

新種のニュートリノを探れ！

～JSNS²実験のデータ取得をJ-PARCで開始～

研究代表者： 丸山和純 (KEK)

Takasumi.maruyama@kek.jp



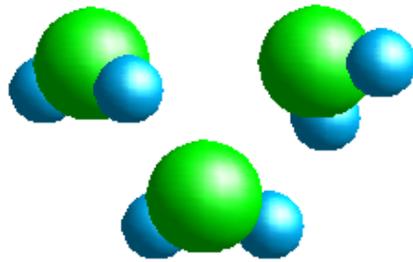
素粒子の研究＝物を細かくしていくとどうなるの？

人類はギリシャ時代から、この課題に挑み続けている。

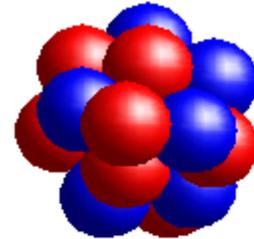
→ 大昔は「水、火、土、木」が、究極の構成物質。

→ 現在では最も小さな構成粒子は**クォーク(原子核の仲間)**と**レプトン(電子の仲間)**であると考えられている。

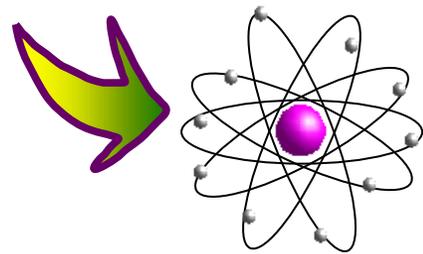
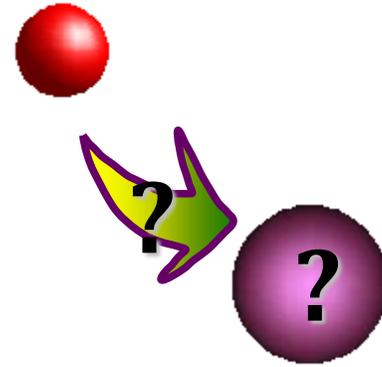
水の分子 10^{-7} cm



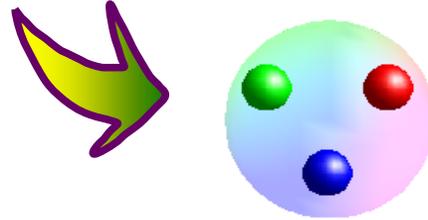
原子核 10^{-12} cm



クォーク $<10^{-16}$ cm



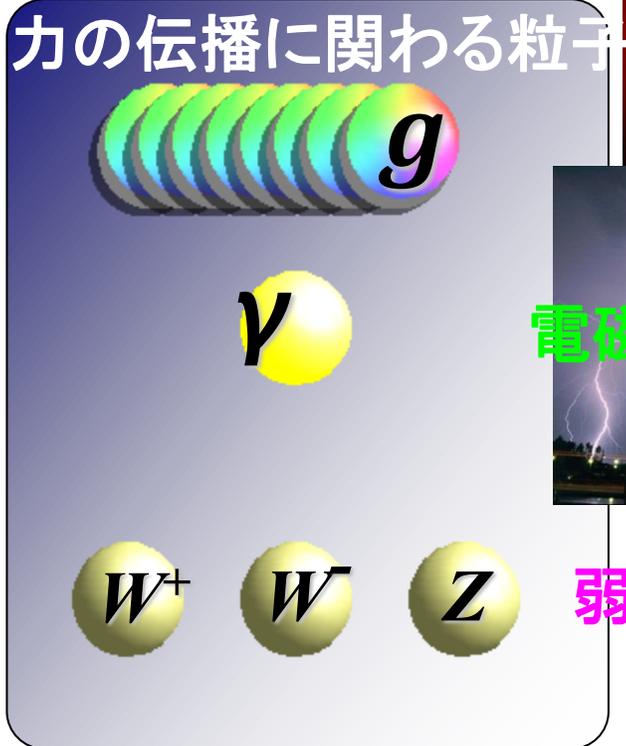
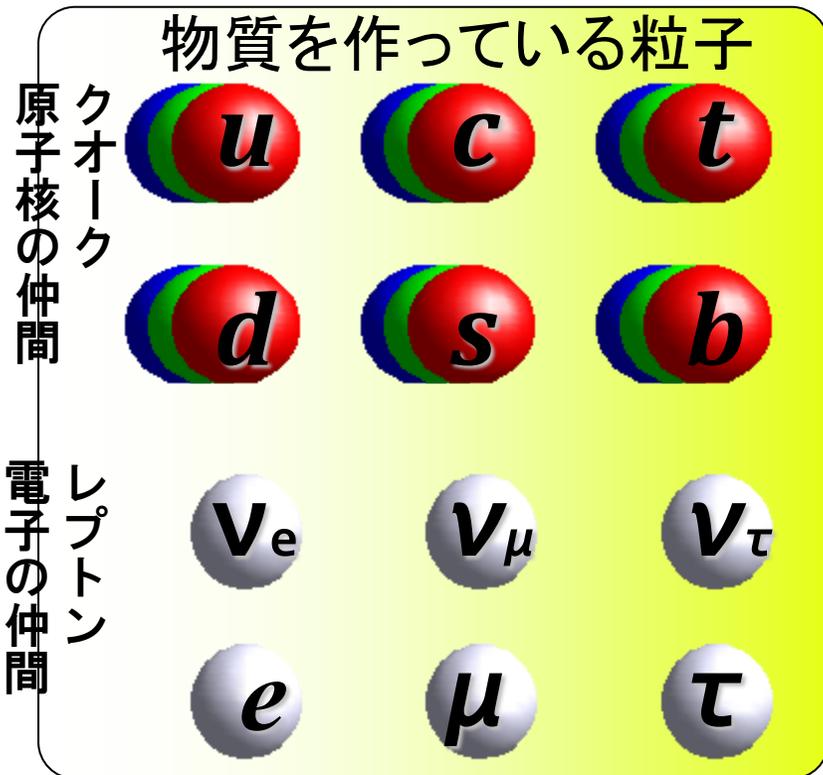
酸素原子 10^{-8} cm



陽子 10^{-13} cm

素粒子と力（標準理論）

重力相互作用



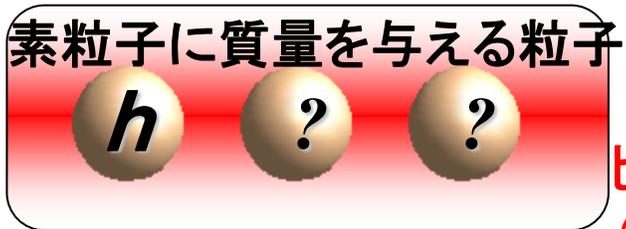
強い相互作用



電磁相互作用



弱い相互作用



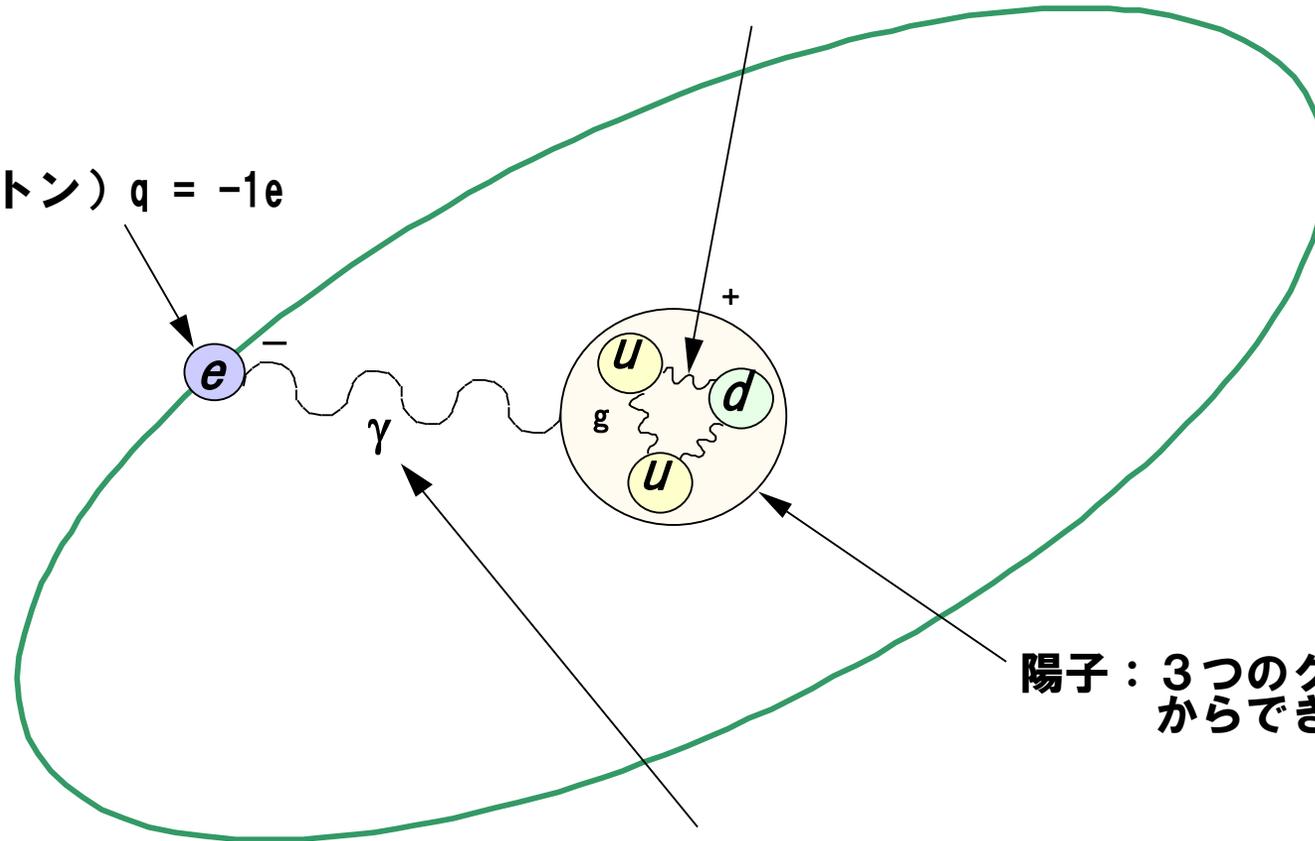
ヒッグス粒子
(2012年に発見)

- 物質を究極まで小さくしていったら、これらの素粒子にたどり着きます。
- 2021年までに理解している素粒子像です。
- 全宇宙の構成の5%程度を説明できます。

水素原子

グルーオン g を交換することによってクォーク間に引力が生じている (強い相互作用)

電子 (レプトン) $q = -1e$

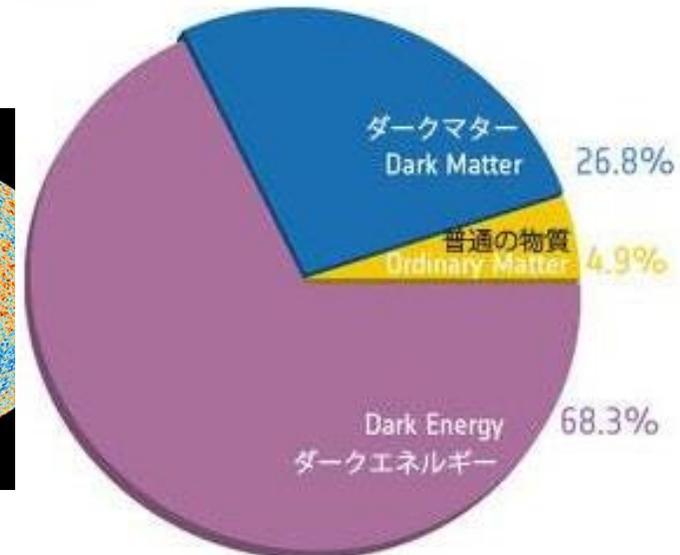
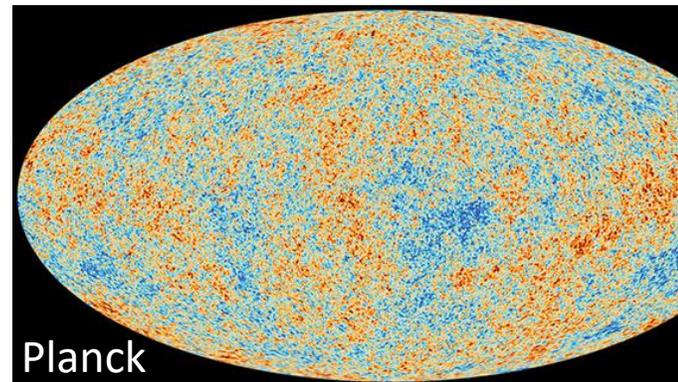
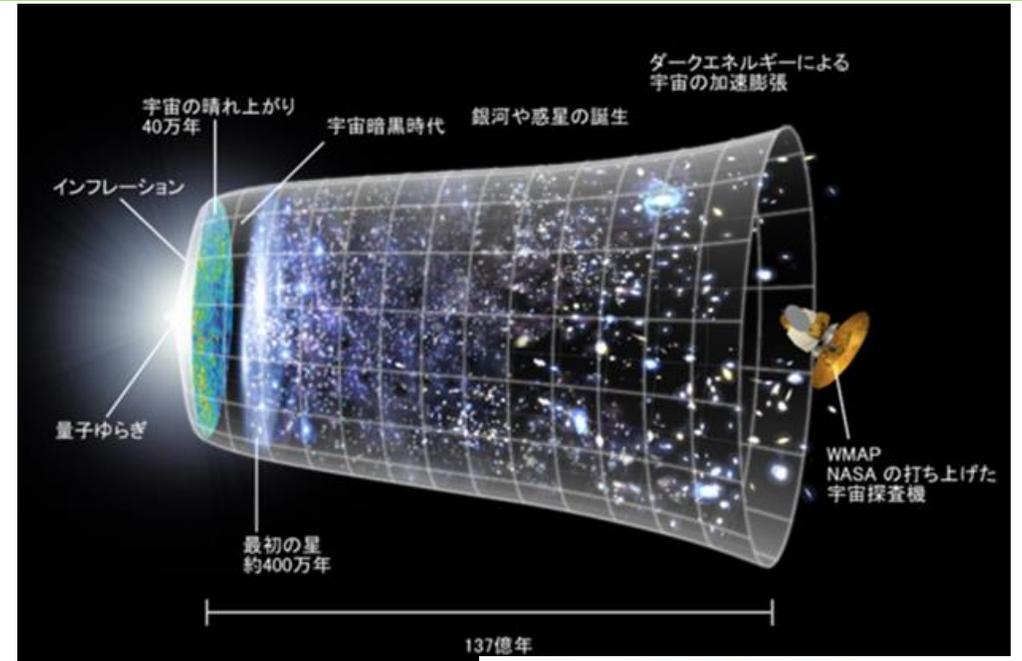


陽子: 3つのクォークからできている

光子を交換することによって引力が生じている (電磁相互作用)

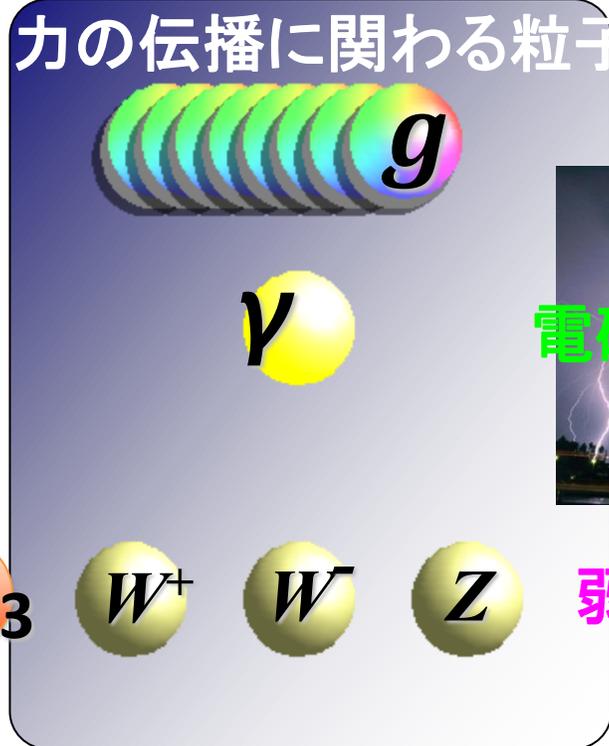
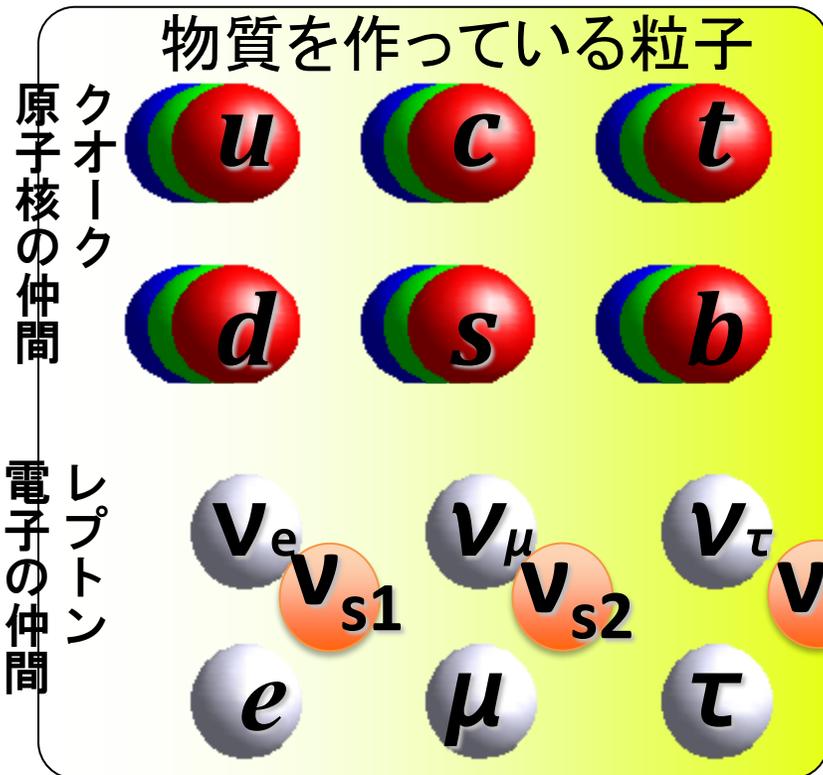
素粒子の研究(2) = 宇宙初期を探る

- 宇宙は138億年前にビッグバンという火の玉から始まった。
- 最初の高温・高圧のどろどろのスープ内には素粒子しか存在できない
- 「素粒子の性質を探ること」は宇宙初期の研究を行うことでもある。
 - 高いエネルギー加速器で疑似ビッグバン作製
 - ビッグバンの名残を探る
- 宇宙はまだまだ謎だらけ。
 - 万能なはずの素粒子標準理論は宇宙の構成の5%しか説明できない。
 - 他の「暗黒物質」や「暗黒エネルギー」は何者なのか？
 - 暗黒物質: 本命の超対称性粒子は未だ存在が確定できない。→群雄割拠 (重力しか感じない粒子なのでは?)



素粒子と力（標準理論）

重力相互作用



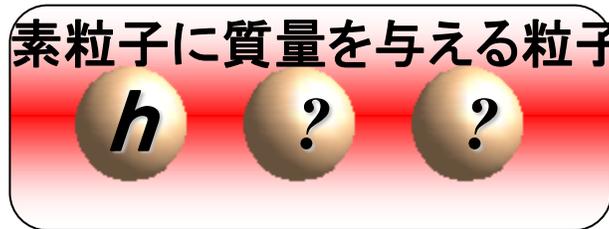
強い相互作用



電磁相互作用



弱い相互作用



ヒッグス粒子
(2012年に発見)

- ところで、弱い相互作用をするニュートリノは電子等とペアになっている3種類しかない
- しかし、重力しか感じないステルス性の高いニュートリノがあるのでは？ という示唆もあります。（上の ν_s ）

ステルス性の高い ν = ステライル ν :

- 存在が確定されれば、物理界に大きなインパクト

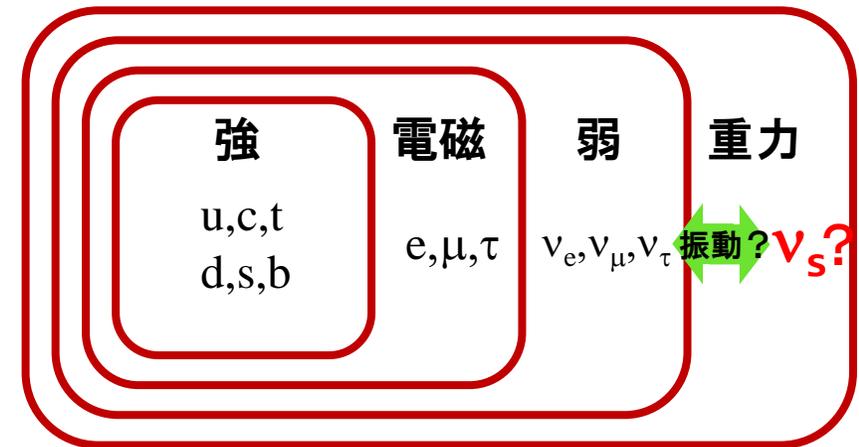
なぜなら,,,

- 標準理論枠外の**新粒子**の発見。
- 重力しか感じない**ため、暗黒物質の候補かもしれない。

- 標準理論を超える新たな枠組みへの**ブレークスルー**を与える。

- 弱い相互作用をしない粒子なので、ニュートリノ振動を使って観測を行う。

素粒子の種類と感じる力



標準理論内
電子の仲間
(レプトン)
Lは左巻、
Rは右巻

$$\begin{pmatrix} e \\ \nu_{eL} \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \mu \\ \nu_{\mu L} \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \tau \\ \nu_{\tau L} \end{pmatrix}$$

$$e_R, \quad \mu_R, \quad \tau_R$$

ステライル
ニュートリノ
を含む変更例。
右巻き ν がステライルに対応

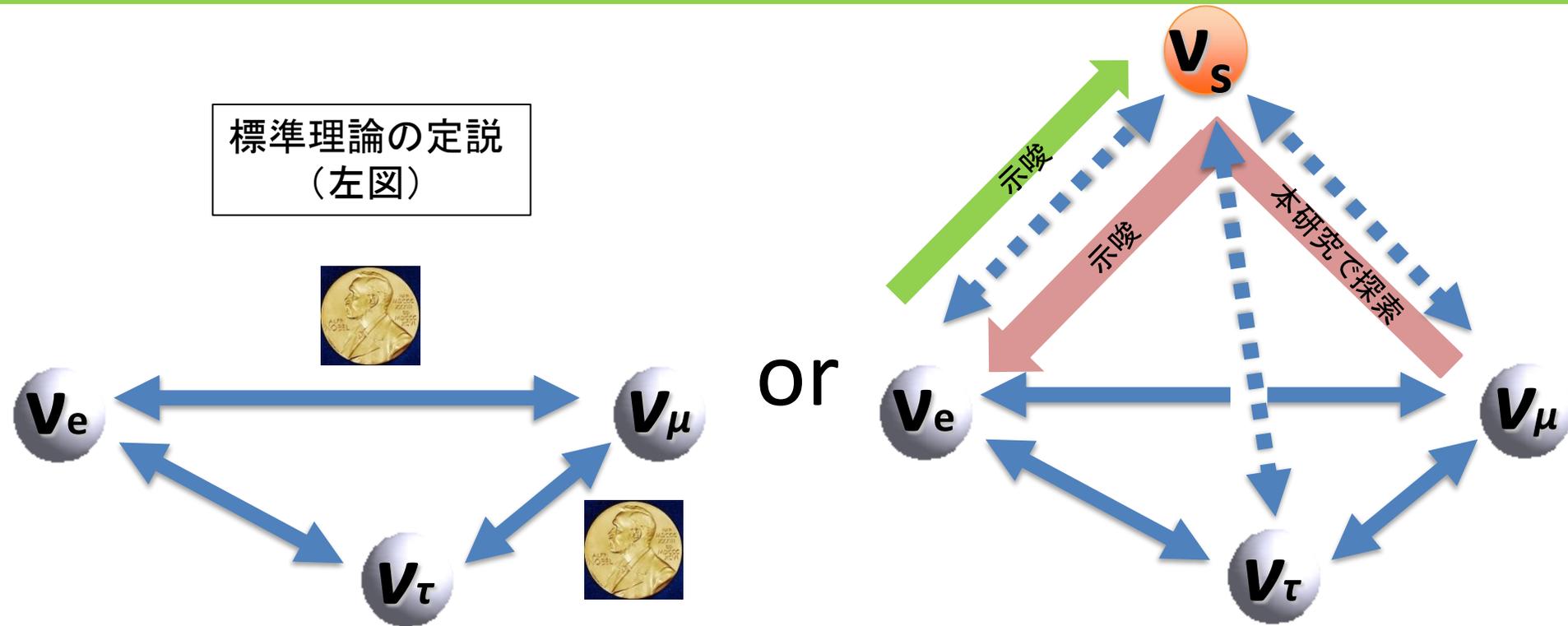
$$\begin{pmatrix} e \\ \nu_{eL} \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \mu \\ \nu_{\mu L} \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \tau \\ \nu_{\tau L} \end{pmatrix}$$

$$e_R, \quad \mu_R, \quad \tau_R$$

$$\nu_{eR} \quad \nu_{\mu R} \quad \nu_{\tau R}$$

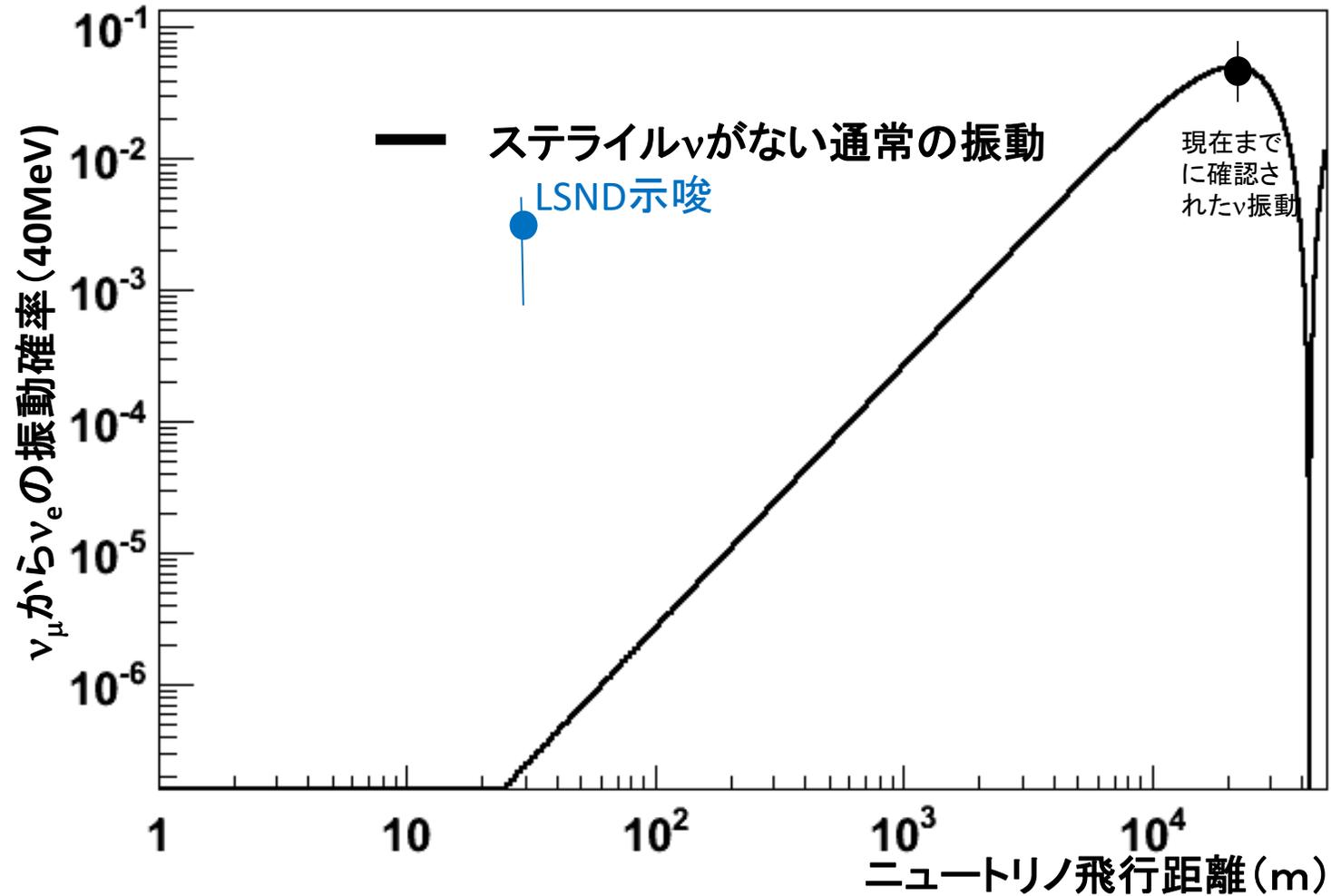
$\nu_s?$

ニュートリノ振動を使ってステライルニュートリノを探る



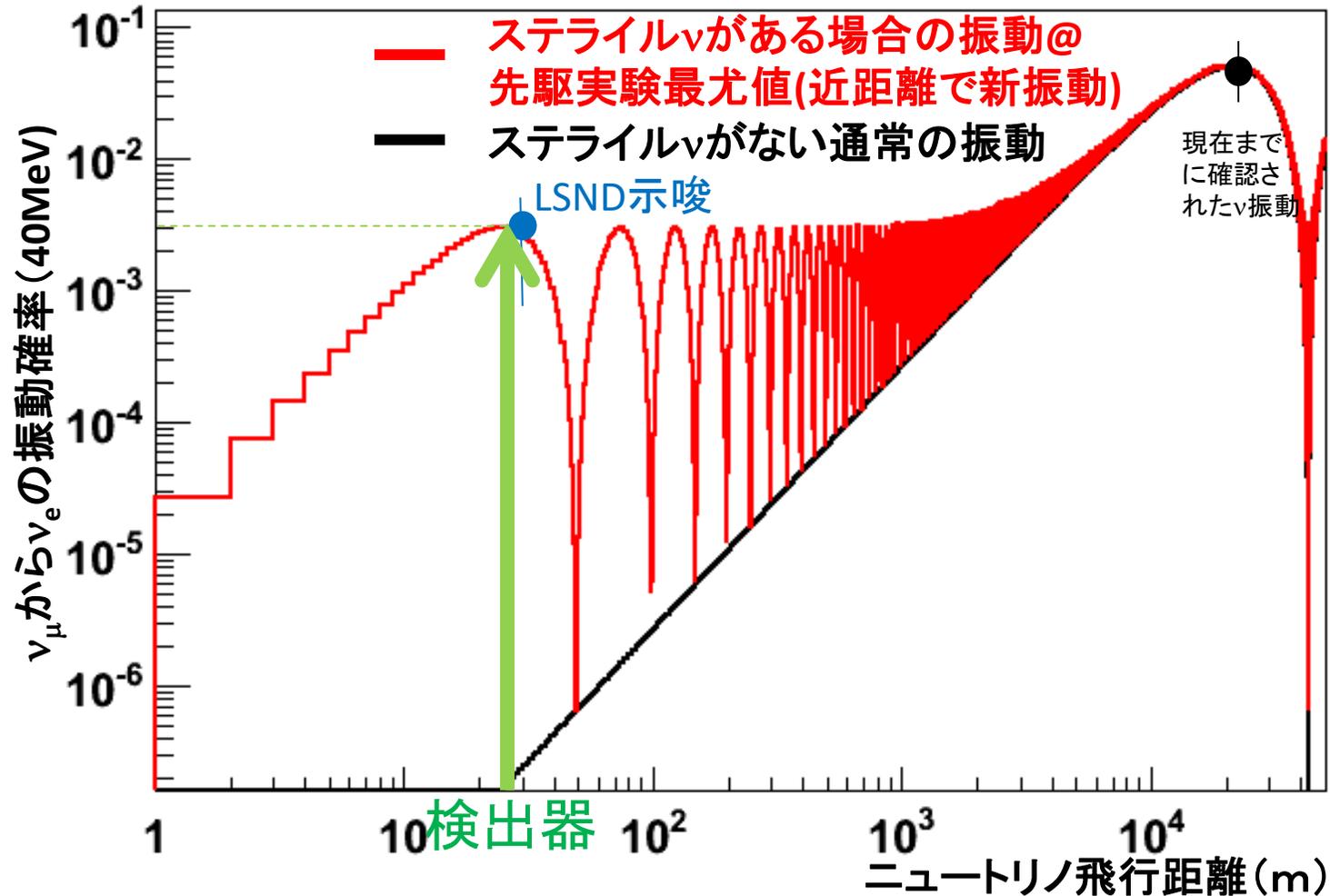
- ニュートリノ振動； ν の飛行距離とエネルギーによって、ニュートリノの型（電子、ミュー、タウ、（ステライル））が変化する現象。ミュー・タウ間振動1998年に日本で初発見、2015年ノーベル賞。
- JSNS²実験は未解決の「型変化の中に弱い相互作用が無い新しいステライルニュートリノ(ν_s)が含まれるか？」を高精度で探る。
 - いくつかの先駆実験が存在を示唆。様々な理論で予言。
 - 国際会議等でも必ず触れられる、世界的注目度が高い研究。
 - 存在確定されれば、常識を覆す大発見。

実験示唆と振動による説明



- 通常の振動で説明できないLSND実験示唆。

実験示唆と振動による説明



- ステライル ν =他の ν より重い=近距離で振動。
- 通常の振動で説明できないLSND実験示唆。
- 赤線は実験示唆をステライルがある近距離振動で説明した場合。

実験場所

(J-PARC MLF)

J-PARC Facility
(KEK/JAEA)

South to North

3GeV RCS

400MeV

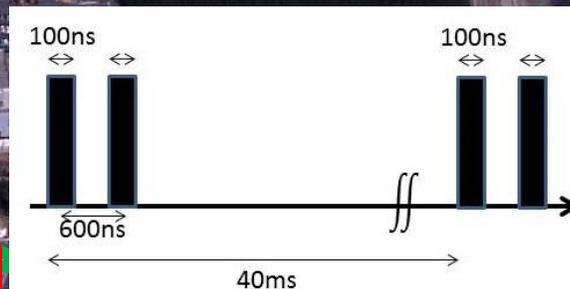
Neutrino Beams
(to Kamioka)

30GeV MR

Materials and Life
experimental
Facility 物質・生命
科学実験施設(MLF)

25Hz, 1MW (design)

Hadron hall



短時間パルス
ビーム

→宇宙等から
来る疑似信号
事象等を大き
く減らすこと
ができる。

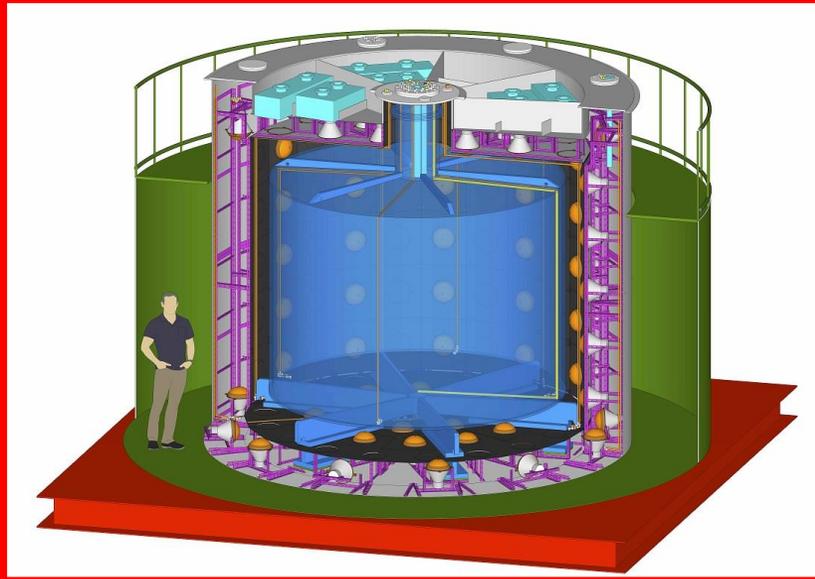
JSNS²: J-PARC MLF内のセットアップ

物質生命科学研究施設(MLF) 建屋鳥瞰図



検出器位置@3階
(標的から24m)

水銀標的=中性子源
かつニュートリノ源



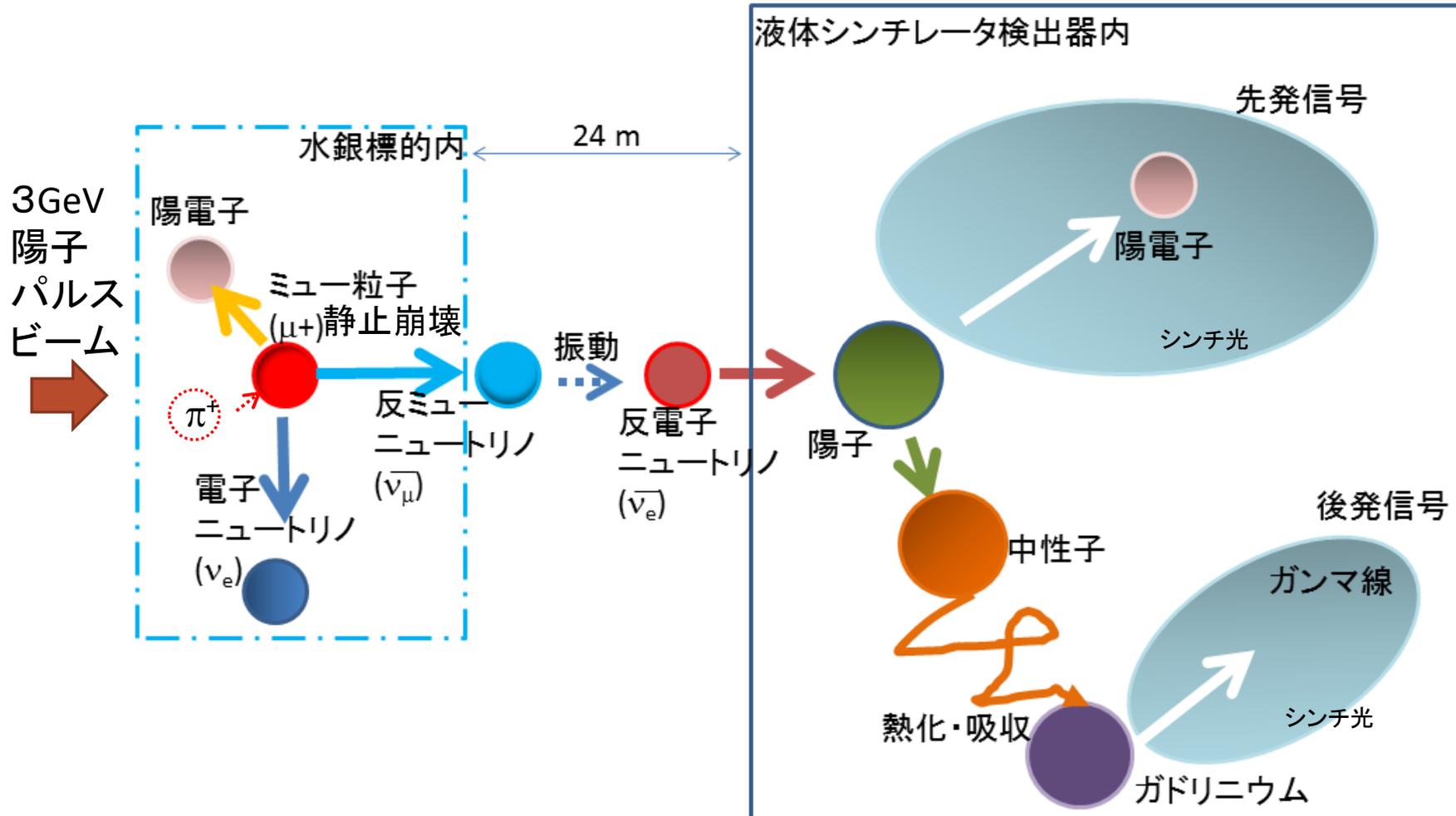
50トン液体シンチレータ検出器
(4.6m直径4.0m高)+120本10
インチ光電子増倍管

3GeV 陽子パルス
ビーム

反ミュー型ニュートリノが反電子型ニュートリノに
近距離で振動するかを探る。(ステライル ν 探索)

ニュートリノ発生・検出原理

- 水銀標的内で大量の μ^+ 粒子（親粒子）、続いてニュートリノが生成。
- ステライルニュートリノがあれば生成した反 μ ニュートリノが24m間で反電子ニュートリノへ振動
- 振動した反電子ニュートリノを2つ同時に起こる（先発・後発）信号で観測。



液体シンチレータ

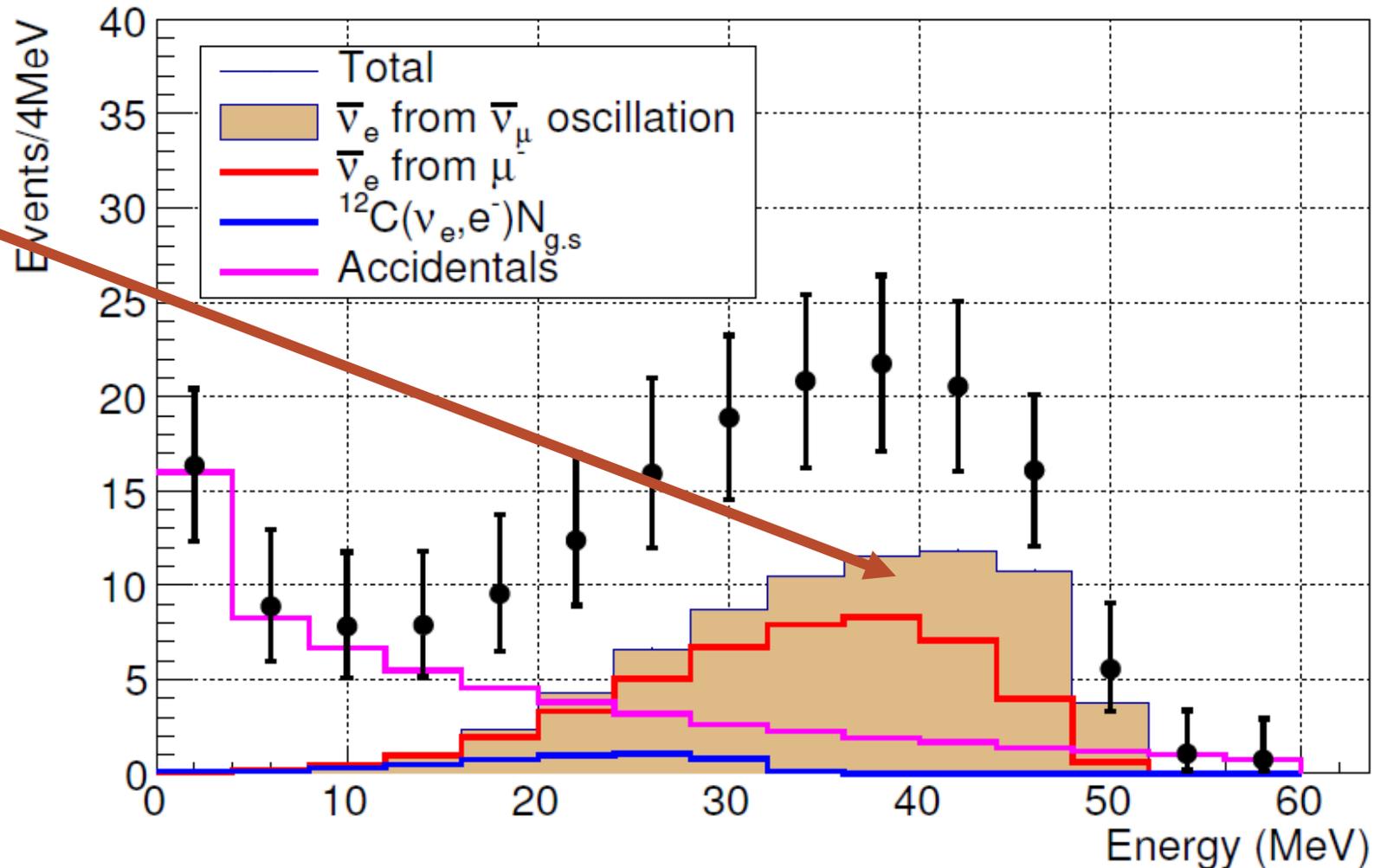
素粒子が通過すると等方的に光を出す

「チェレンコフ光のように方向性が無い」代わりに「チェレンコフ光の100倍多い光を得られる」

典型的なエネルギー分布 (シミュレーション)

- 期待されるエネルギー分布; (LSND実験が本当だった場合)
- 信号に似た偶発事象 (赤、紫、青) と信号が良く区別できる。

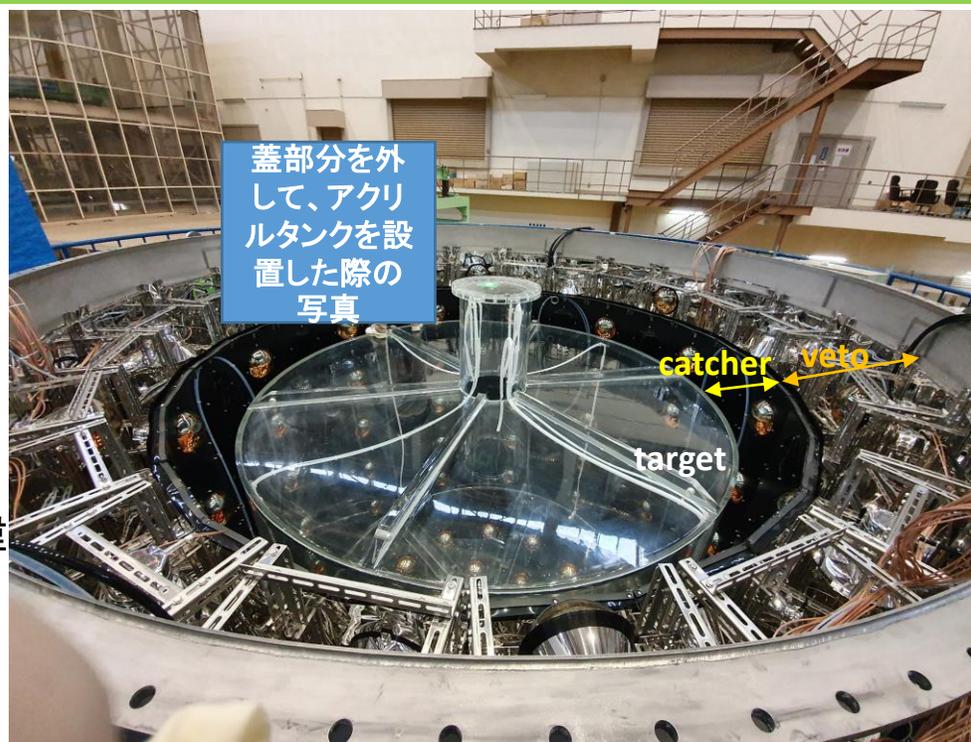
ステライル
があった際の
振動信号
(茶色部)



先駆LSND実験
最尤値での様子

検出器建設 (2017-2020)

- 検出器建設: 2017年末に開始、2020年2月に終了。
 - ステンレスタンク建設 (2017-2018: 森松工業)
 - アクリルタンク建設 (2018-2019: 台湾Nakano社製).
 - 10" 光電子増倍管 (光センサー):
 - ~53% は韓国RENO実験から
 - ~30% は新規購入 (韓国グループ)
 - ~17% はDouble-Chooz実験から
 - 35トンのGd無液体シンチレータは韓国の共同研究者がRENO実験サイトで作製 (2018)
 - 17トンのGd有液体シンチレータは中国Daya-Bay実験から寄贈 (2019).
 - 電子回路・データ取得系:
 - FADCsはDC日本グループから寄贈。
 - 前段部電子回路はDC実験から寄贈
 - 高電圧印加装置はDC実験から
 - ミシガン大学が改良電子回路を作製中
 - 光センサー校正用の高速LEDシステムは英国の共同研究者が開発・設置。



10" 光電子増倍管 (光センサー)

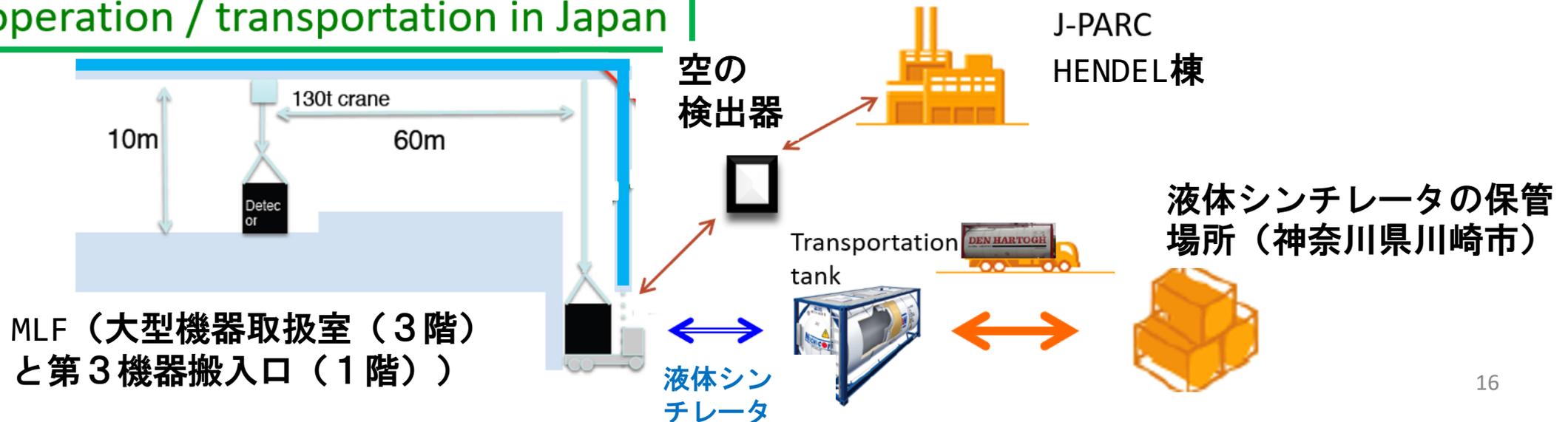
世界の様々な他の液体シンチレータ検出器実験の物品を再利用する、非常に効率的な実験Daya-Bay、RENO、DC実験に感謝します。

検出器の年次オペレーション (JSNS² 特有の難しさ)

- MLFの3階は水銀標的やビーム装置をメンテナンスするエリア
→ 夏季長期ビームシャットダウン中(4ヶ月程度)メンテナンス作業の邪魔にならないよう、MLF外に搬出。
- → 液体シンチレータの充填・抜取りを可能な限り速やかに行う必要有。
- このため、我々の実験では、ISO(国際標準)-タンクを液体シンチレータの移動・保管に用いている。



LS operation / transportation in Japan

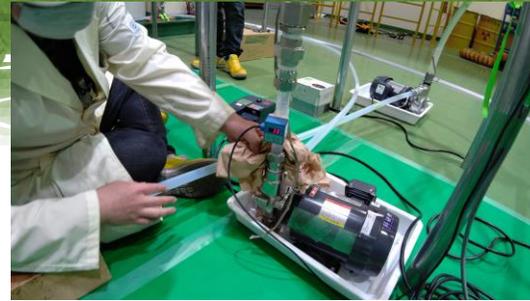


検出器保管エリアから物質・生命科学実験施設へ



液体シンチレータ充填・抜取

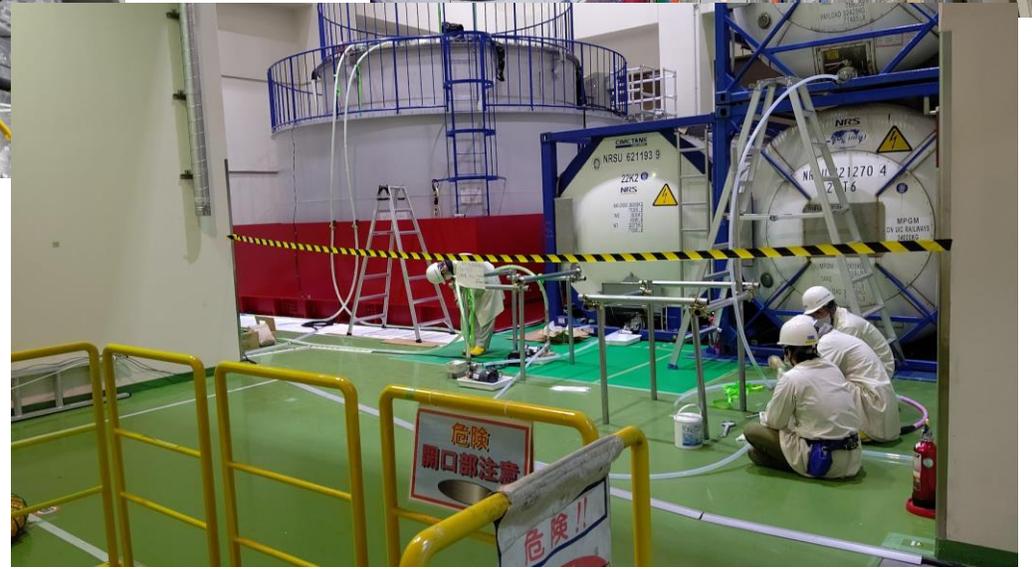
- 2020/12: 液体シンチレータ保管タンク搬入
- 2020/12/17-23: 充填作業
- 2020/12/24: 検出器の3階への設置
- 2021/1/12-: ビームを用いた初の本格的長期データ取得



- 他実験では、1か月単位でかかる作業を数日で遂行。



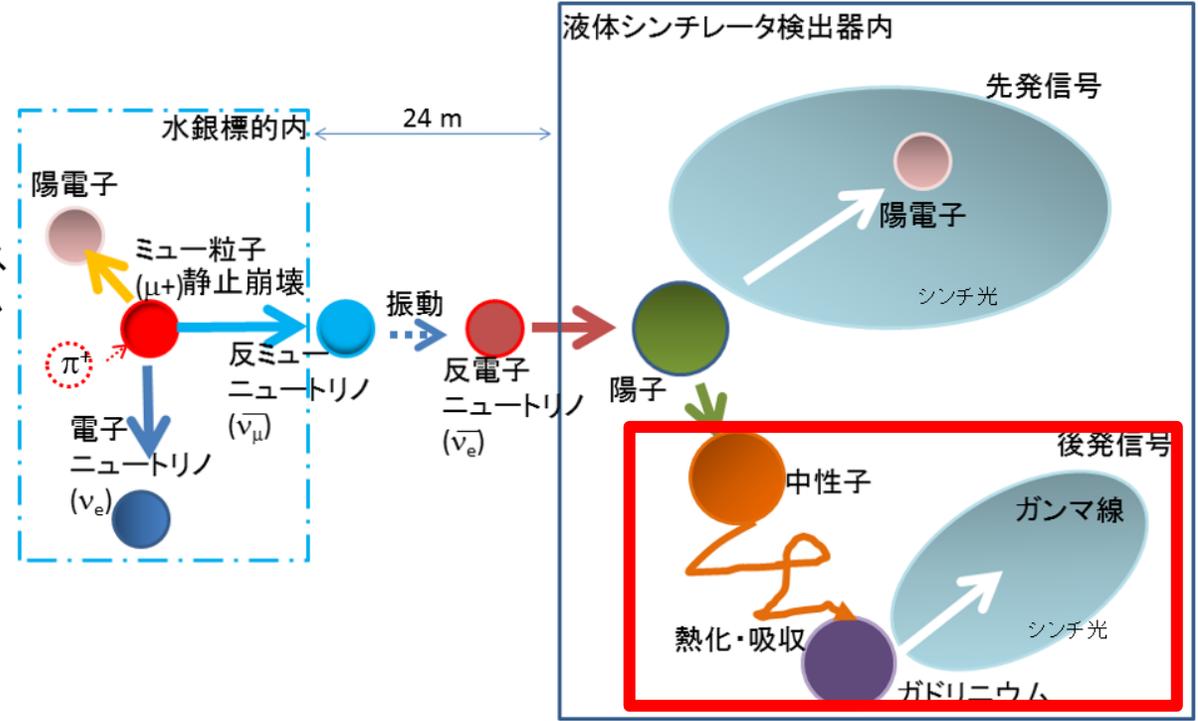
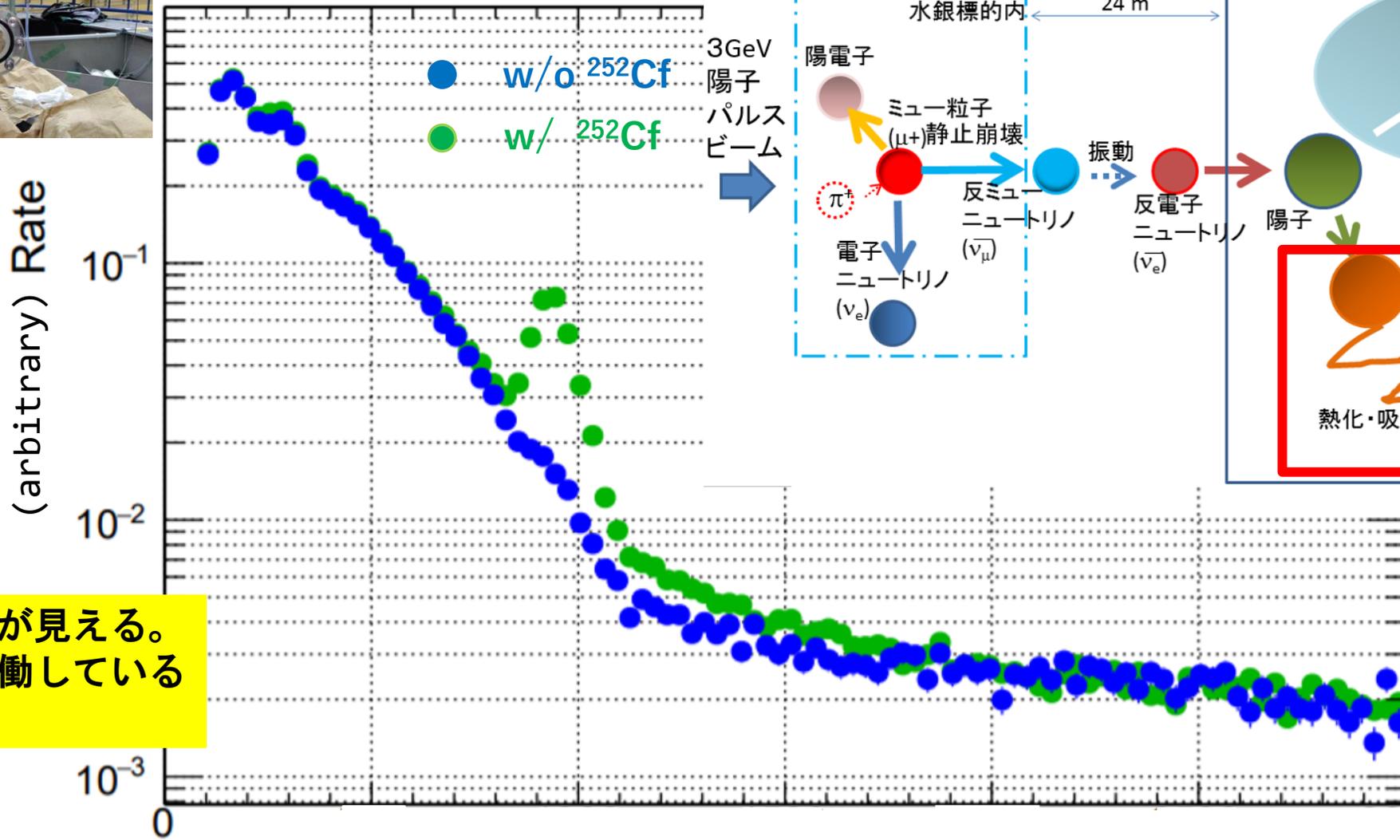
液面高さ推移



充填後、検出器をMLF1階から3階へ移動



^{252}Cf (中性子線源) を用いた較正

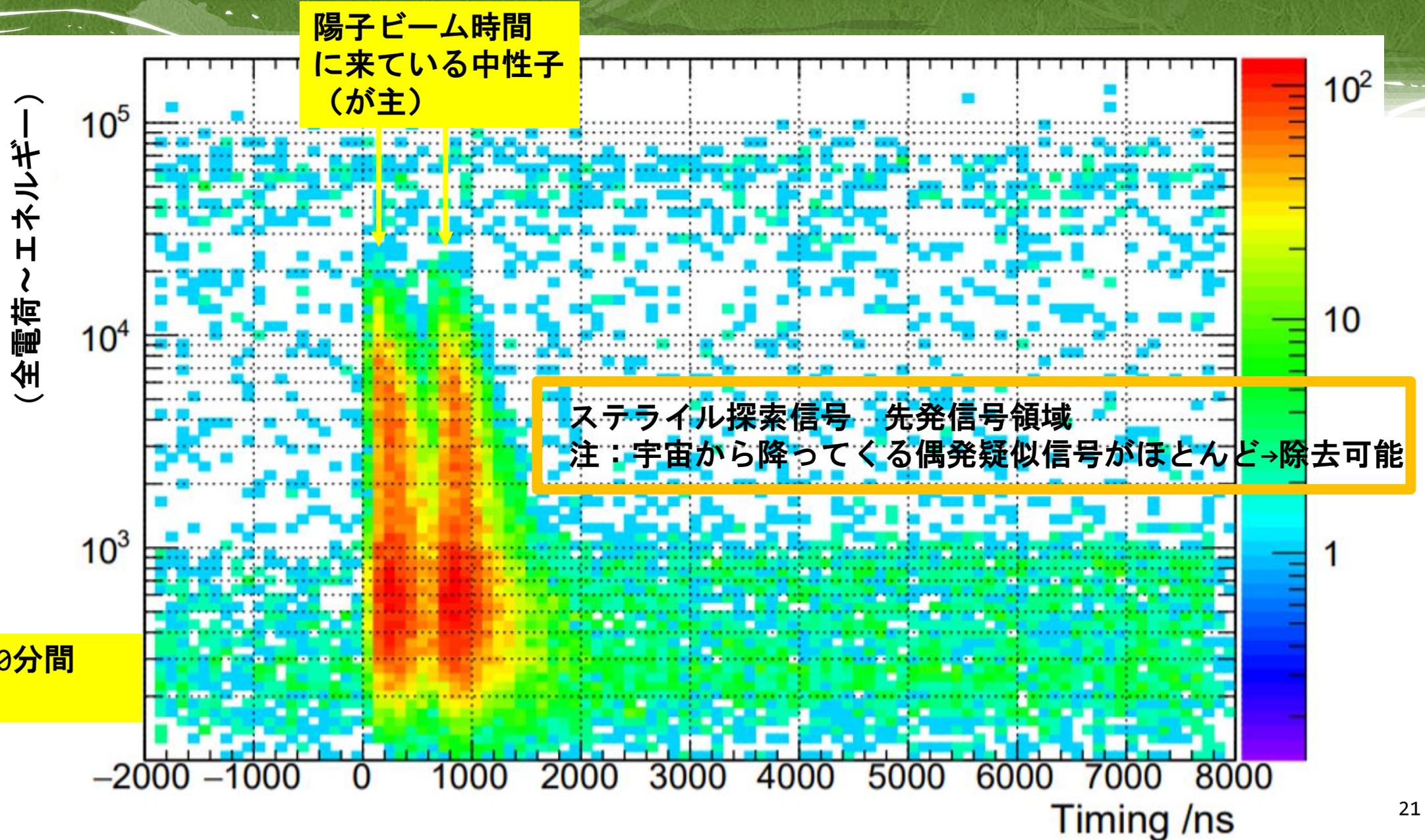


探索信号のこの部分を模擬試験。

明らかなピークが見える。検出器が良く稼働している証拠。

Total Charge (全電荷~エネルギー)

陽子ビーム時間付近の様子



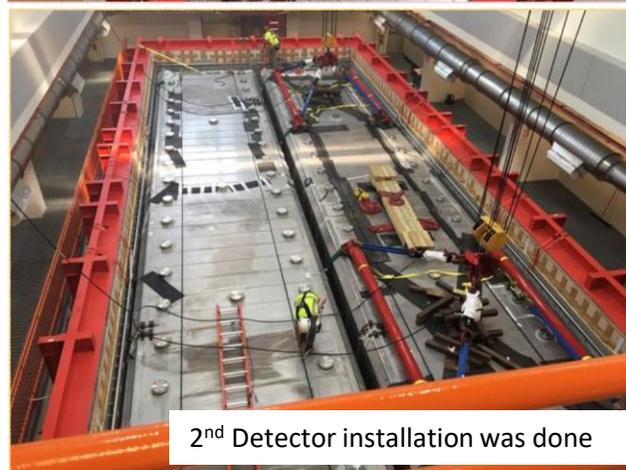
最初の約30分間
データ

国際情勢

- 世界のライバル実験；
米国フェルミ研究所：SBN実験

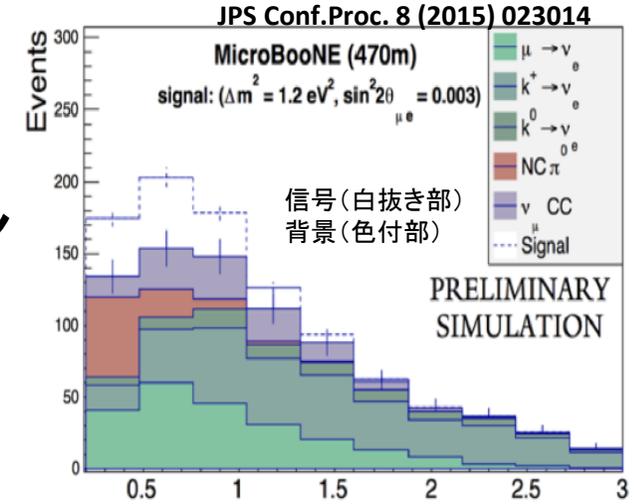
- π 飛行中崩壊ビーム＋3液体アルゴン

- ビーム背景事象5倍（右図）
- ν エネルギー不定性大（静止vs飛行中崩壊）
- 検出器 ν エネルギー再構成：原子核効果大

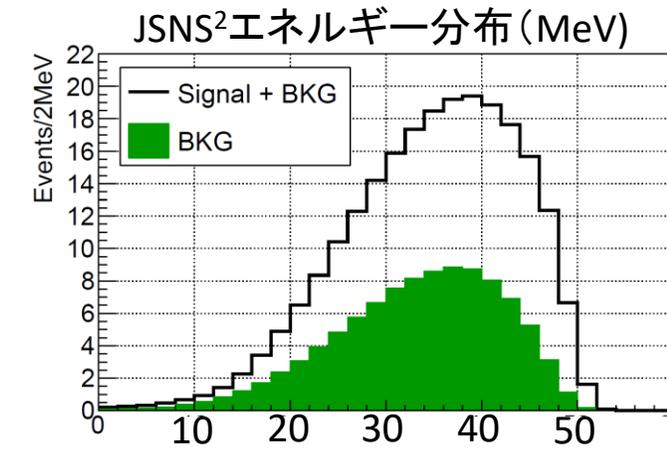


- **現在、液体アルゴンを入れて試運転中**
左は、300トン（×2台）の液体アルゴン
飛跡検出器低温容器

- （順調にいくと2021～2025の間にLSND示唆領域
全域に発見感度。）



SBN 470m検出器での ν エネルギー分布 (GeV)



まとめと展望

- JSNS²実験では、J-PARC物質・生命科学実験施設で、新種の重力しか感じないニュートリノ（ステライルニュートリノ）を探索する。
- ステライル ν が入った振動現象存在確認は、現在ニュートリノ業界で最も熱い話題の一つ。存在すれば素粒子物理学にブレークスルーをもたらす発見となる。
- 2021年1月12日、初の本格的物理データ取得ランを開始。現在順調にデータ取得中。
- 解析を進め、世界に先駆けた結果を発表する予定。