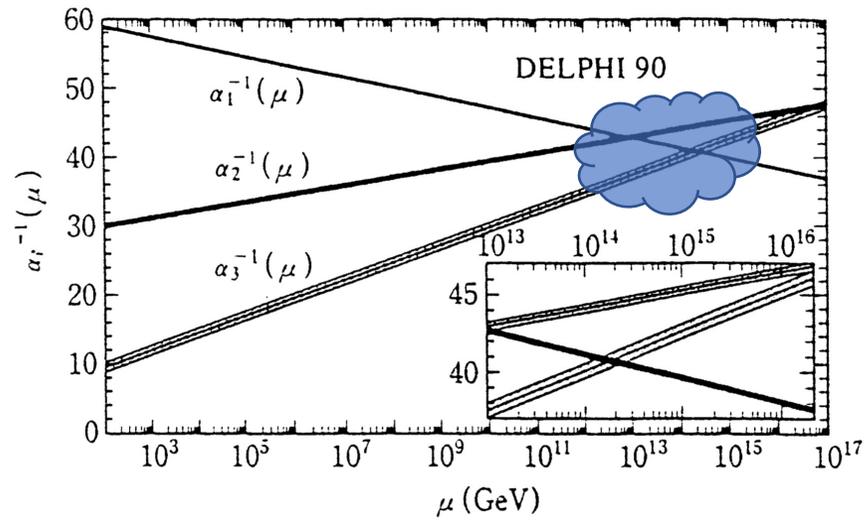


電弱統一 @ 100 GeV



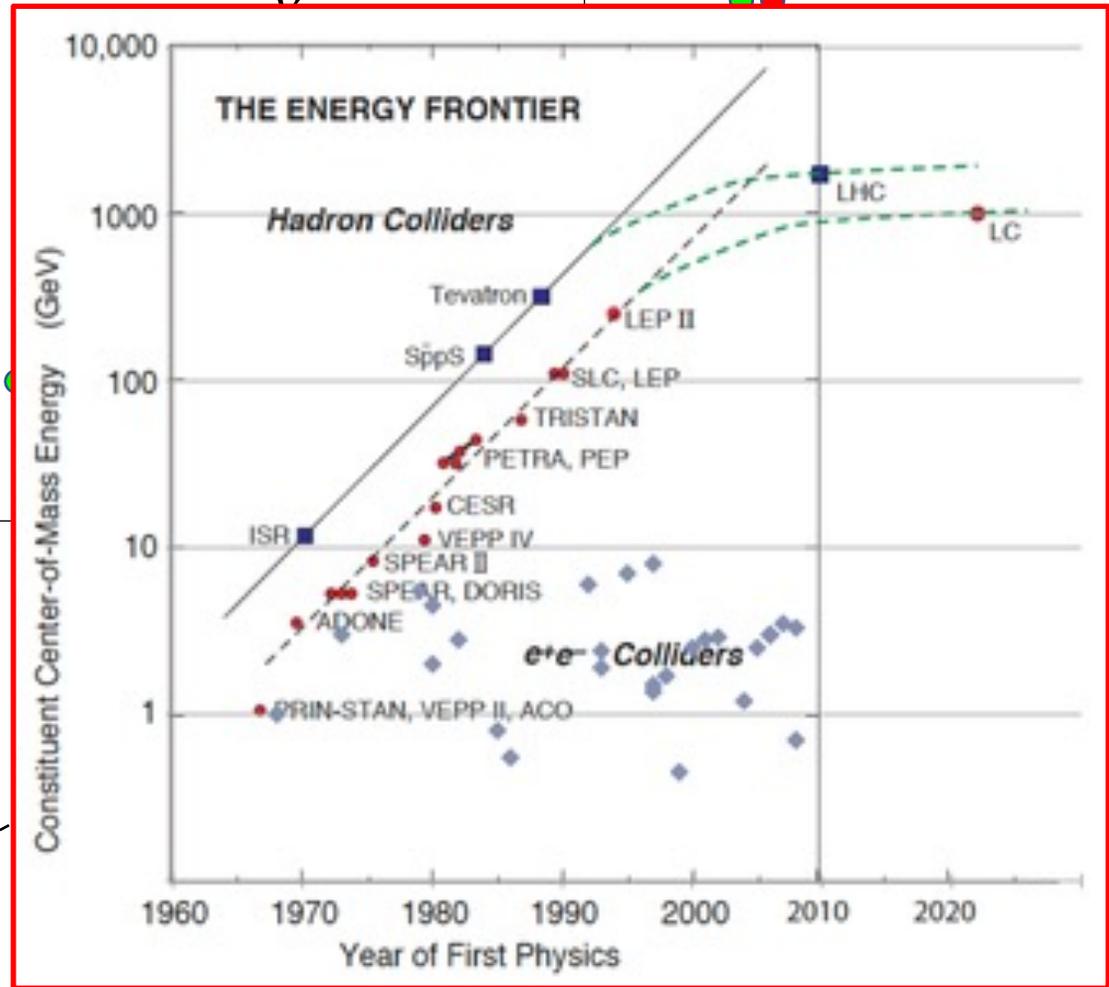
大統一理論：検証

どうやって検証するか？



$10^{13} \sim 10^{16} \text{ GeV}$ が目標？
(後述)

$$Q = T_3 + \frac{Y}{2}$$



W^-

T_3
 W^+

\bar{X}

しかし、 10^{15} GeV のGUTコライダーは難しい

大統一理論：検証

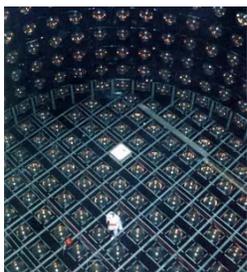
どうやって検証するか？

$$p \left\{ \begin{array}{l} u \text{ --- } e^+ \\ u \text{ --- } \bar{d} \\ d \text{ --- } d \end{array} \right\} \pi^0$$

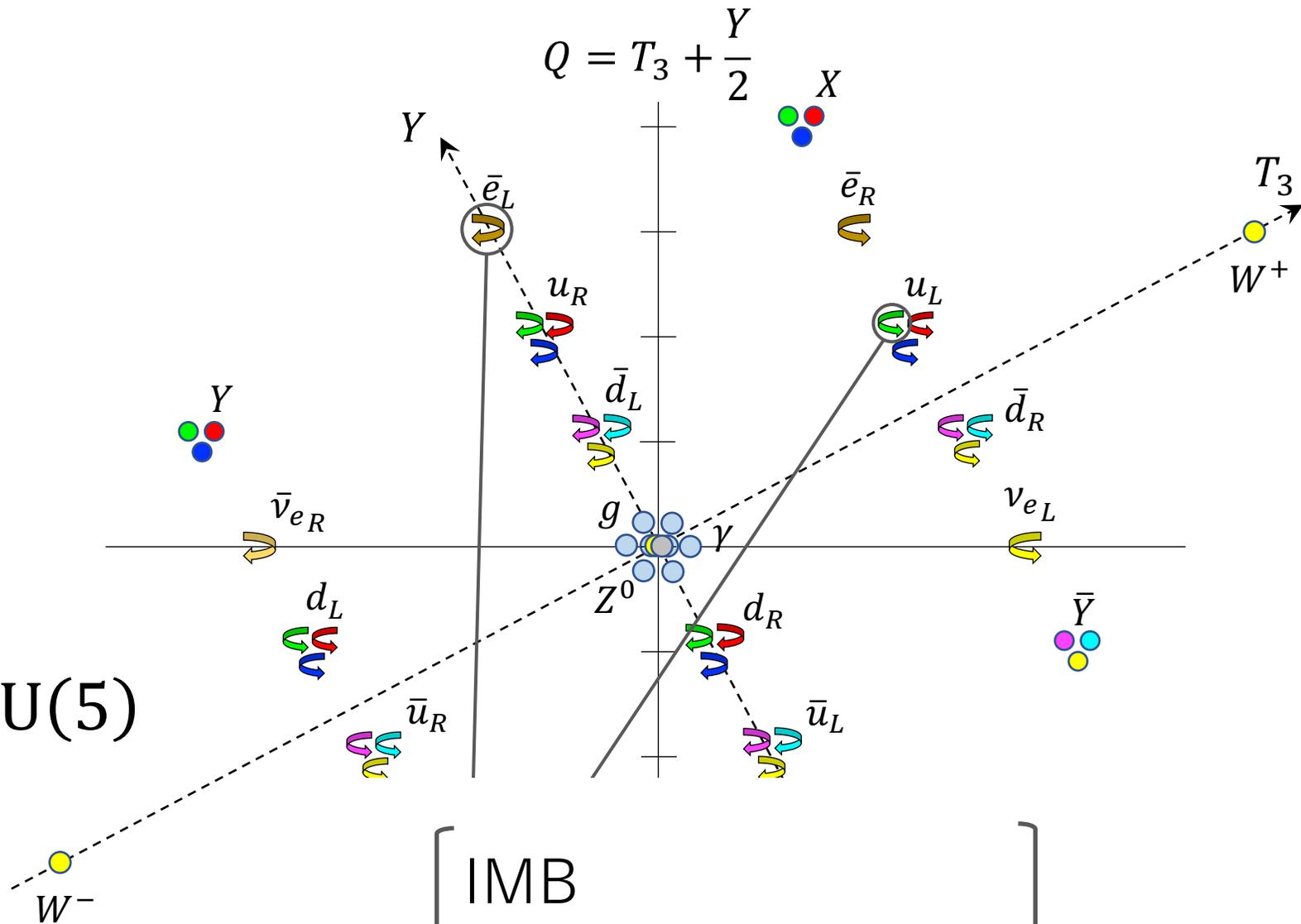
(Note: A dashed line labeled 'X' connects the two 'u' quarks in the diagram above.)

陽子崩壊を予言

$$\tau \sim \frac{M_X^4}{\alpha^2 M_p^5} \sim 10^{30} \text{年 in SU(5)}$$



地下実験：
陽子を集めて崩壊を待つ



⇒ [IMB
Kamiokande
Super-Kamiokande] で**棄却**

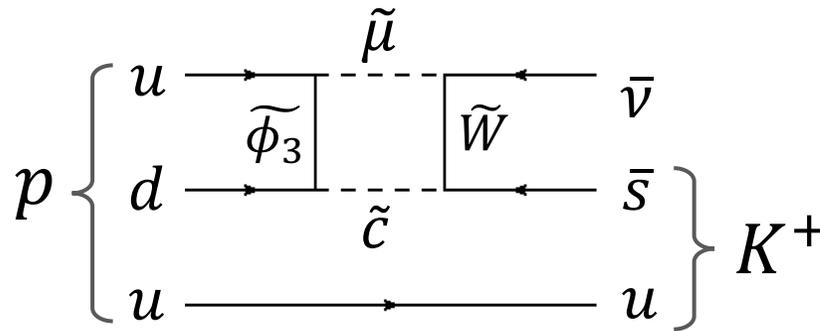
大統一理論：検証

標準模型を拡張した最も単純な

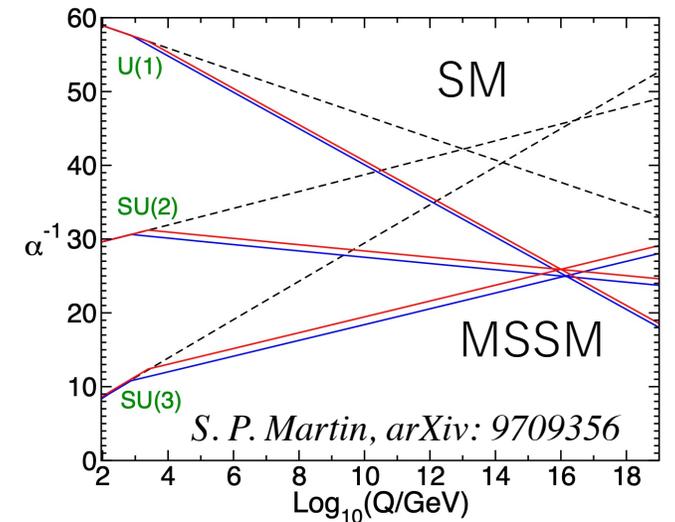
$SU(5) \rightarrow SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ \Rightarrow $SU(5)$ よりも大きな枠組み
 ではない
 例： $SO(10) \rightarrow SU(5)$
 $\rightarrow SU(3) \times SU(2) \times U(1)$



Supersymmetric GUT



- 大統一理論とは異なるレベルの対称性
 - 粒子間の対称性 ($SU(n)$)ではなく時空の対称性
- GUTs \rightarrow SUSY GUTs (自然な拡張とも言える)



大統一理論：検証

標準模型を拡張した最も単純な

$$SU(5) \rightarrow SU(3) \times SU(2) \times U(1) \implies$$

ではない



Supersymmetric GUT

- 大統一理論とは異なるレベルの対称性
 - 粒子間の対称性 ($SU(n)$)ではなく時空の対称性
- GUTs \rightarrow SUSY GUTs (自然な拡張とも言える)

$SU(5)$ よりも大きな枠組み

$$\text{例：} SO(10) \rightarrow SU(5)$$

$$\rightarrow SU(3) \times SU(2) \times U(1)$$

$$p \rightarrow e^+ + \pi^0$$

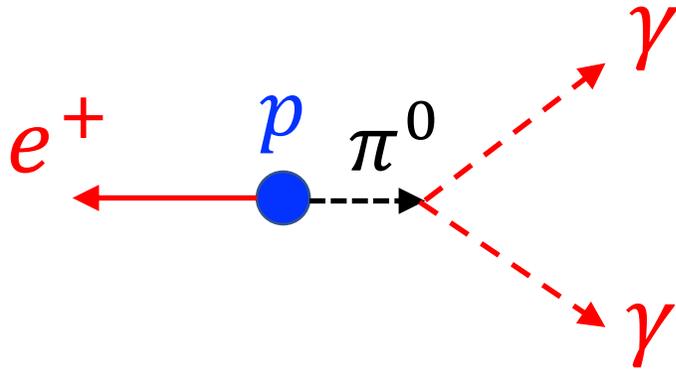
$$p \rightarrow \bar{\nu} + K^+$$

が探索のベンチマーク

続きは後半

陽子崩壊（核子崩壊）を探索する実験

$$p \rightarrow e^+ + \pi^0$$



3つの電磁シャワー（数百MeV）⇒ 全て観測可能

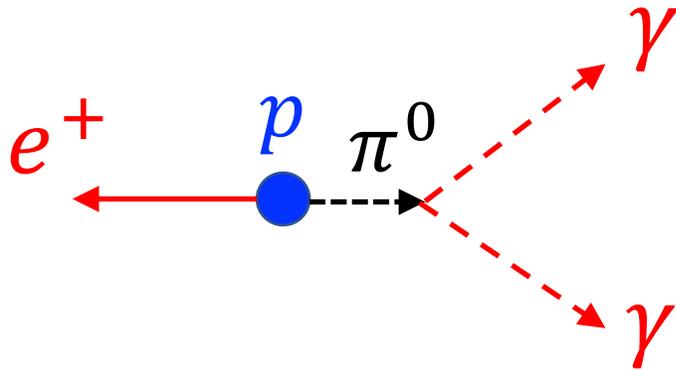
- 2つの電磁シャワーの不変質量 = M_π
- 3つの電磁シャワーの不変質量 = M_p
- Total momentum = 0 or Fermi motion

必要な情報：粒子の種類と運動量

探索の範囲を広げるには **Mass（陽子数）** + 検出器性能

$p \rightarrow e^+ + \pi^0$ の探索に必要な条件を考えると

水チェレンコフ検出器は**必然**と言える

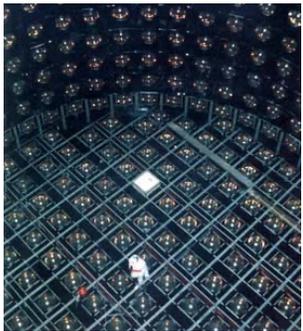


3つの電磁シャワー（数百MeV）⇒ 全て観測可能

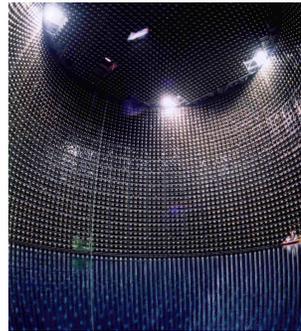
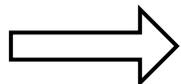
- 2つの電磁シャワーの不変質量 = M_π
- 3つの電磁シャワーの不変質量 = M_p
- Total momentum = 0 or Fermi motion

必要な情報：粒子の種類と運動量

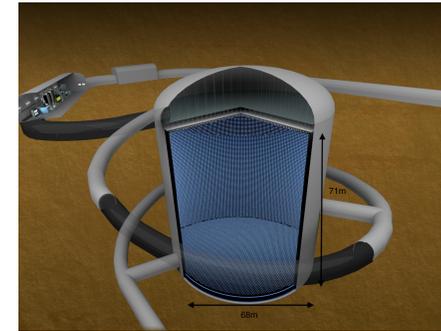
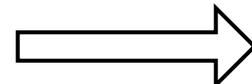
探索の範囲を広げるには **Mass（陽子数）** + 検出器性能



Kamiokande
(1983-1996)



Super-Kamiokande
(1996 - ongoing)



Hyper-Kamiokande
(start operation in 2027)

有効体積

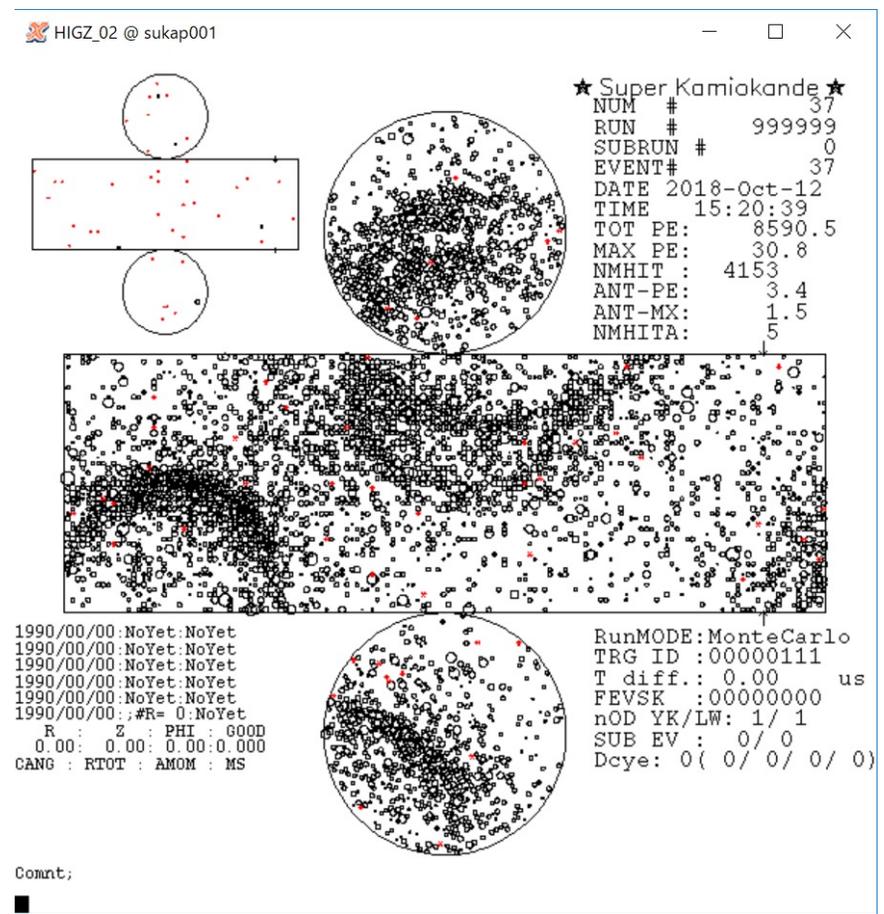
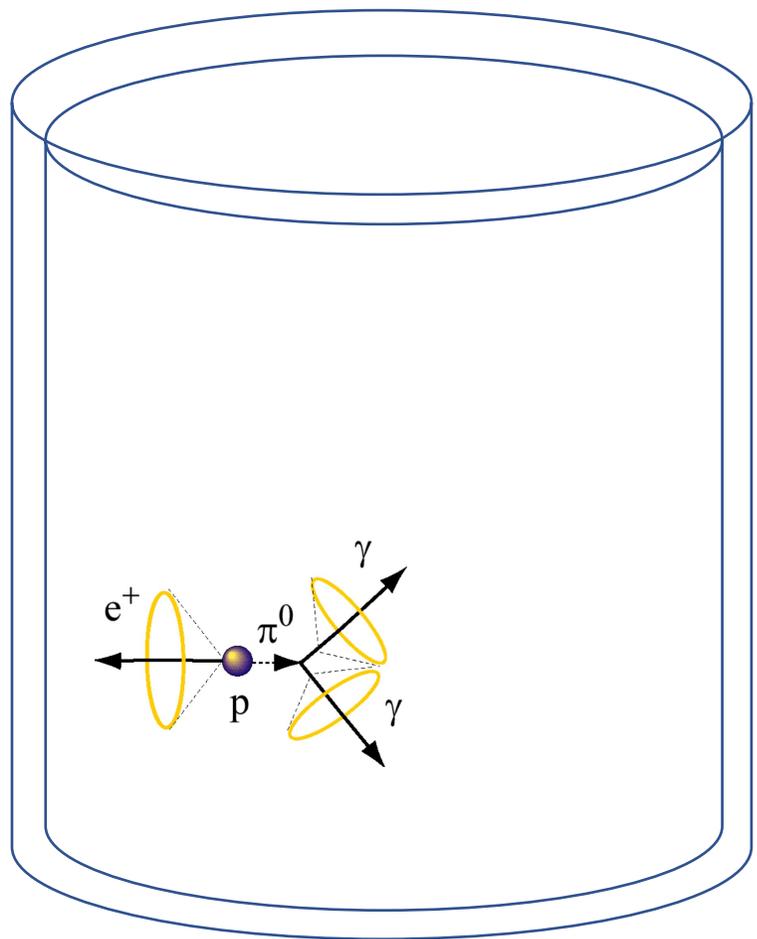
22.5 → 27.2* kton
($\sim 10^{34}$ protons)

* 有効体積の拡張
A. Takenaka et al.
Phys. Rev. D 102, 112011 (2020)

有効体積

188 kton
($\sim 10^{35}$ protons)

信号 (スーパーカミオカンデの場合)

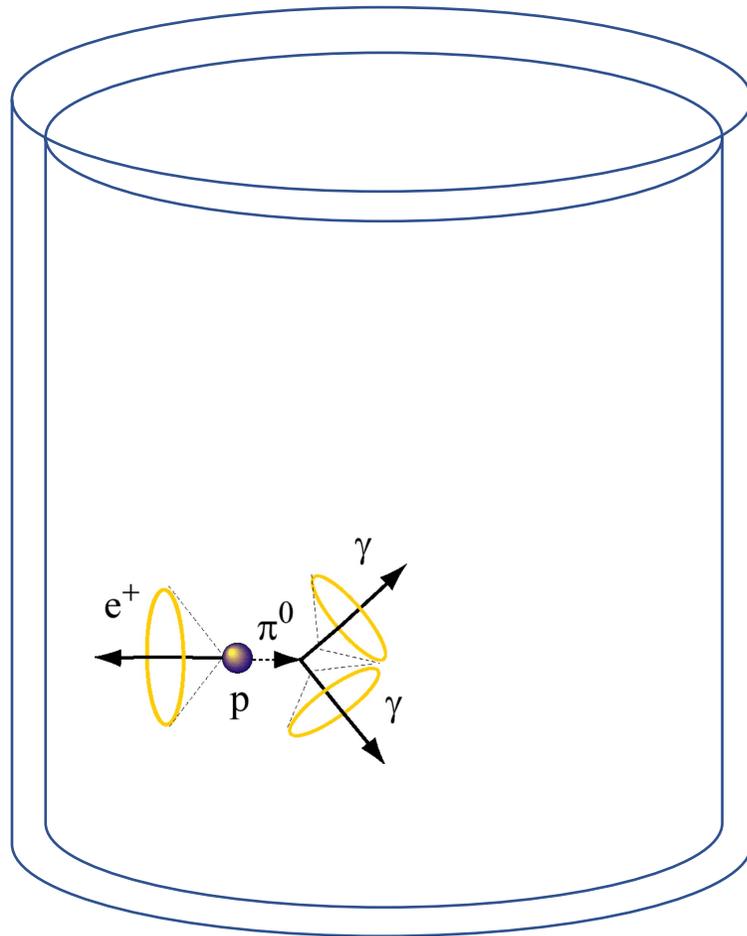
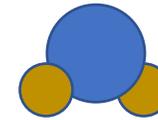


$p \rightarrow e^+ + \pi^0$ のイベントディスプレイ
(モンテカルロシミュレーション)

信号（スーパーカミオカンデの場合）

注意点

水分子

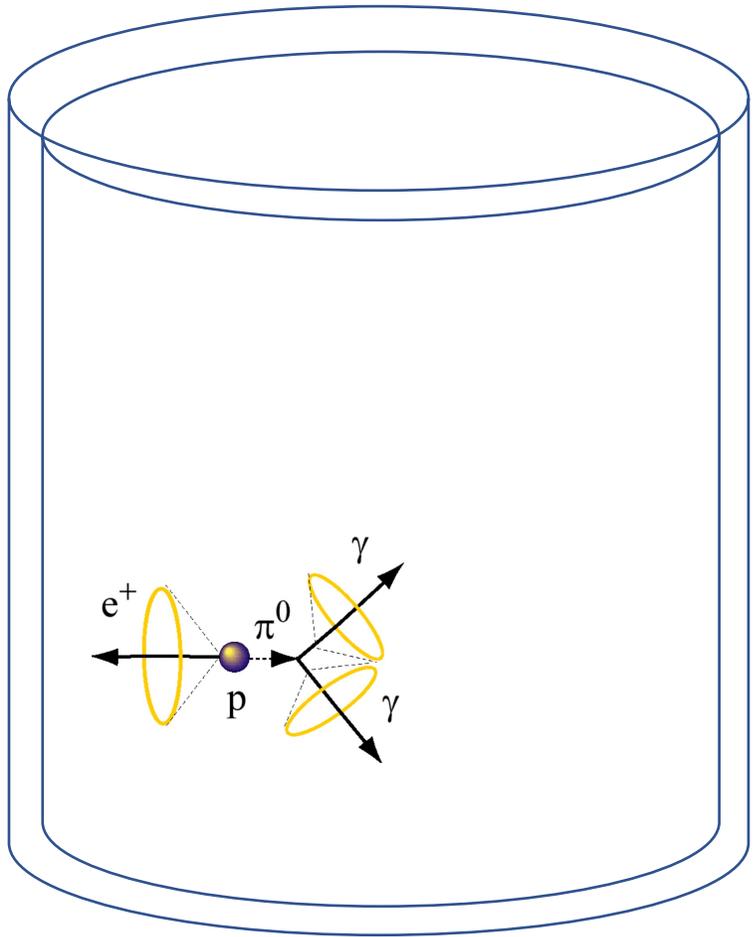


酸素原子核中の陽子の場合は

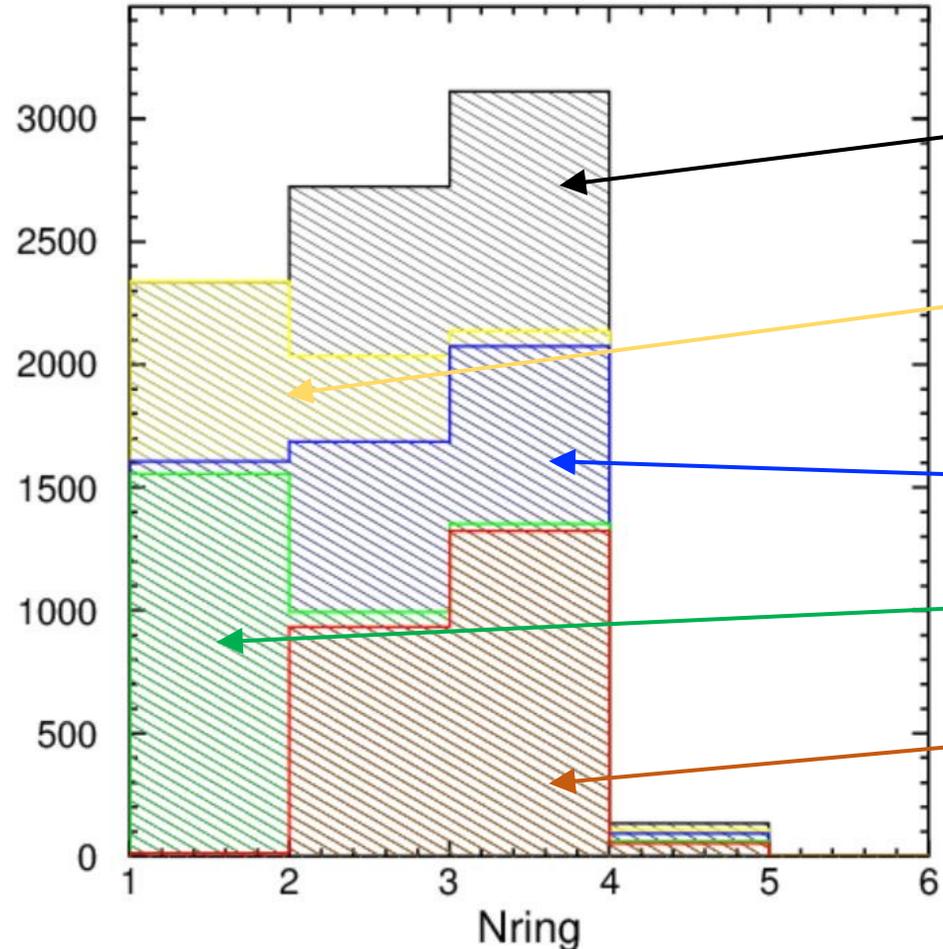
- フェルミ運動 ($\sim 200\text{MeV}/c$)
- 原子核中の束縛エネルギー (15-40MeV)
- 核内効果 (メソンが核内で散乱・吸収) などの影響により理想的な信号からずれる (不定性も比較的大きい)

水素原子核 (= Free proton) は
検出効率が高い & 不定性が小さい

信号 (スーパーカミオカンデの場合)



Vietnam School on Neutrinos (2019)
での三浦さん (ICRR) のスライドから



核内での反応の内訳

水素 (Free proton)

Charge exchange
($\pi^0 \rightarrow \pi^\pm$)

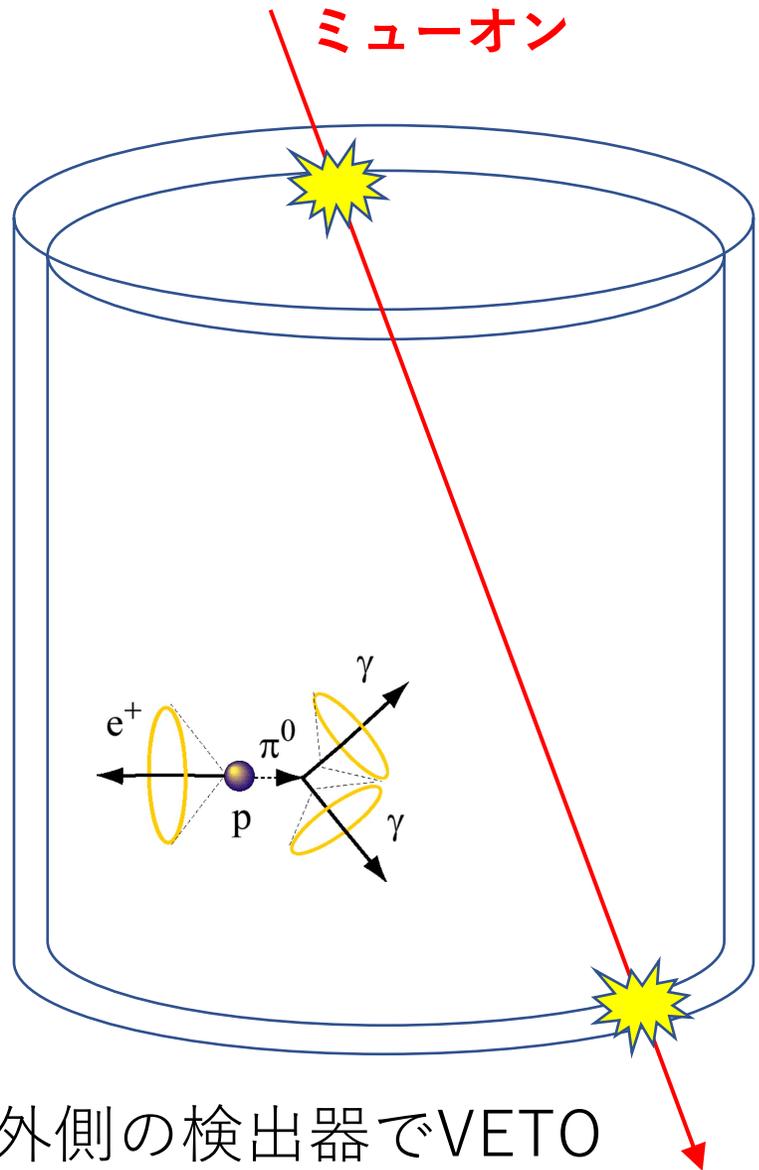
Scattering

Absorption

No interaction

⇒ 2 or 3 リング事象が信号の候補として選別される

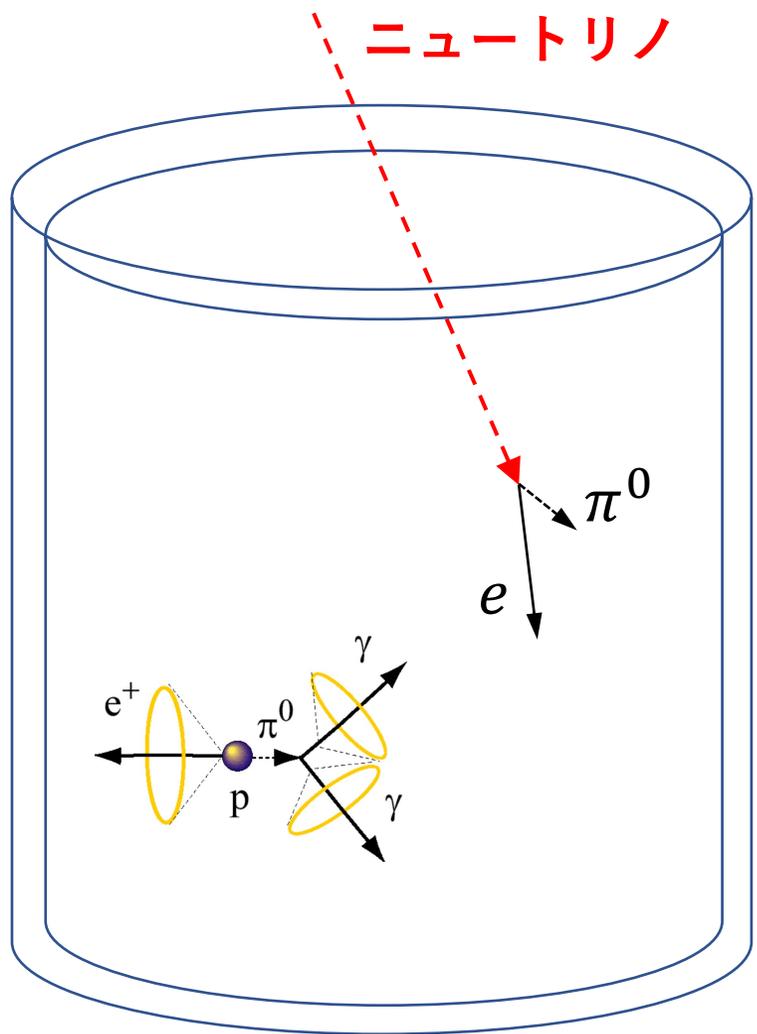
バックグラウンド (スーパーカミオカンデの場合)



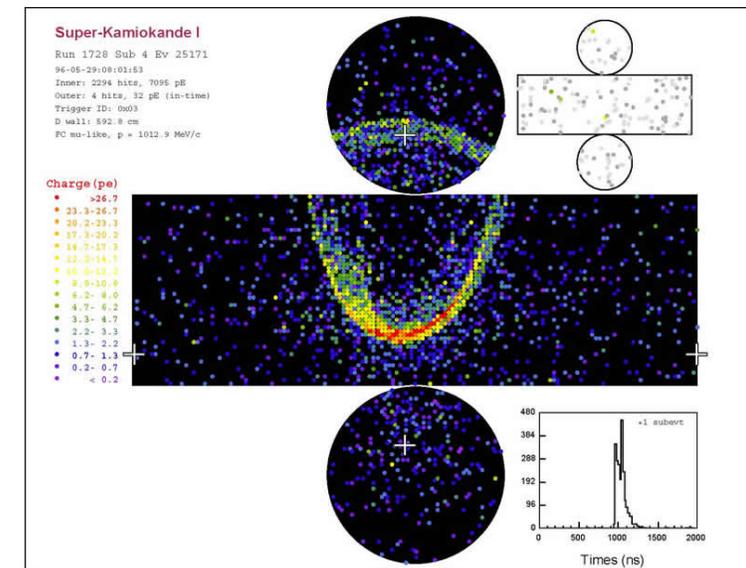
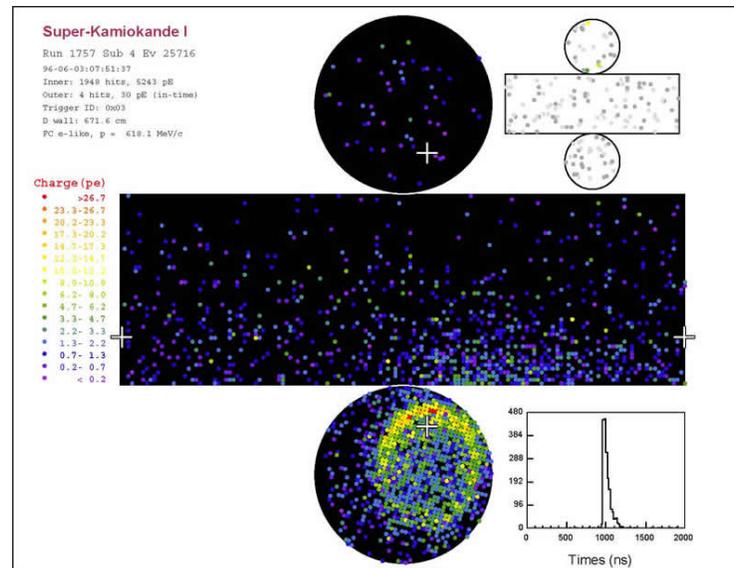
外側の検出器でVETO



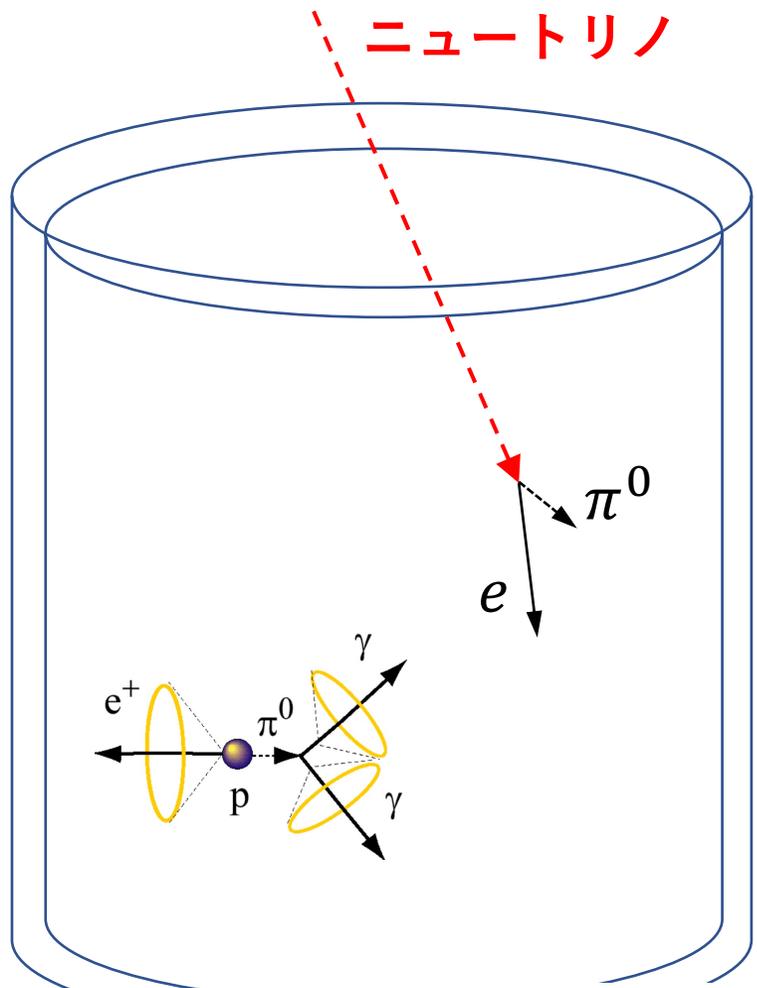
バックグラウンド (スーパーカミオカンデの場合)



- 粒子 (リング) の種類・数
- 不変質量
などで識別



バックグラウンド (スーパーカミオカンデの場合)

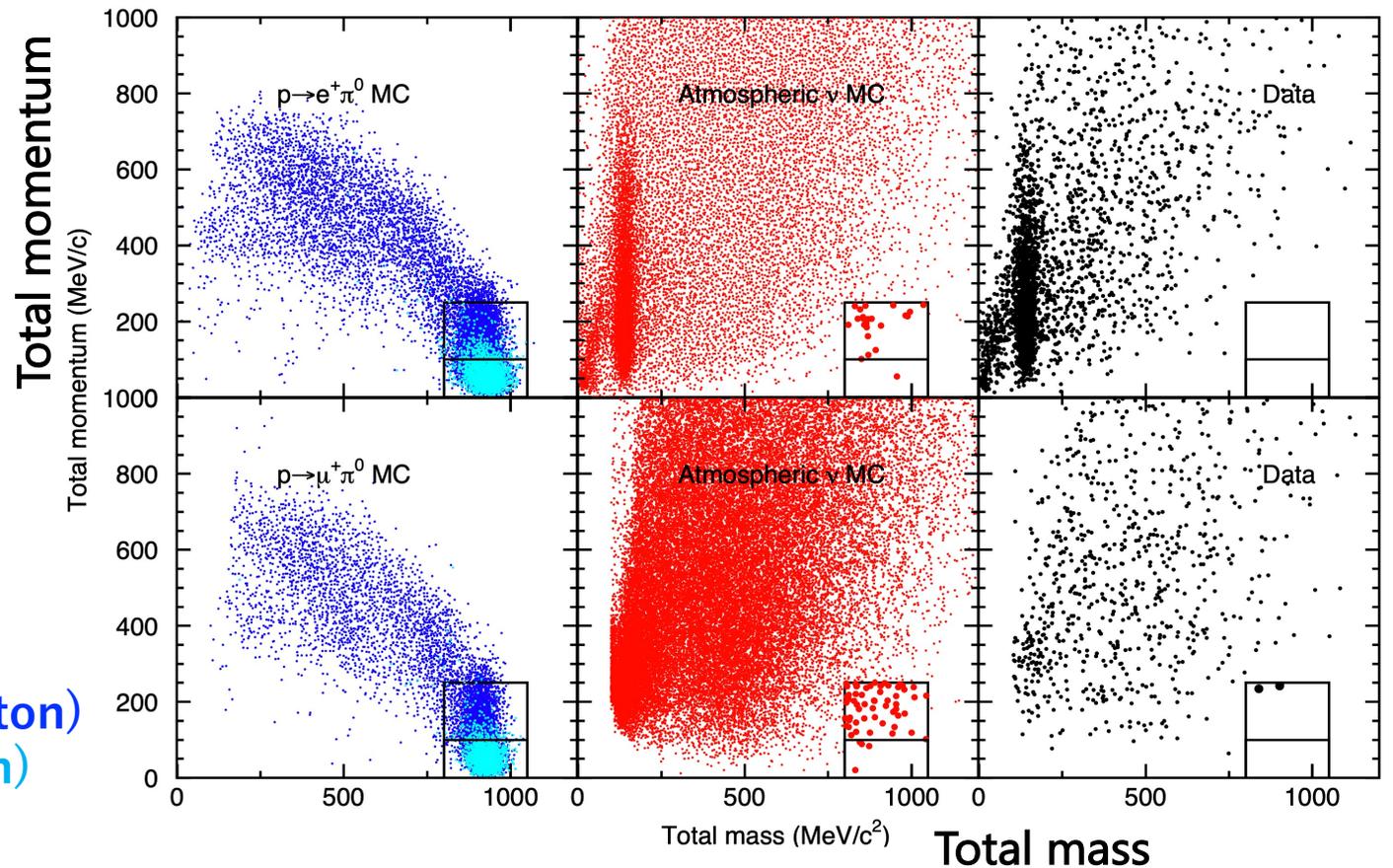


酸素 (bound proton)
水素 (free proton)

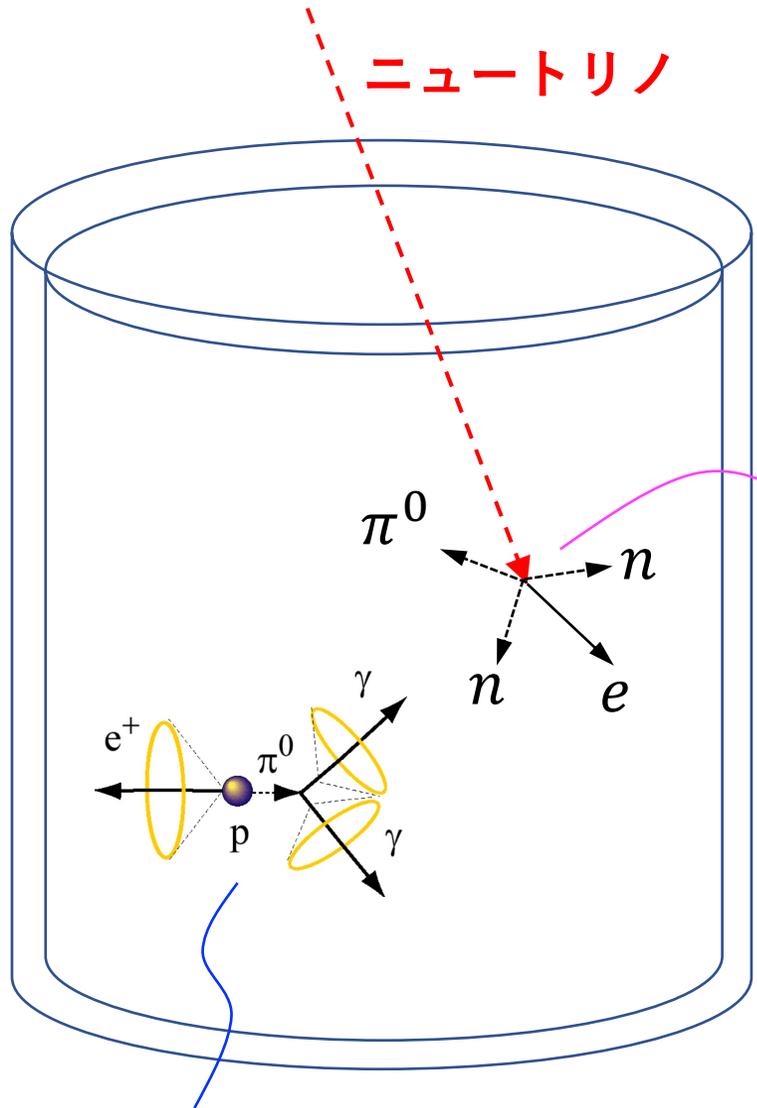
- 粒子 (リング) の種類・数
- 不変質量
などで識別

検出効率 ~38%

BG < 1 /Mt·yr (low p_{tot})
~ 1 /Mt·yr (high p_{tot})



バックグラウンド (スーパーカミオカンデの場合)

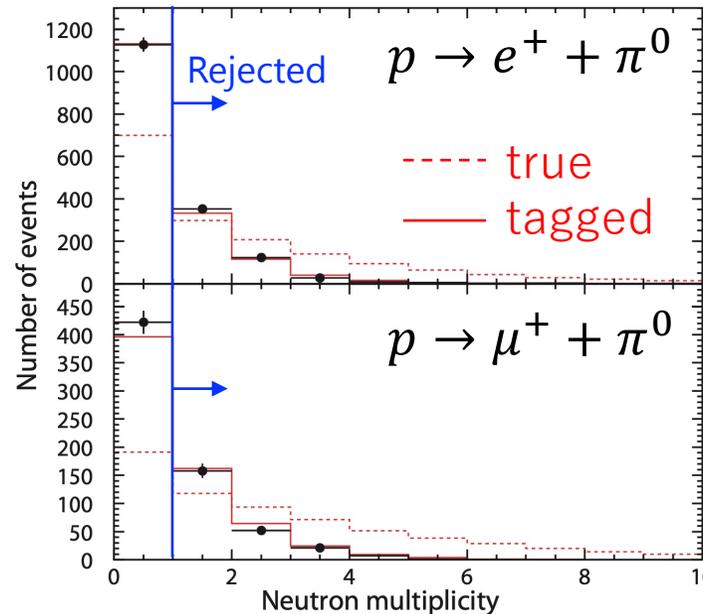


ニュートリノ

- 観測できない粒子が発生
- ハドロンの散乱・吸収などの要因でバックグラウンドになる

中性子の情報が強力

大気ニュートリノ事象の中性子数 (+サイドバンドデータ)

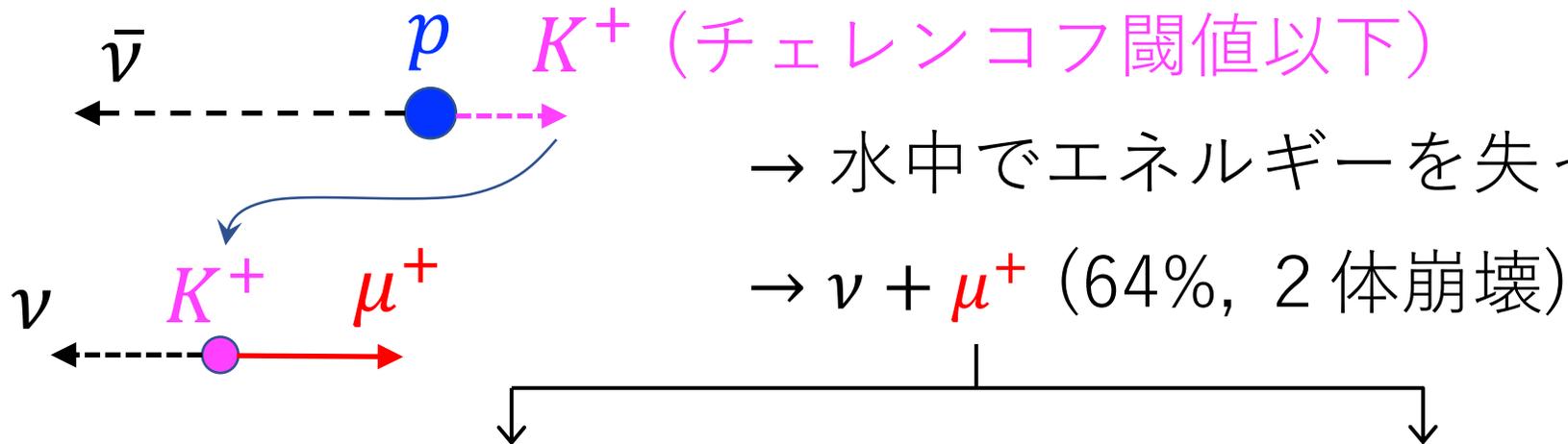


約半数のバックグラウンドが落とせる

信号では中性子はあまり発生しない

SUSY GUTs: $p \rightarrow \bar{\nu} + K^+$

K. Abe et al., Phys. Rev. D 90, 072005 (2014)

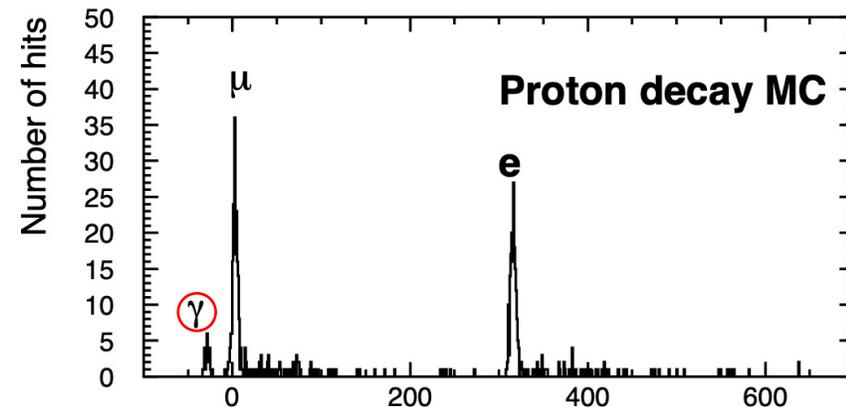
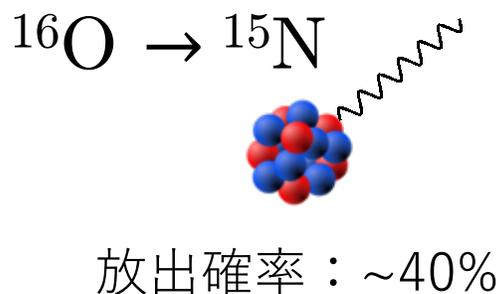
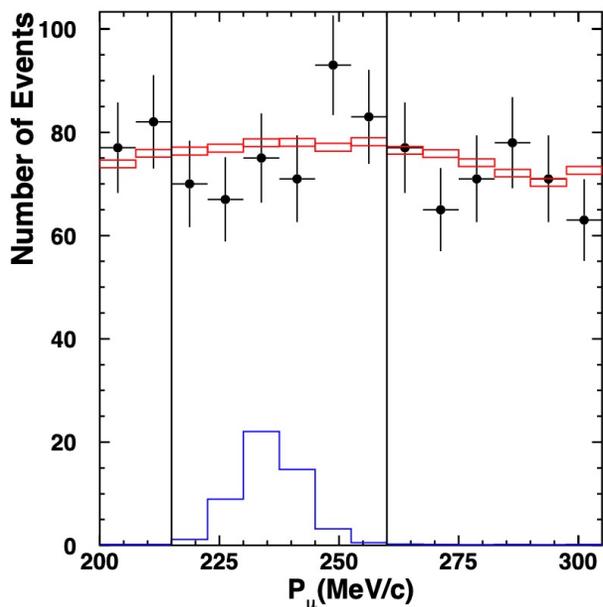


→ 水中でエネルギーを失って崩壊 ($\tau = 12 \text{ ns}$)

→ $\nu + \mu^+$ (64%, 2体崩壊)

エネルギースペクトルでピークを探す

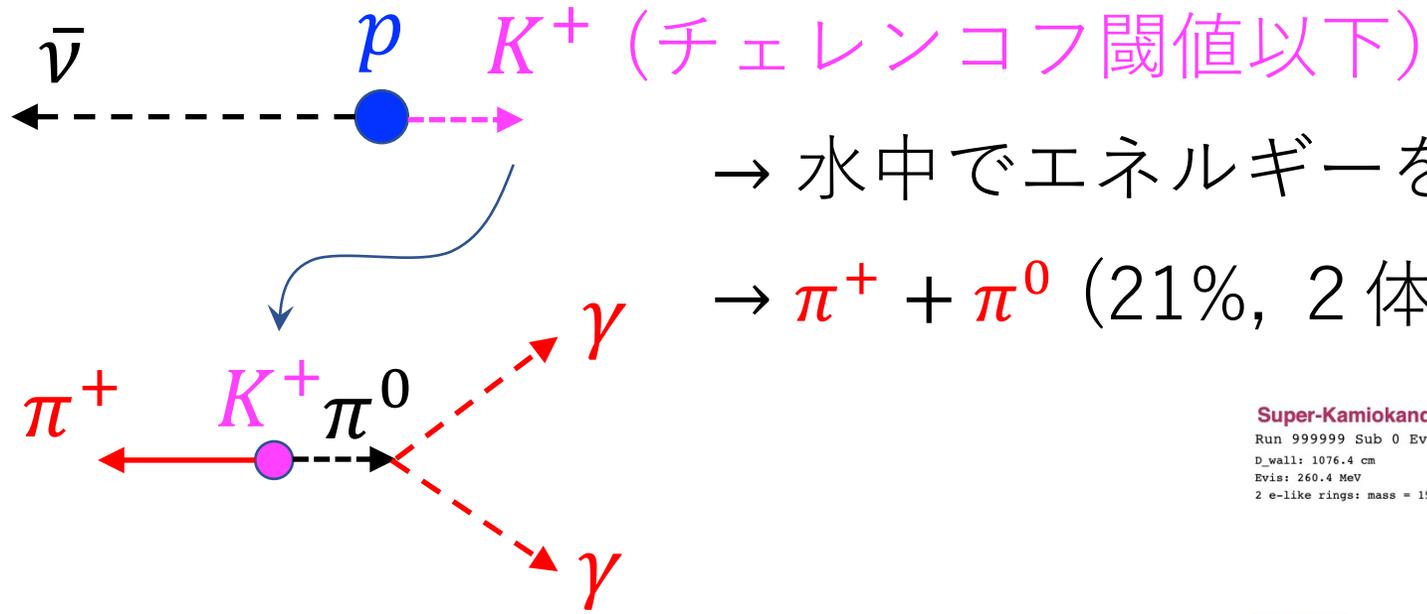
陽子崩壊後の脱励起で発生する6.3 MeVのガンマ線をタグ (5×10^{-4} BG reduction)



検出効率 ~9% (Br:64% x γ :40% x ϵ) / BG ~1.5 / Mt·yr

SUSY GUTs: $p \rightarrow \bar{\nu} + K^+$

K. Abe et al., Phys. Rev. D 90, 072005 (2014)



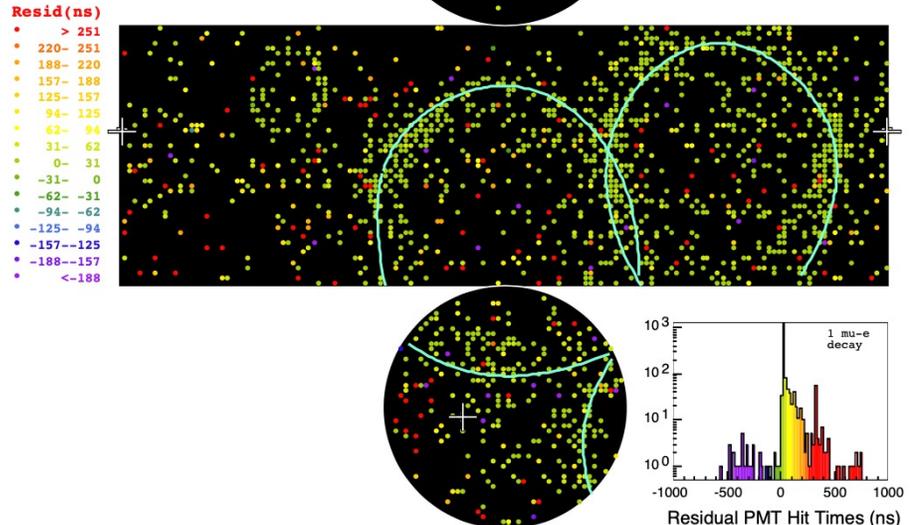
→ 水中でエネルギーを失って崩壊 ($\tau = 12 \text{ ns}$)

→ $\pi^+ + \pi^0$ (21%, 2体崩壊)

- π^0 の不変質量と運動量(206MeV/c)
 - π^0 と反対側のエネルギー応答
- などで選別

検出効率 $\sim 10\%$ (Br:21% x ϵ) / BG $\sim 2/\text{Mt}\cdot\text{yr}$

Super-Kamiokande IV
Run 999999 Sub 0 Event 236□
D_wall: 1076.4 cm
Evis: 260.4 MeV
2 e-like rings: mass = 155.2 MeV/c²



陽子崩壊探索の展望

大統一理論：検証

90% CL

$$p \rightarrow e^+ + \pi^0$$

$$\tau/B (p \rightarrow e^+ + \pi^0) > 2.4 \times 10^{34} \text{ years}$$

Ref: PRD102, 1120011 (2020)

$$p \rightarrow \bar{\nu} + K^+$$

$$\tau/B (p \rightarrow \bar{\nu} + K^+) > 8.2 \times 10^{33} \text{ years}$$

Ref: PRL113, 121802 (2014) → updated

が探索のベンチマーク



$$\tau/B(p \rightarrow \bar{\nu} + K^+) < 2.9 \times 10^{30} \text{ years in Minimal SUSY SU(5)}$$

H. Murayama and A. Pierce, Phys. Rev. D65, 55009 (2002)

→ Minimal SU(5) より大きな枠組み

スーパーカミオカンデによる幅広い探索

$> 10^{34}$ yr $> 10^{33}$ yr $> 10^{32}$ yr

Minimal non-SUSY SO(10)

D.G. Lee, M.K. Parida, and M. Rani, Phys. Rev. D51, 229 (1995).

$$\tau_B \sim 10^{30-40} \text{ yr}$$

Flipped SU(5)

I. Antoniadis, J. Ellis, J. S. Hagelin and D. V. Nanopoulos, Phys. Lett. B 231, 65 (1989).

$$\tau_B \sim 10^{34 \pm 2} \text{ yr}$$

SUSY SO(10)

V. Lucas and S. Ruby, Phys. Rev. D55, 6986 (1997).

$$\tau_B \sim 10^{32-34} \text{ yr}$$

スフェルミオン間にフレーバー混合があると
様々な崩壊モードが可能になる

N. Nagata and S. Shirai, JHEP 1403, 049 (2014).

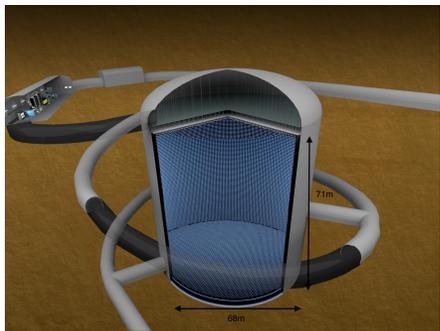
Ref. talk by 永田さん

新学術領域「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」研究会 (2018)

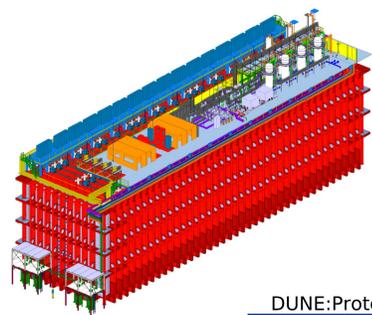
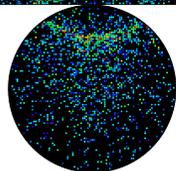
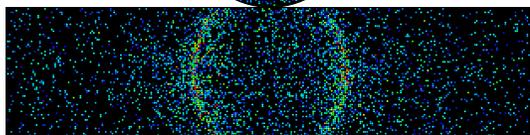
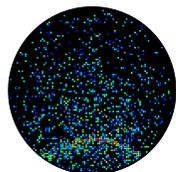
→ 実験では幅広い探索が重要

Mode	Limit(yr) 90%CL	Reference
$p \rightarrow e^+ + \pi^0$	2.4×10^{34}	PRD102, 1120011 (2020)
$p \rightarrow \mu^+ + \pi^0$	1.6×10^{34}	PRD102, 1120011 (2020)
$p \rightarrow \bar{\nu} + K^+$	8.2×10^{33}	PRD90, 072005 (2014)→update
$p \rightarrow e^+ + e^+ + e^-$	3.4×10^{34}	PRD101, 052011 (2020)
$p \rightarrow \mu^+ + e^+ + e^-$	2.3×10^{34}	PRD101, 052011 (2020)
$p \rightarrow \mu^- + e^+ + e^+$	1.9×10^{34}	PRD101, 052011 (2020)
$p \rightarrow e^+ + \mu^+ + \mu^-$	9.2×10^{33}	PRD101, 052011 (2020)
$p \rightarrow e^- + \mu^+ + \mu^+$	1.1×10^{34}	PRD101, 052011 (2020)
$p \rightarrow \mu^+ + \mu^+ + \mu^-$	1.0×10^{34}	PRD101, 052011 (2020)
$p \rightarrow e^+ + \eta$	1.0×10^{34}	PRD96, 012003 (2017)
$p \rightarrow \mu^+ + \eta$	4.7×10^{33}	PRD96, 012003 (2017)
$p \rightarrow e^+ + \rho^0$	7.2×10^{32}	PRD96, 012003 (2017)
$p \rightarrow \mu^+ + \rho^0$	5.7×10^{32}	PRD96, 012003 (2017)
$p \rightarrow e^+ + \omega$	1.6×10^{33}	PRD96, 012003 (2017)
$p \rightarrow \mu^+ + \omega$	2.8×10^{33}	PRD96, 012003 (2017)
$p \rightarrow e^+ + X$	7.9×10^{32}	PRL115, 121803 (2015)
$p \rightarrow \mu^+ + X$	4.1×10^{32}	PRL115, 121803 (2015)
$p \rightarrow e^+ + \nu + \nu$	1.7×10^{32}	PRL113, 101801 (2014)
$p \rightarrow \mu^+ + \nu + \nu$	2.2×10^{32}	PRL113, 101801 (2014)
$p \rightarrow \bar{\nu} + \pi^+$	3.9×10^{32}	PRL113, 121802 (2014)
$p \rightarrow \mu^+ + K^0$	1.6×10^{33}	PRD86, 012006 (2012)

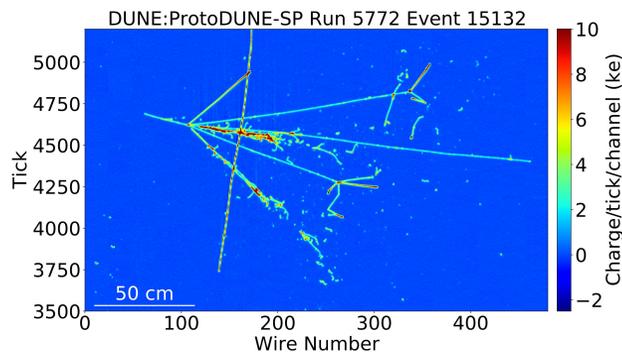
次世代実験



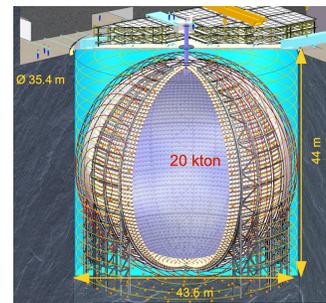
Hyper-K



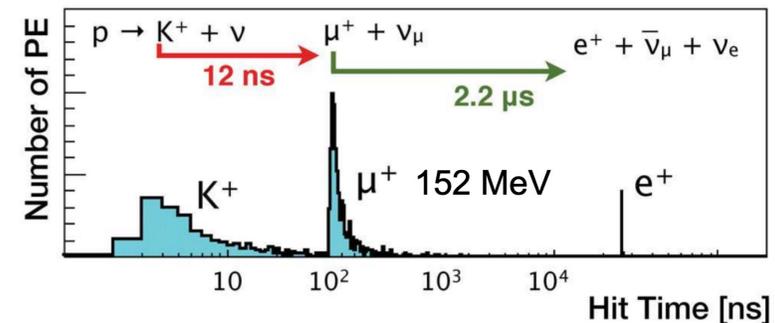
DUNE



ProtoDUNE-SP, JINST 15 (2020) P12004



JUNO



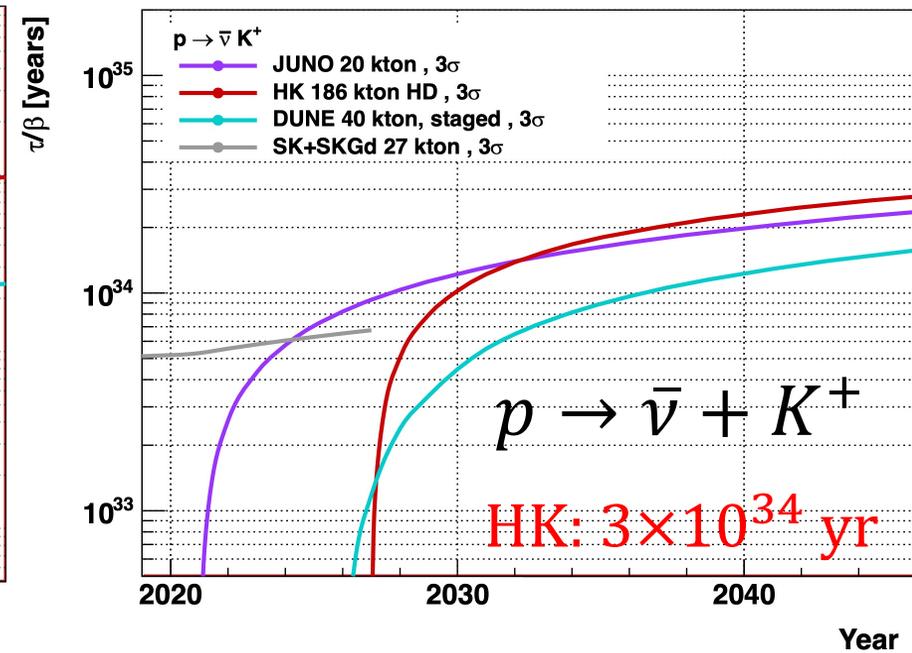
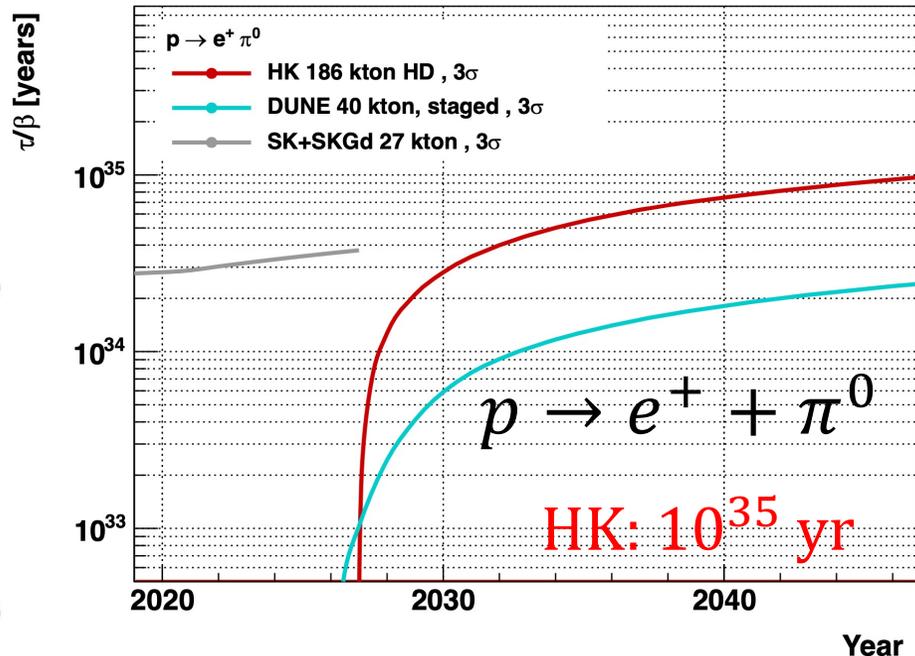
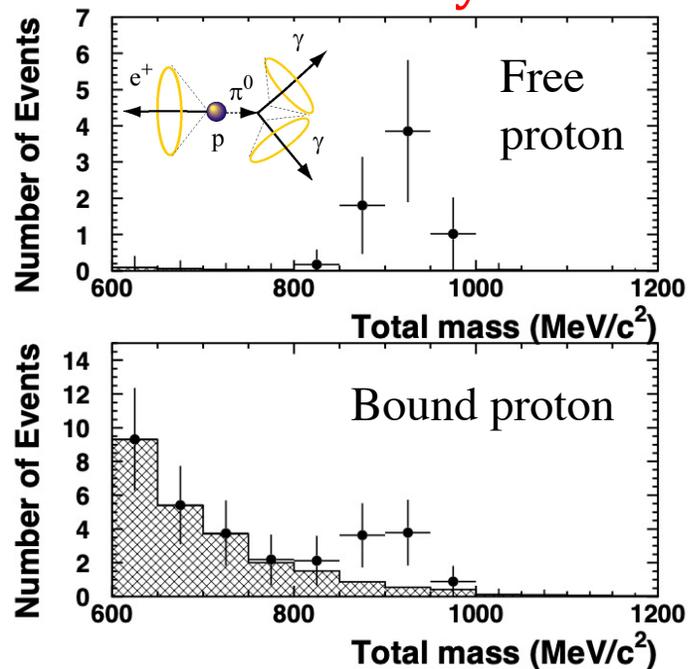
	ハイパーカミオカンデ	DUNE	JUNO
検出原理	水チェレンコフ	液体アルゴンTPC	液体シンチレータ
体積	260kton 有効体積: 188kton	68kton (17kton x 4機) 有効体積: 40kton	20kton
特徴	Super-Kを拡大 + 改良	粒子の飛跡を測定	エネルギー分解能が良い (3%)
開始時期	2027年	2026年 (2機で開始)	2022年

次世代実験

	ハイパーカミオカンデ	DUNE	JUNO
検出原理	水チェレンコフ	液体アルゴンTPC	液体シンチレータ
体積	260kton 有効体積: 188kton	68kton (17kton x 4機) 有効体積: 40kton	20kton
特徴	Super-Kを拡大+改良	粒子の飛跡を測定	エネルギー分解能が良い (3%)

After 10 years of HK
if $\tau = 1.7 \times 10^{34}$ years ...

JUNO: *J. Phys. G* 43 (2016) 030401 (arXiv:1507.05613)
DUNE: FERMILAB-PUB-20-025-ND (arXiv:2002.03005)



どこまで探せば良いか

• 見つかったとしてもおかしくない

- SKで有力なモデルを棄却 or 検証
→HKで探索範囲を広げる
- SKで候補が出ればHKで崩壊モードの測定

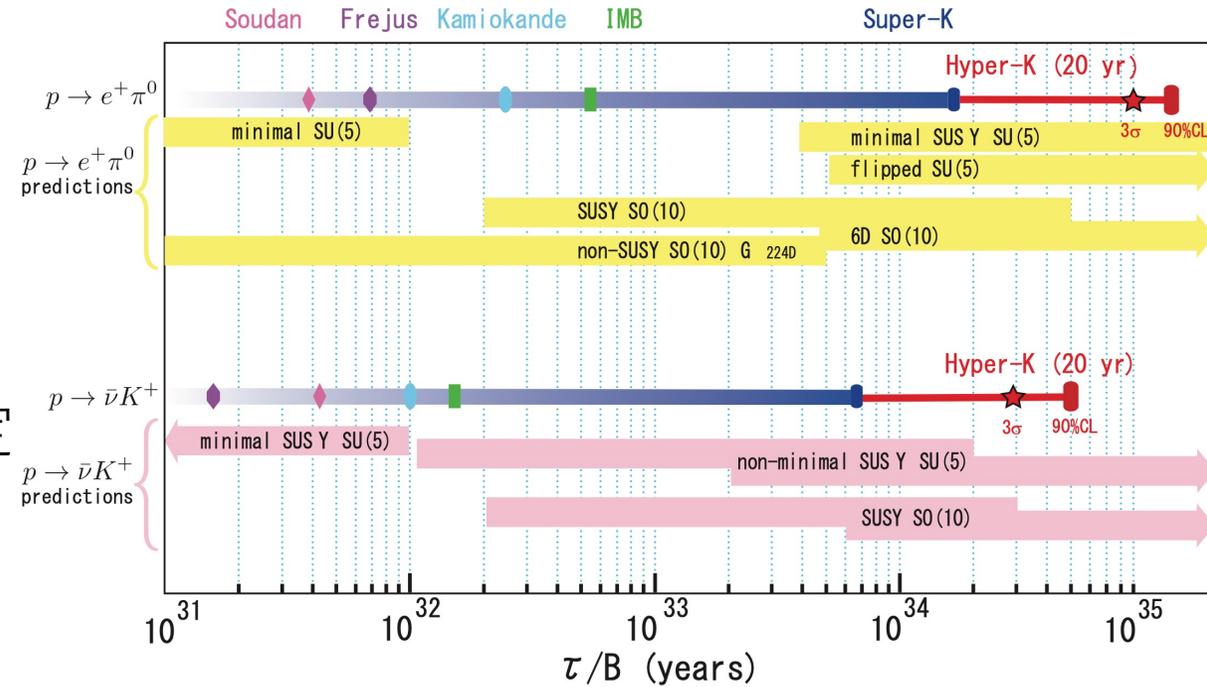
将来計画では

- $p \rightarrow e^+ + \pi^0$ の探索範囲を広げる
- $p \rightarrow \bar{\nu} + K^+$ の探索範囲を広げる
- 幅広いモードを探索する

→ 巨大で高性能な検出器が条件

海の中とか月とかアイデアはあるが

- $p \rightarrow e^+ + \pi^0$ に特化すると $p \rightarrow \bar{\nu} + K^+$ の探索が難しい
- $p \rightarrow \bar{\nu} + K^+$ に特化すると (飛跡検出器とか) $p \rightarrow e^+ + \pi^0$ が物足りない



と考えると、
やはりまずは

