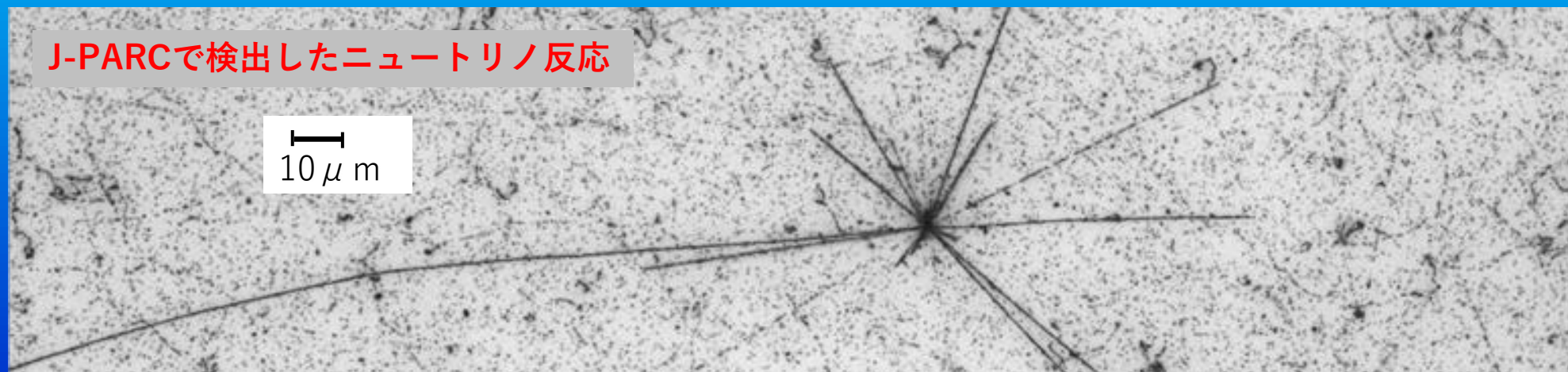


原子核乾板を用いたニュートリノ関連研究による 素粒子・宇宙・地球の解明

福田 努 (名古屋大学 高等研究院/F研)



2013年ICEPPシンポ
そんなに変わってない(ハズ)



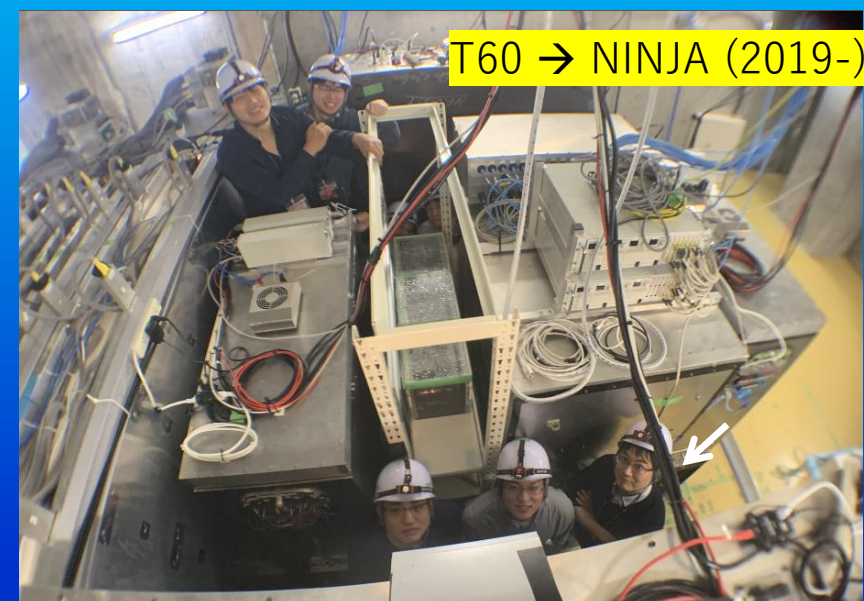
イントロダクション

- ・ 福田 努 (ふくだ つとむ)
- ・ 兵庫県神戸市出身
- ・ 趣味：バスケ・歴史・
- ・ 研究：原子核乾板の技術開発
ニュートリノ実験
(OPERA, NINJA, $0\nu\beta\beta$)
地球科学・医療等への応用

OPERA(2003-2018)



ICEPPシンポ	発表タイトル
17 th (2011)	OPERA実験で検出したタウニュートリノ反応
18 th (2012)	原子核乾板を用いたニュートリノスペクトロメーターの研究開発
19 th (2013)	OPERA実験におけるタウニュートリノ反応背景事象の詳細研究
20 th (2014)	長基線ニュートリノ振動実験OPERAにおけるタウニュートリノ出現
21 st (2015)	原子核乾板によるニュートリノ研究
22 nd (2016)	Neutrino Experiments with Nuclear Emulsion - OPERA & J-PARC T60-
23 rd (2017)	J-PARC T60：J-PARCでの原子核乾板を用いたニュートリノ反応精密測定実験
24 th (2018)	NINJA実験の現況と展望
：	：
31 st (2025)	今回 (ひさしぶりに参加します)

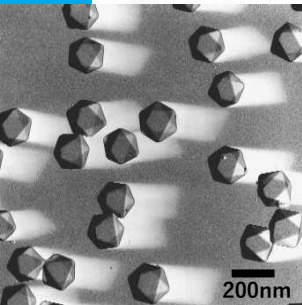
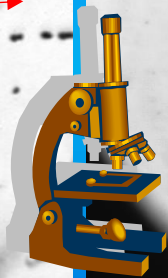


T60 → NINJA (2019-)

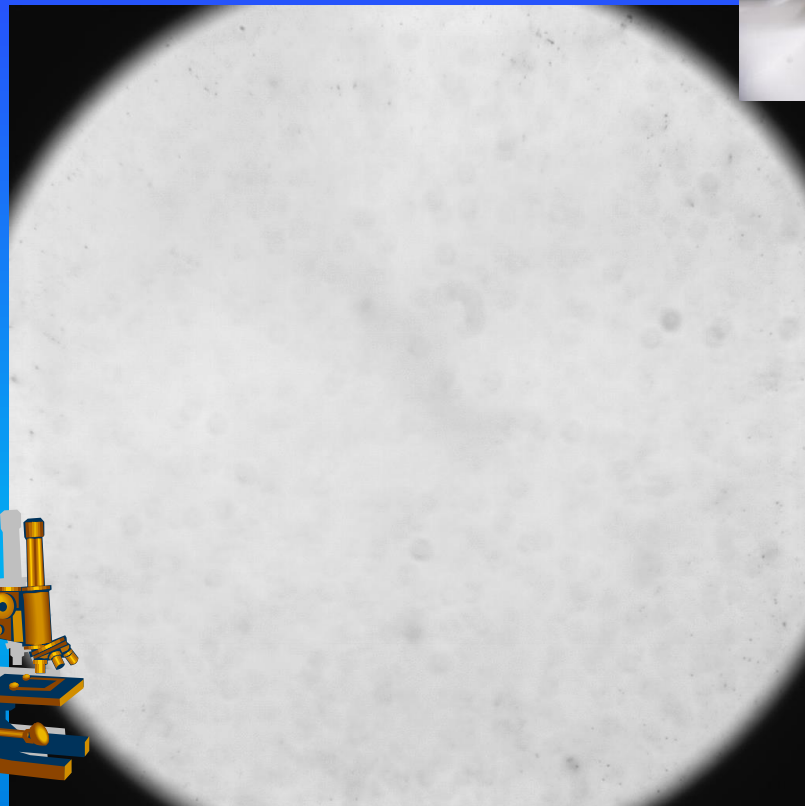
原子核乾板

銀塩感光材料を用いた、荷電粒子の飛跡を記録する写真フィルム的一种。

最小電離粒子に感度をもつ



50 micron



世界最大のフィルムカメラ (OPERA検出器)

はがきサイズのフィルムを900万枚使用

像の検出

	長所	像の検出
フィルムカメラ	高解像度	ハロゲン化銀 光のエネルギーが起こす化学変化を利用した光化学反応。
デジタルカメラ	即時性	電荷結合素子 (CCD素子) 光のエネルギーを電気エネルギーに変換する光電変換。

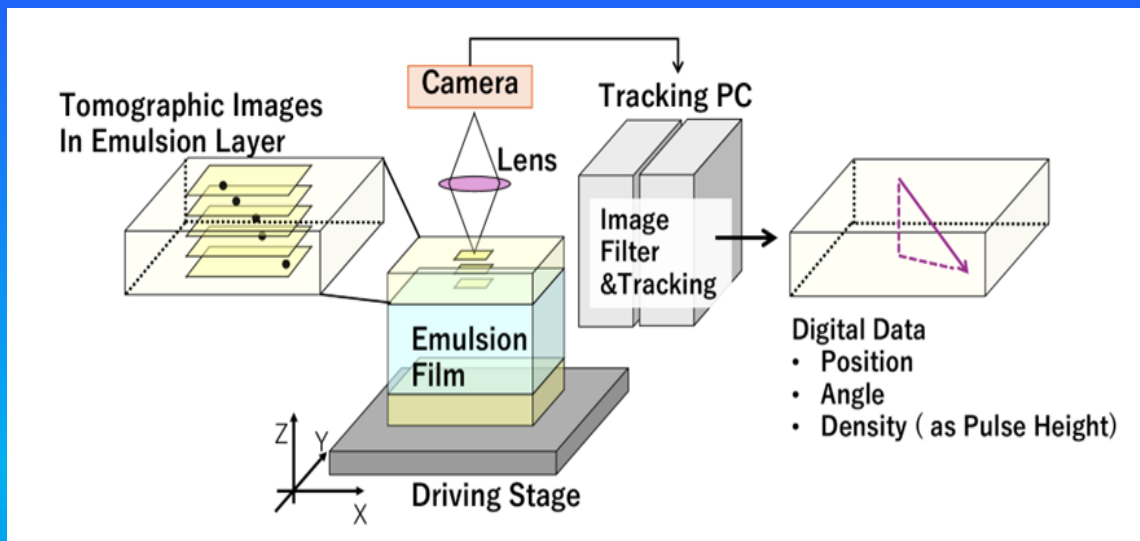
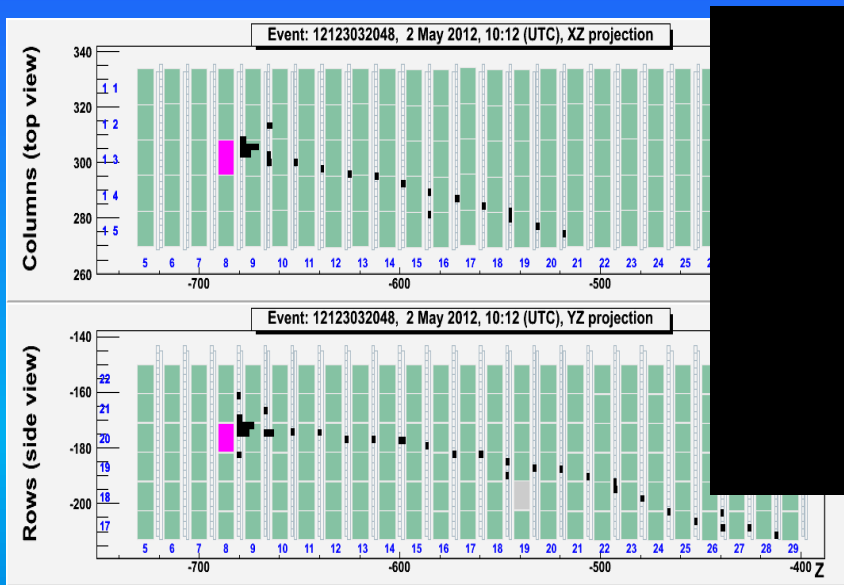


原子核乾板を用いたニュートリノ研究

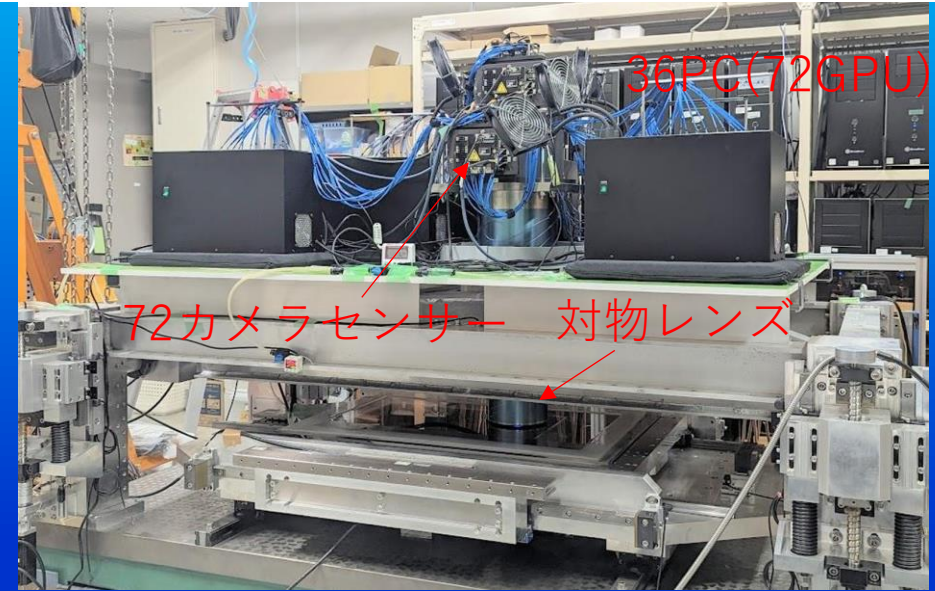
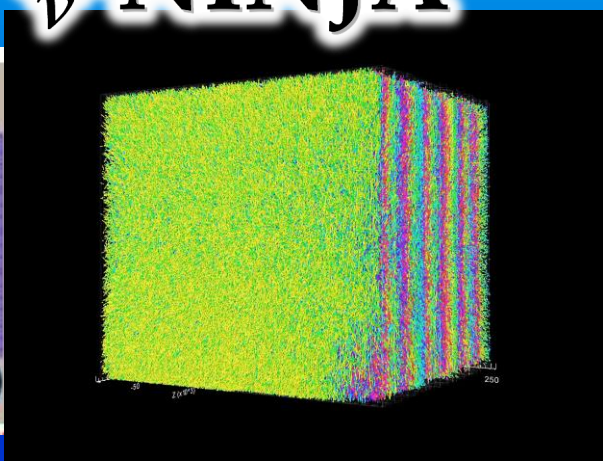
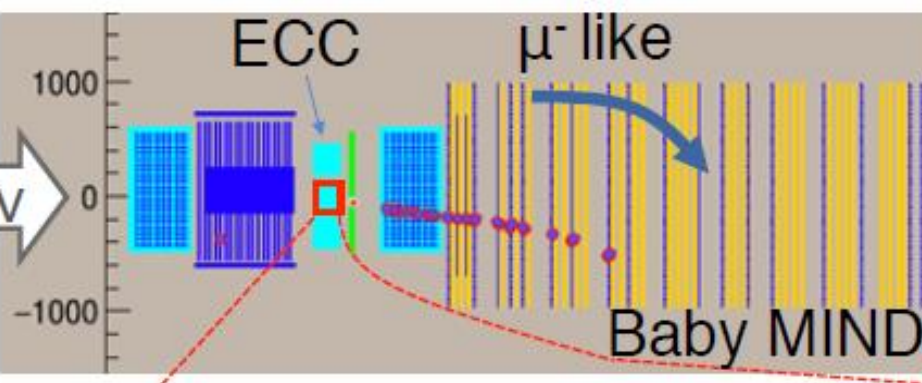
加速器実験

エマルジョン-カウンターハイブリッド解析

高速自動飛跡読み取り装置



NINJA



ニュートリノ振動

- 素粒子の標準模型を超える初の実験事実

MNS

Progress of Theoretical Physics, Vol. 28, No. 5, November 1962

Remarks on the Unified Model of Elementary Particles

Ziro MAKI, Masami NAKAGAWA and Shoichi SAKATA

*Institute for Theoretical Physics
Nagoya University, Nagoya*

(Received June 25, 1962)

$$\left. \begin{aligned} \nu_e &= \nu_1 \cos \delta - \nu_2 \sin \delta, \\ \nu_\mu &= \nu_1 \sin \delta + \nu_2 \cos \delta. \end{aligned} \right\} \quad (2.18)$$

The leptonic weak current (2.9) turns out to be of the same form with (2.1). In the present case, however, weak neutrinos are *not stable* due to the occurrence of a virtual transmutation $\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu$ induced by the interaction (2.10). If the mass difference between ν_2 and ν_1 , i.e. $|m_{\nu_2} - m_{\nu_1}| = m_{\nu_2}^{*2}$ is assumed to be a few Mev, the transmutation time $T(\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu)$ becomes $\sim 10^{-28}$ sec for fast

Theory (1962)

SK

First experimental evidence (1998)

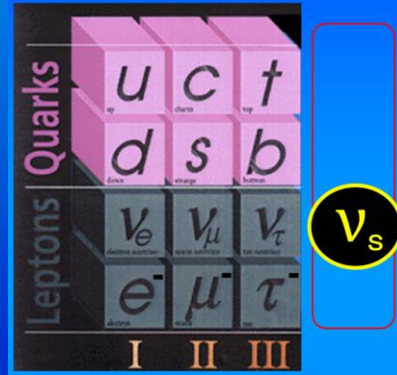
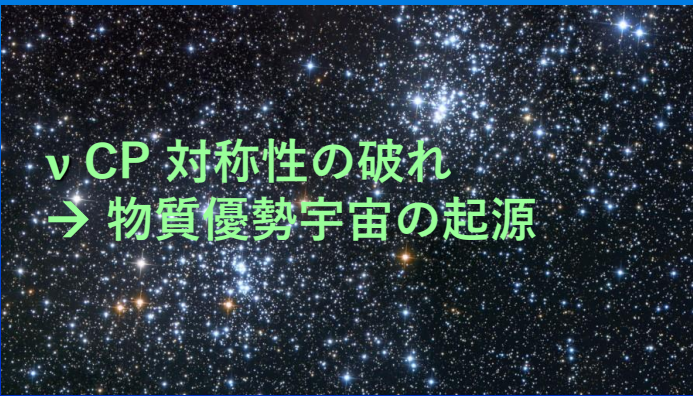
Our work

SNO, MACRO, K2K, KamLAND, MINOS, T2K, ANTARES, IceCube, ...

Final demonstration (2015)

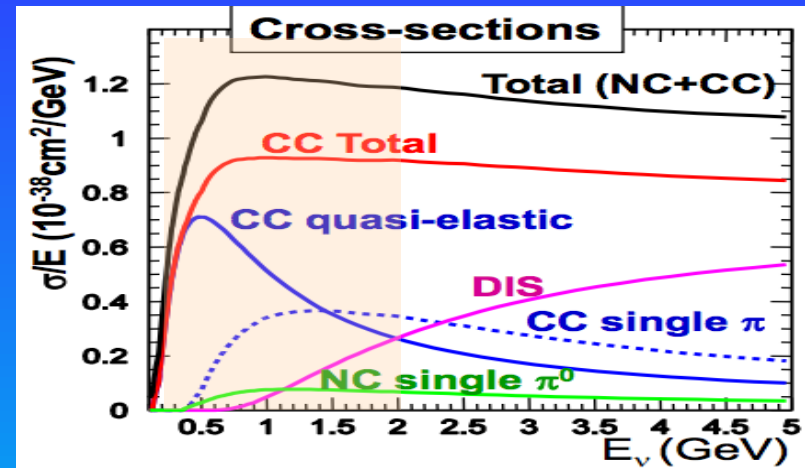
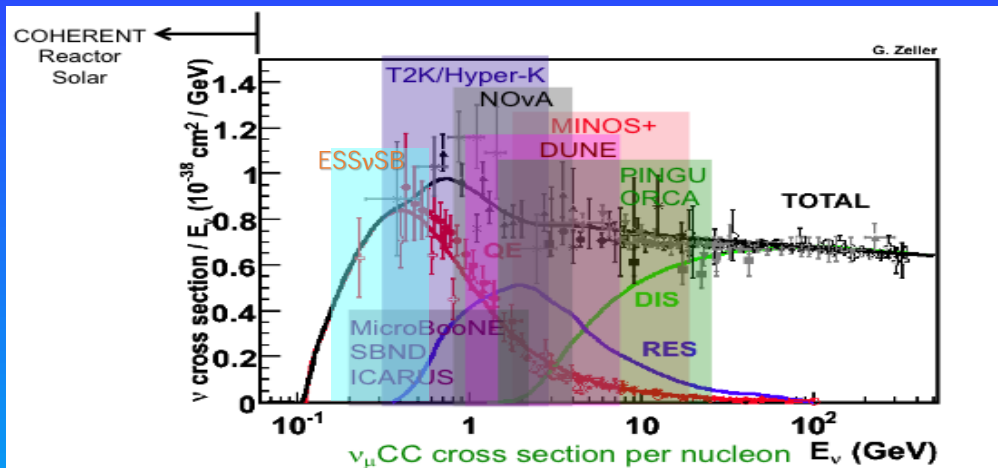
identified as a proton by dE/dx analysis [26]

ニュートリノ振動の精密測定
 → 現在の物質優勢な宇宙の謎の解明・素粒子標準模型を超える新物理の探索

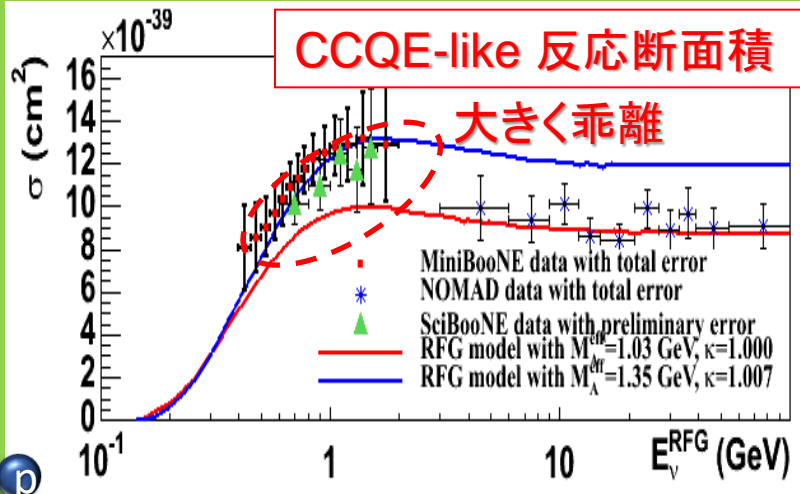
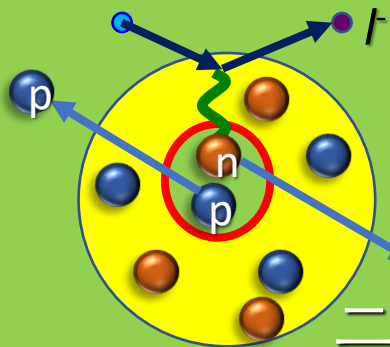


ステライルニュートリノ!?
 → 第4世代目?
 暗黒物質? 右巻きニュートリノ?

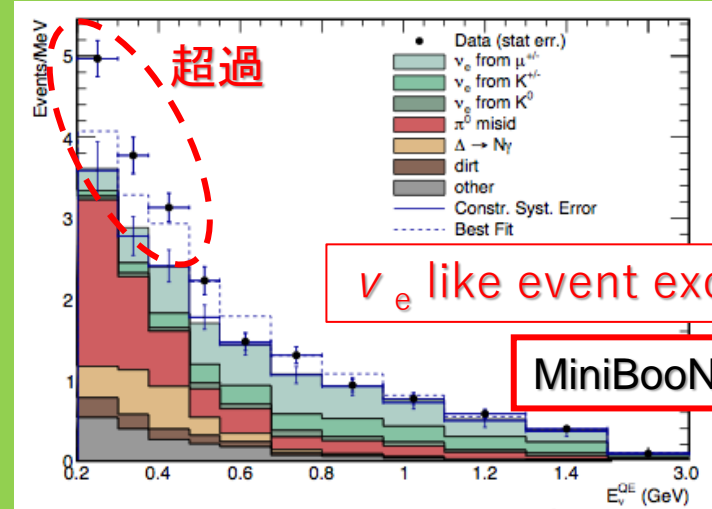
Sub-Multi GeVのニュートリノ研究



現行・将来の多くのニュートリノ振動研究がsub-multi GeVエネルギー領域



ニュートリノ複数核子反応?



ステライルニュートリノ?

ニュートリノ-原子核反応の不定性が大きな系統誤差となり、高精度なニュートリノ振動測定を阻んでいる。

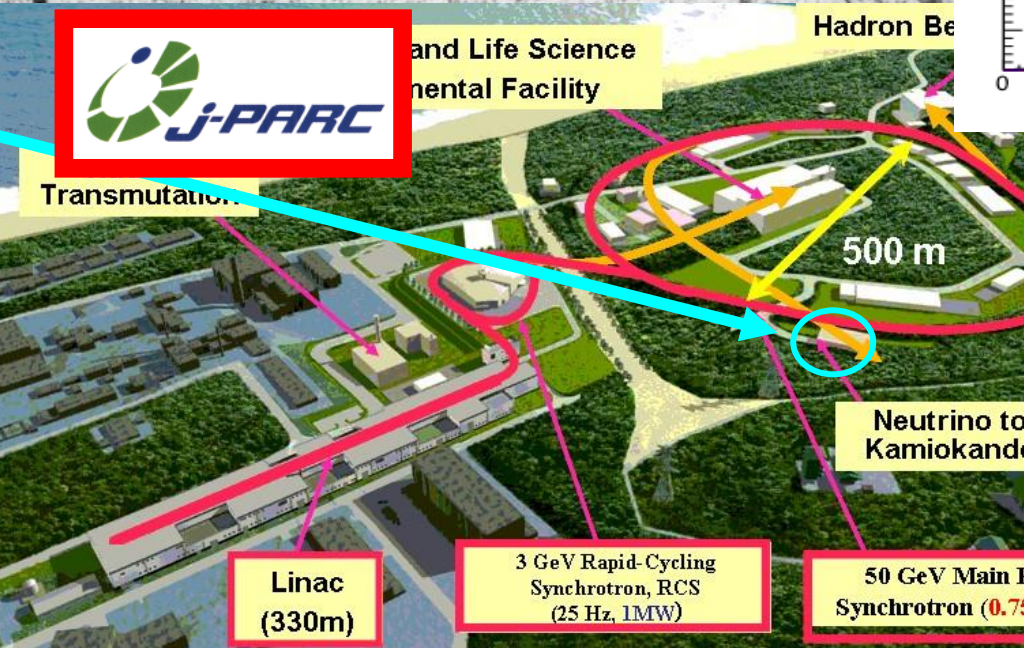
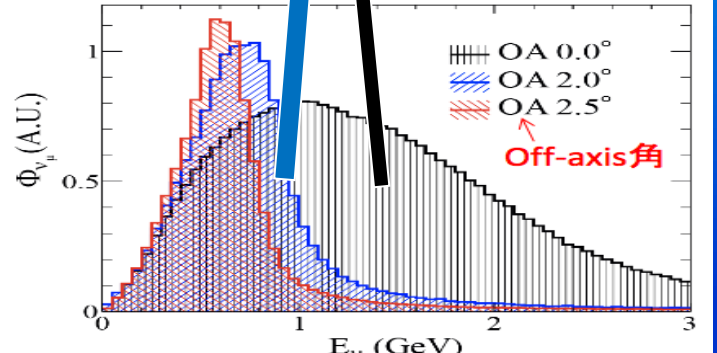
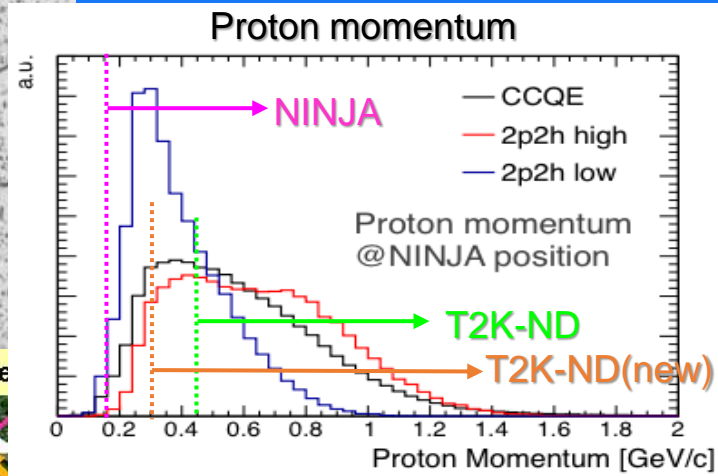
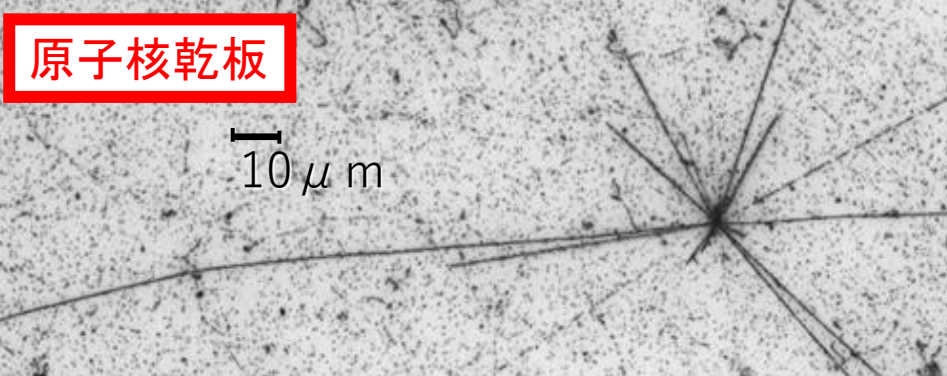
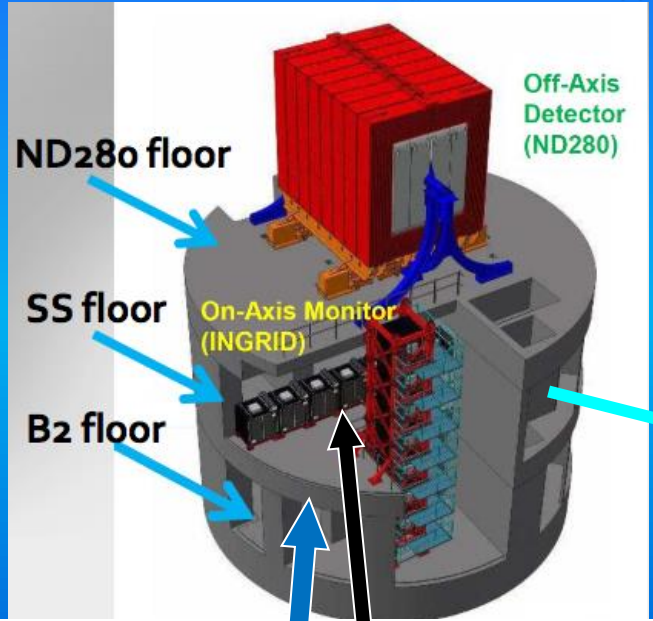
Neutrino Interaction research with Nuclear emulsion and J-PARC Accelerator

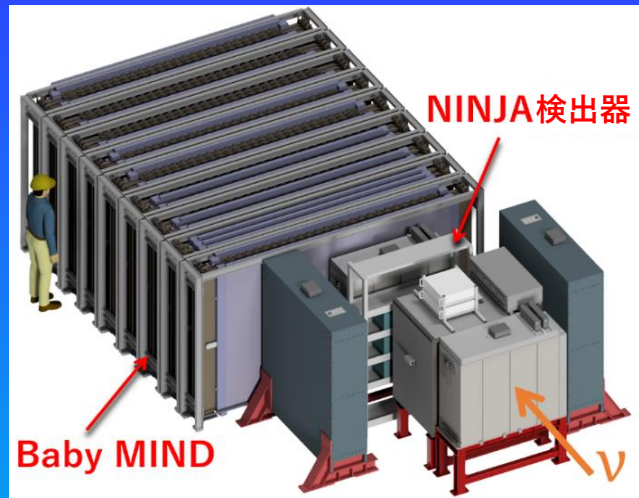
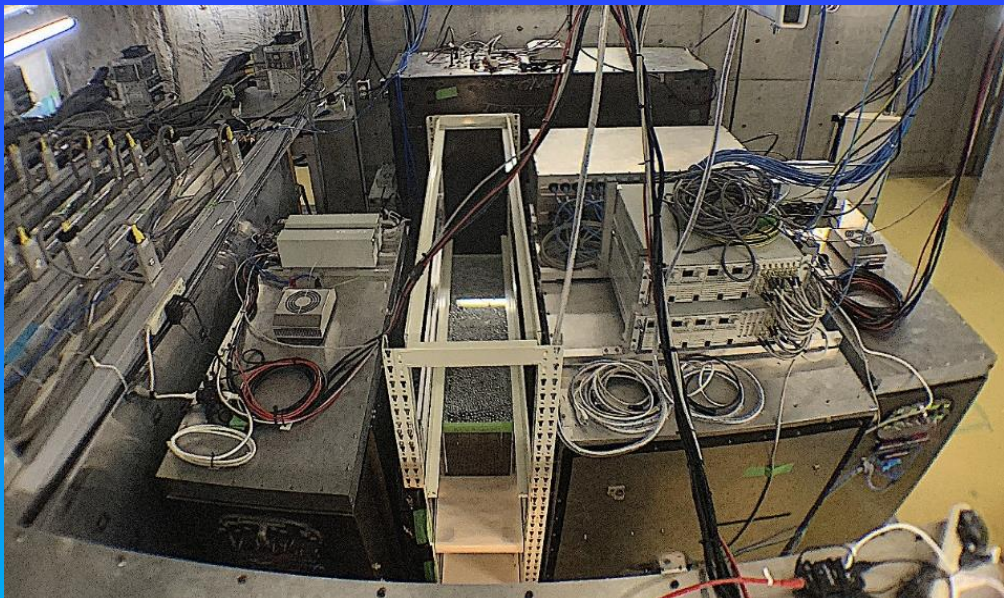
- Sub-Multi GeV 領域のニュートリノ-原子核反応断面積の精密測定
- 電子ニュートリノ反応断面積の測定, ステライルニュートリノ探索




 3ヶ国13研究機関

J-PARCニュートリノ実験モニター棟



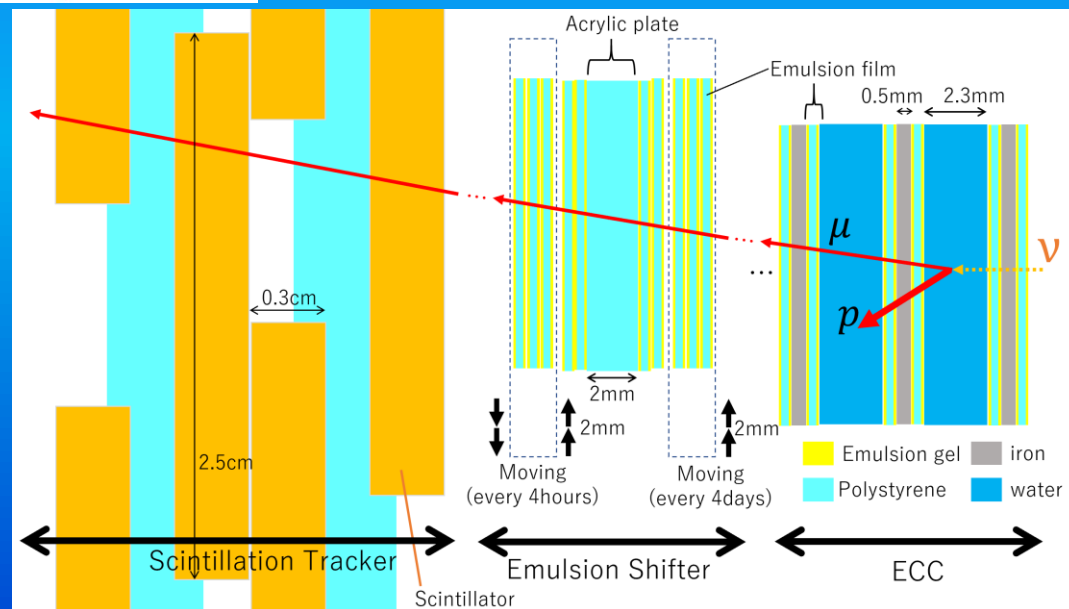
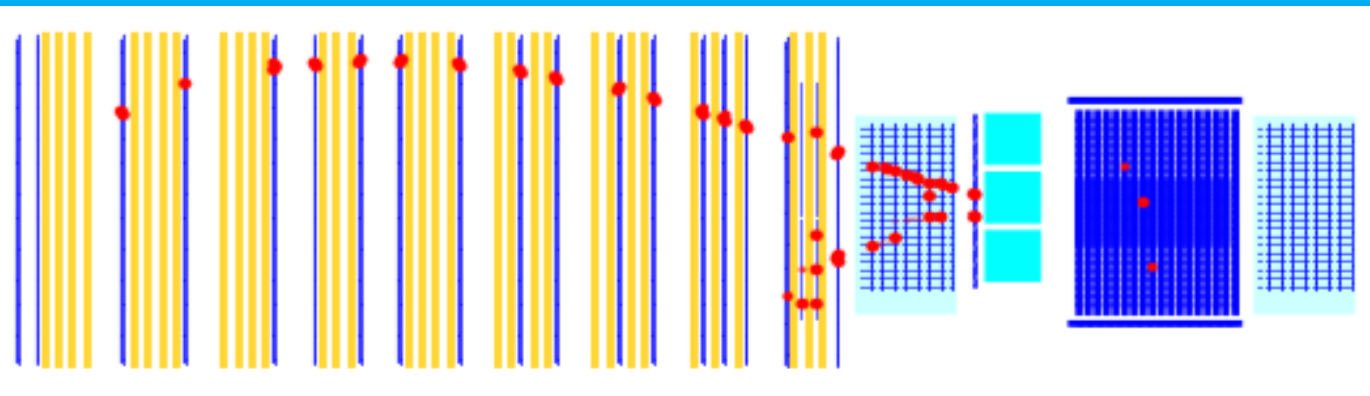
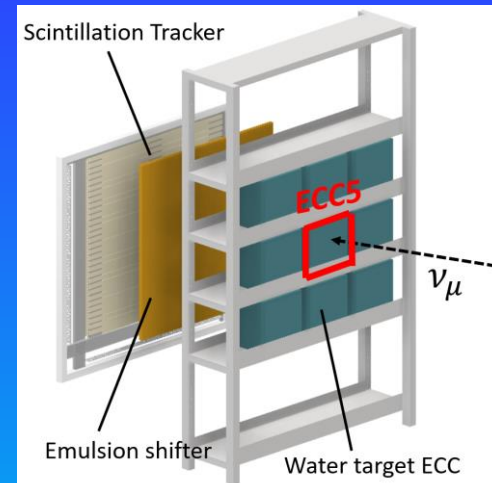


250kg Target

H₂O: 75kg
Fe: 130kg
CH: 15kg
em : 30kg

Film 130m²

5,000 events



E71a: 2019年11月 – 2020年2月
E71b: 2023年11月 – 2024年2月
E71c: 2025年11月 – (予定)

Total POT: 10²¹

	Scintillation Tracker	Emulsion Shifter	Water ECC
Time resolution	10 nsec level	4 hour	--- (100 day)
Position resolution	2.1 mm	1 μm level	1 μm level

直近の物理ラン (E71b)

原子核乾板フィルム製作

フィルム・リフレッシュ

塗布後から蓄積した宇宙線や環境放射線といったノイズ飛跡を消去

10/2-20

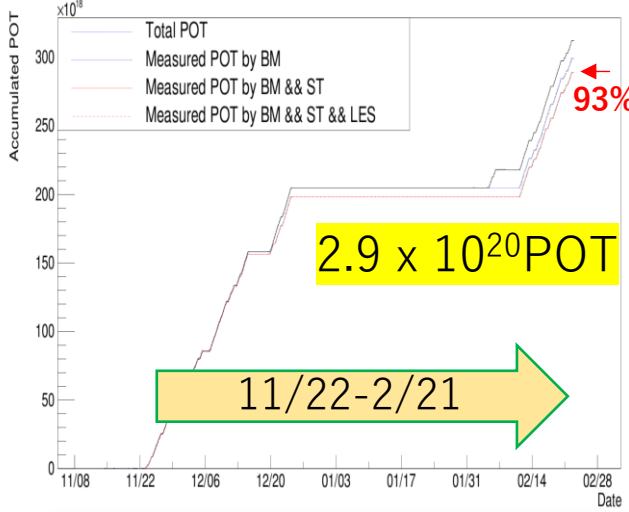
~30°C
>90%R.H.

~1300 emulsion films

水標的ECC製作@J-PARC



ニュートリノビーム照射

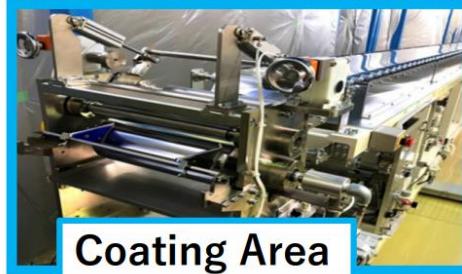


E71a: 手塗り塗布

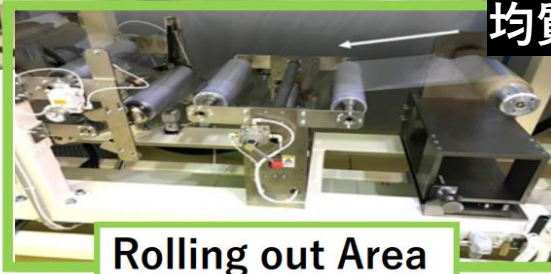
10 m Dryness Area

E71b: 機械塗布

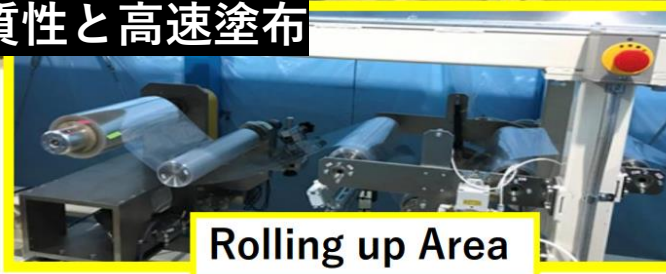
均質性と高速塗布



Coating Area

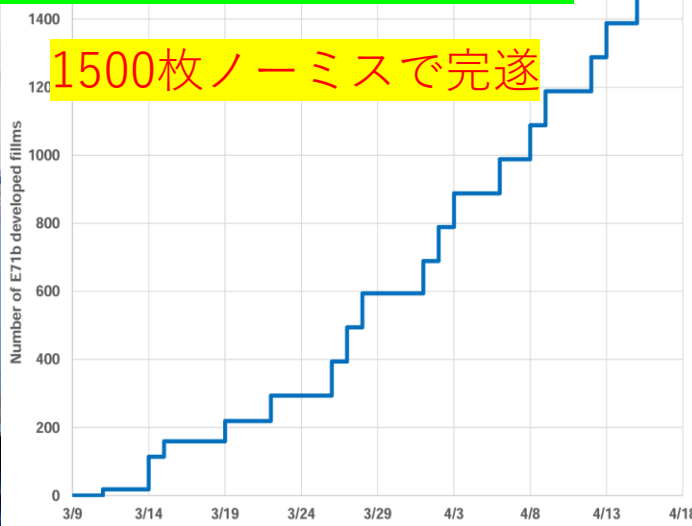
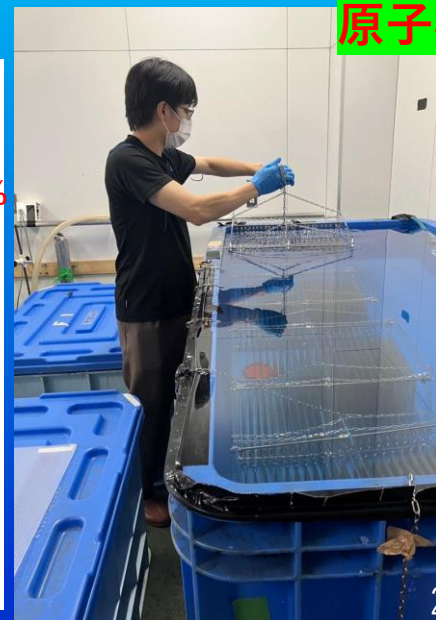


Rolling out Area



Rolling up Area

原子核乾板の大量現像@岐阜大

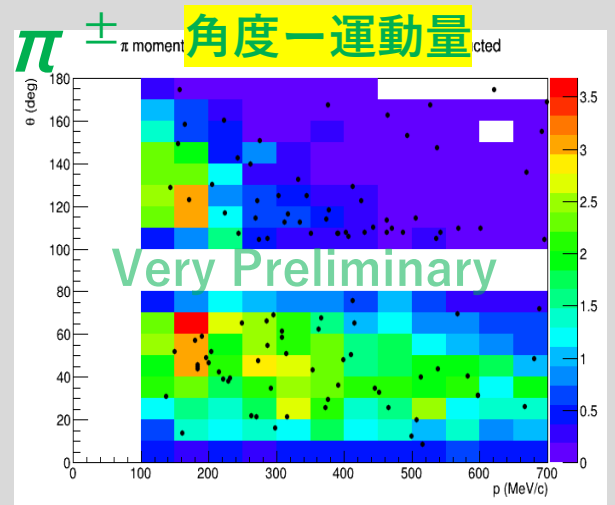
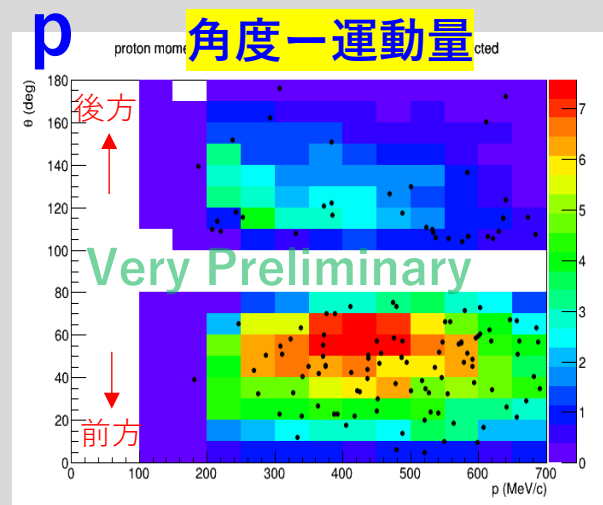
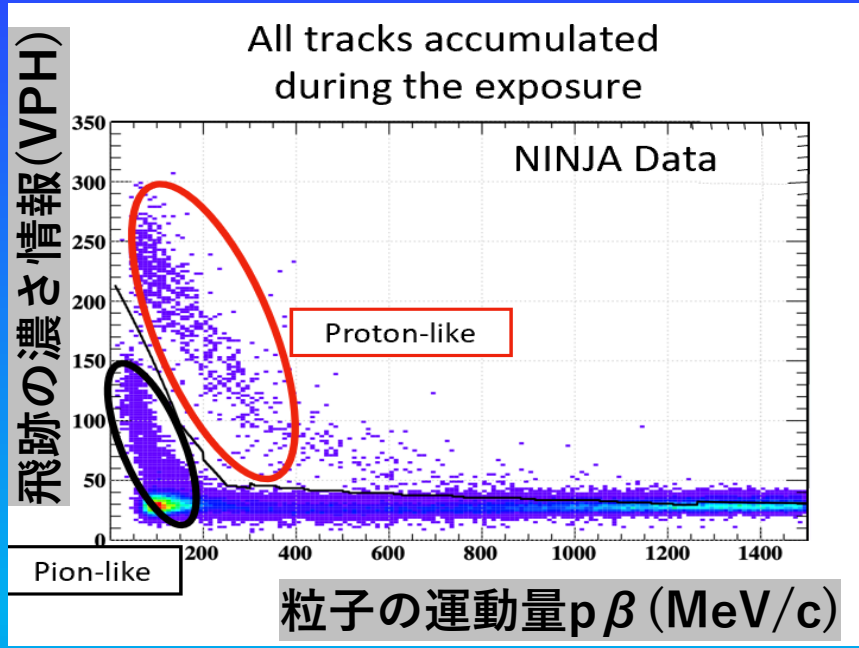
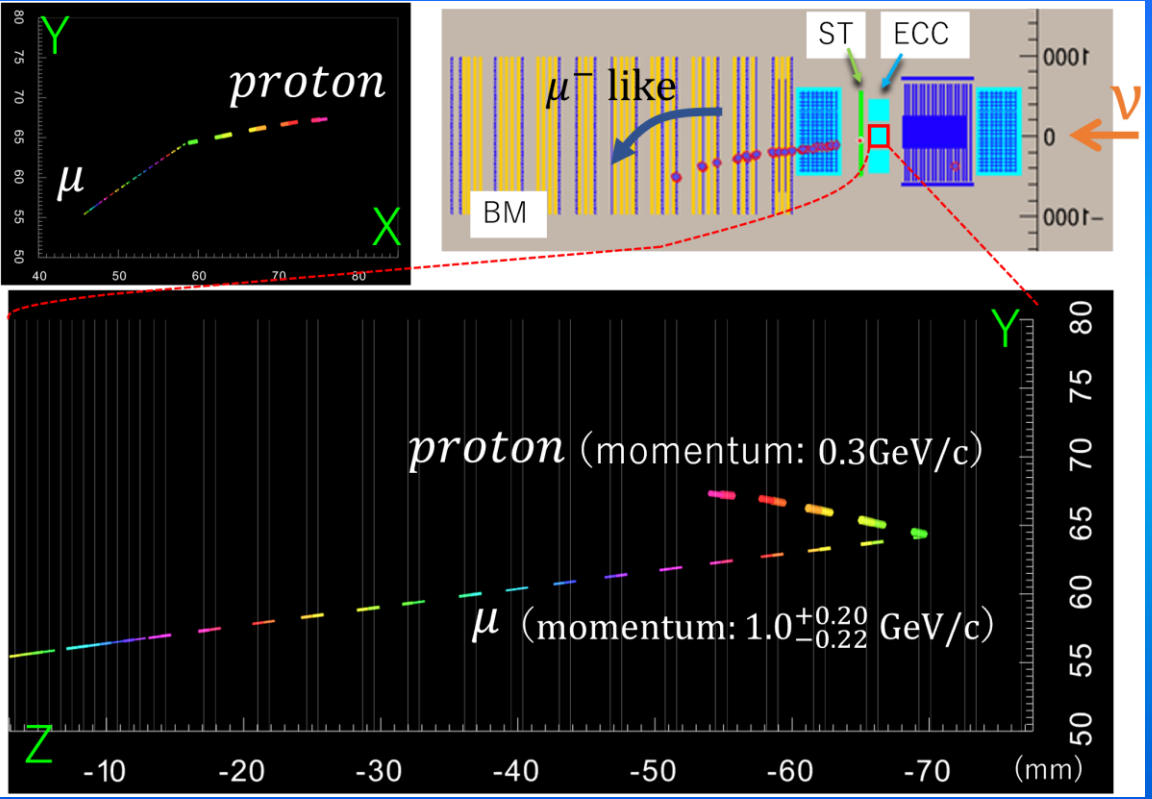


2024 3/9

2024 4/18

P/ π 粒子識別

μ 同定



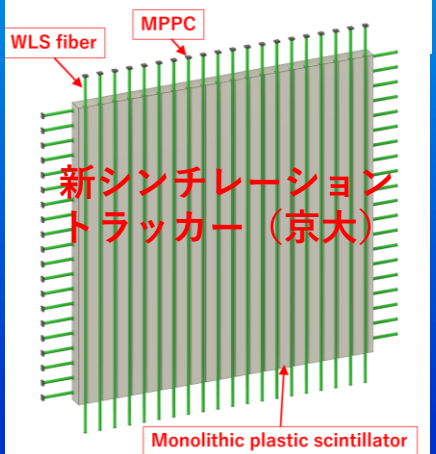
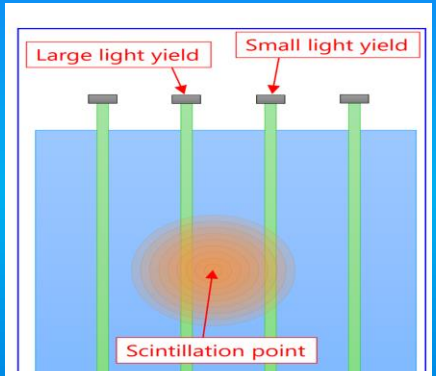
Normalized by # of events

Normalized by # of events

展望

E71c

	Period	POT
1st :E71a	2019-2020	4.8×10^{20}
2nd :E71b	2023-2024	2.9×10^{20}
3rd :E71c	2025 fall-	$> 2.3 \times 10^{20}$



Letter of Intent:
Precise measurement of neutrino interactions and sterile neutrino search with nuclear emulsion detector at J-PARC

S. Aoki^a, D. Barčot^b, T. Fukuda^{c,d}, M. Ghosh^b, S. Han^e, T. Hayakawa^f, Y. Hayasaka^g, Y. Hayato^h, L. Halli^b, Y. Hirobeⁱ, H. Inamoto^j, G. Iwamoto^k, S. Ito^l, C. Jesús-Valls^m, A. Kasumiⁿ, T. Katori^o, T. Kawahara^p, T. Kawanago^q, T. Kikawa^r, B. Kliček^s, H. Kobayashi^t, R. Komatani^u, M. Komatsu^v, T. Matsuo^w, S. Mikado^x, A. Minamoto^y, Y. Morimoto^z, K. Morishima^{aa}, Y. Nakamura^{ab}, T. Nakano^{ac}, T. Nakaya^{ad}, N. Naganawa^{ae}, T. V. Ngo^{af}, S. Ogawa^{ag}, H. Oshima^{ah}, N. Otani^{ai}, H. Rokujo^{aj}, O. Sato^{ak}, T. Sato^{al}, H. Shibuya^{am}, K. Sugimura^{an}, L. Suzuki^{ao}, S. Suzuki^{ap}, M. Suzuki^{aq}, I. Usuda^{ar}, S. Yamamoto^{as}, M. Yoshimoto^{at}

(The NINJA Collaboration)
December 9, 2024

^aKobe University, Kobe 657-8501, Japan
^bCenter of Excellence for Advanced Materials and Sensing Devices, Ruder Bosković Institute, 10000 Zagreb, Croatia
^cNagoya University, Nagoya 464-8602, Japan
^dKyoto University, Kyoto 606-8502, Japan
^eICRR, The University of Tokyo, Kashima 277-8582, Japan
^fYokohama National University, Yokohama 240-8501, Japan
^gKavli IPMU (WPI), The University of Tokyo, Kashima 277-8582, Japan
^hKing's College London, London, WC2R 2LS, UK
ⁱNihon University, Narashino 275-8576, Japan
^jToho University, Funabashi 274-8510, Japan
^kRCNP, Osaka University, Osaka 565-0847, Japan
^lKanagawa University, Yokohama 221-8686, Japan
^mRIKEN, Wako 351-0198, Japan

Abstract
The NINJA experiment stands for Neutrino Interaction research with Nuclear emulsion and J-PARC Accelerator. It aims to conduct precise measurements of neutrino interactions in the Sub-Multi GeV energy range and to search for sterile neutrinos using an emulsion-counter hybrid detector with nuclear emulsion as the main detector and neutrino beams produced by the J-PARC accelerator. This far, the NINJA experiment has conducted proof-of-principle tests, test runs, and physics runs, using nuclear emulsion detectors with water and iron targets to measure neutrino interactions. We are now discussing the physics goals for the next decade and the means to achieve them. This Letter of Intent (LOI) details several proposed objectives based on the results of previous experiments. These include: 1. Precision measurements of neutrino interactions using water-target nuclear emulsion detectors to provide crucial inputs for long-baseline neutrino oscillation experiments such as T2K, HK and ESSνSB, which uses large water Cherenkov detectors. 2. Measurements of neutrino-nucleon interactions using heavy water-target nuclear emulsion detectors, establishing a foundation for calculating all neutrino interactions. 3. Exploration of sterile neutrinos through high-statistics experiments using heavy targets, such as lead. This LOI presents these objectives in detail and outlines how they can be accomplished.

Keywords: NINJA, neutrino, cross-section, sterile neutrino, nuclear emulsion

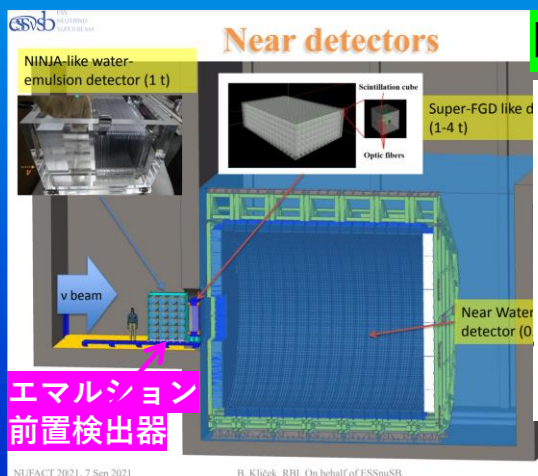
新LOI 昨年12月にJ-PARCに提出

- 水標的実験→HK, ESSνSB
- 重水標的実験
→ニュートリノ-核子研究
- 鉛/鉄標的実験
→電子ν測定/ステライルν

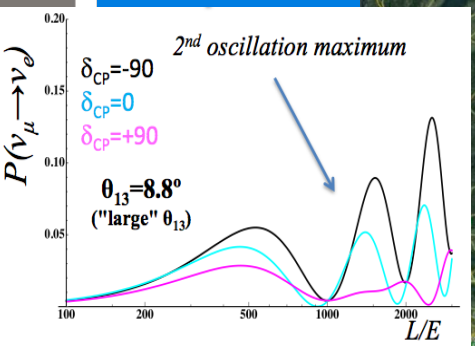
ESSνSB baseline, ESS Neutrino Super Beam Plus

2037~

European Spallation Source



HK後のν振動精密測定



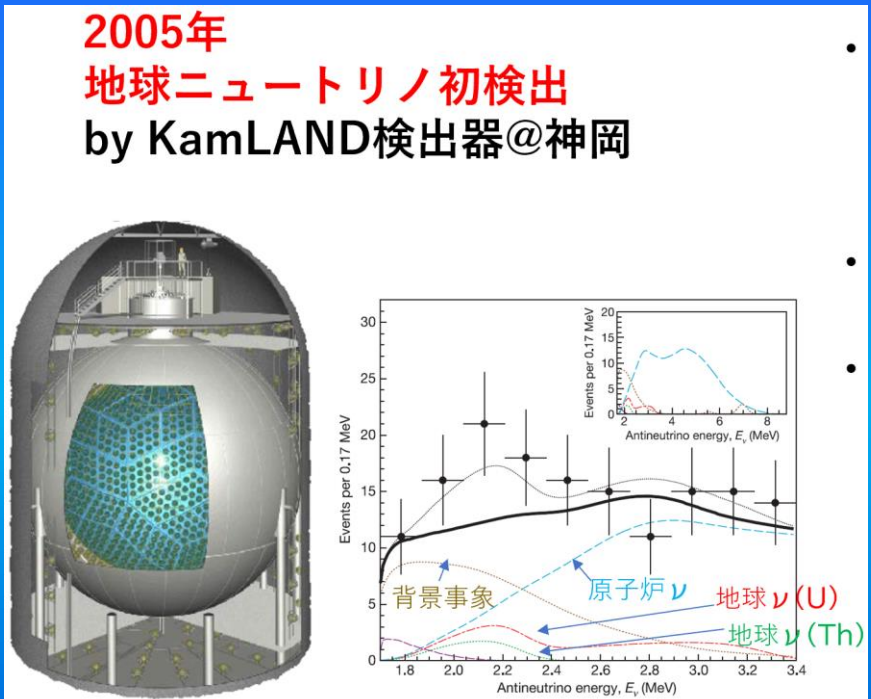
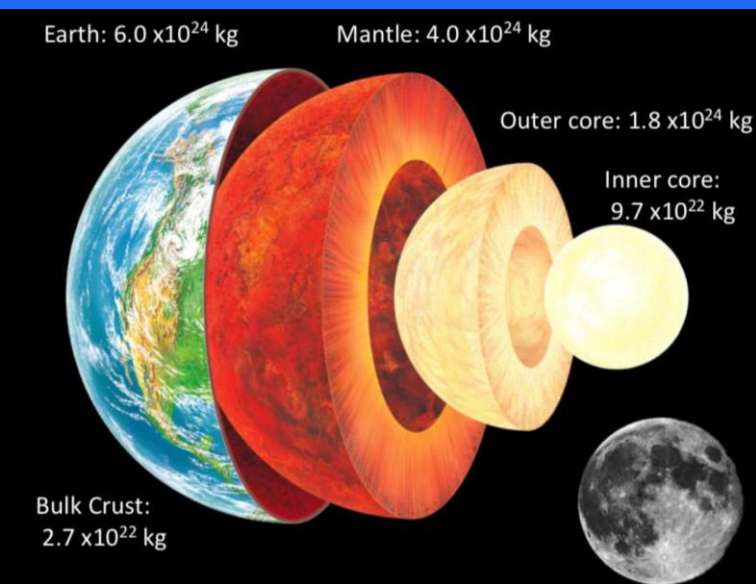
原子核乾板を用いたニュートリノ研究

非加速器実験

地球ニュートリノ精密測定への適用

地球ニュートリノ
→ マントル中の
放射性同位体の存在量の直接測定

・ プレート運動や火山活動をもたらすマントル対流の原動力
・ 地球の形成, 進化の歴史

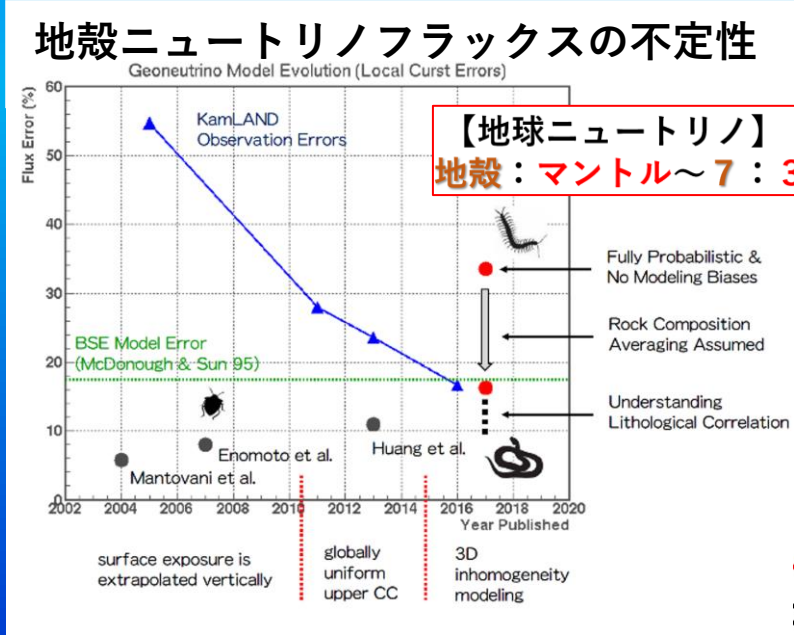


地球ニュートリノ
地球内放射性物質の崩壊によって生じる反電子ニュートリノ ($\bar{\nu}_e$)

主に、
 $^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb} + 8\alpha + 6e^- + 6\bar{\nu}_e + 51.7\text{MeV}$
 $^{232}\text{Th} \rightarrow ^{208}\text{Pb} + 6\alpha + 4e^- + 4\bar{\nu}_e + 42.7\text{MeV}$

α崩壊 β崩壊 地球の熱源

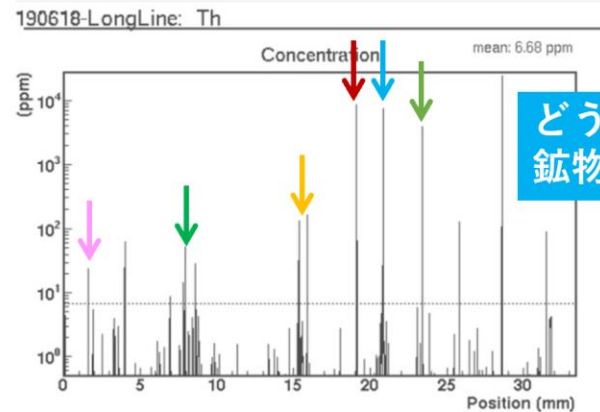
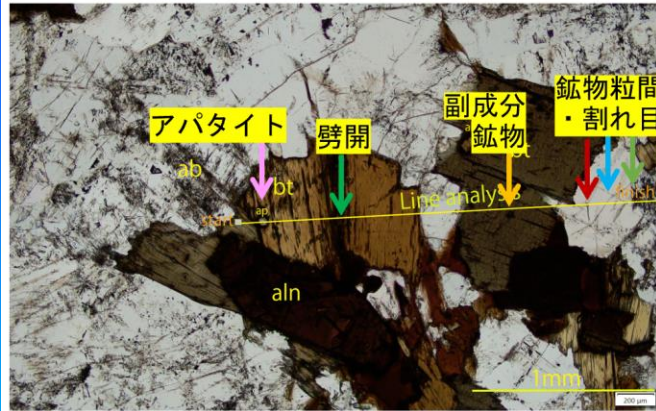
20年以上に渡る観測で、統計精度が向上
地球科学的知見を得られるレベルに到達



地殻ニュートリノのフラックスモデルの不定性が支配的

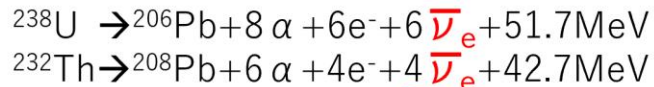
原子核乾板による岩石中の放射性同位体測定

Q: 岩石中のどの鉱物にどれくらい放射性同位体が含まれているか?



どうも鉱物よりも副成分鉱物や 鉱物粒間に濃集しているようだ。

→ 原子核乾板で位置分布測定できないか?

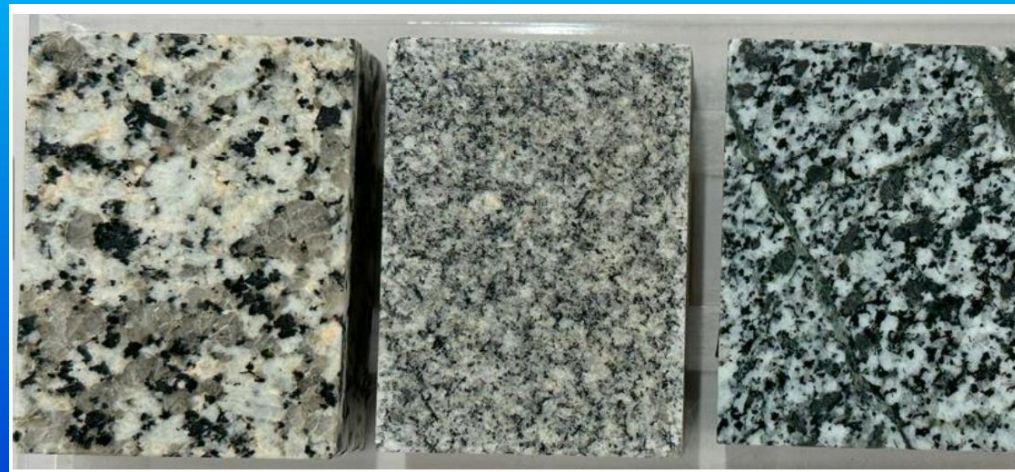


α崩壊 β崩壊

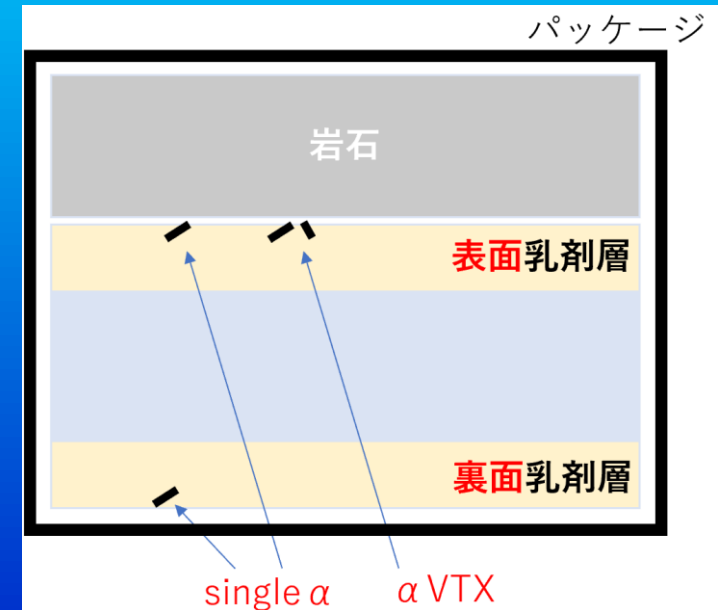
原子核乾板中のα線の飛跡 (α崩壊)



地殻を構成する様々な岩石(花崗岩)の一部



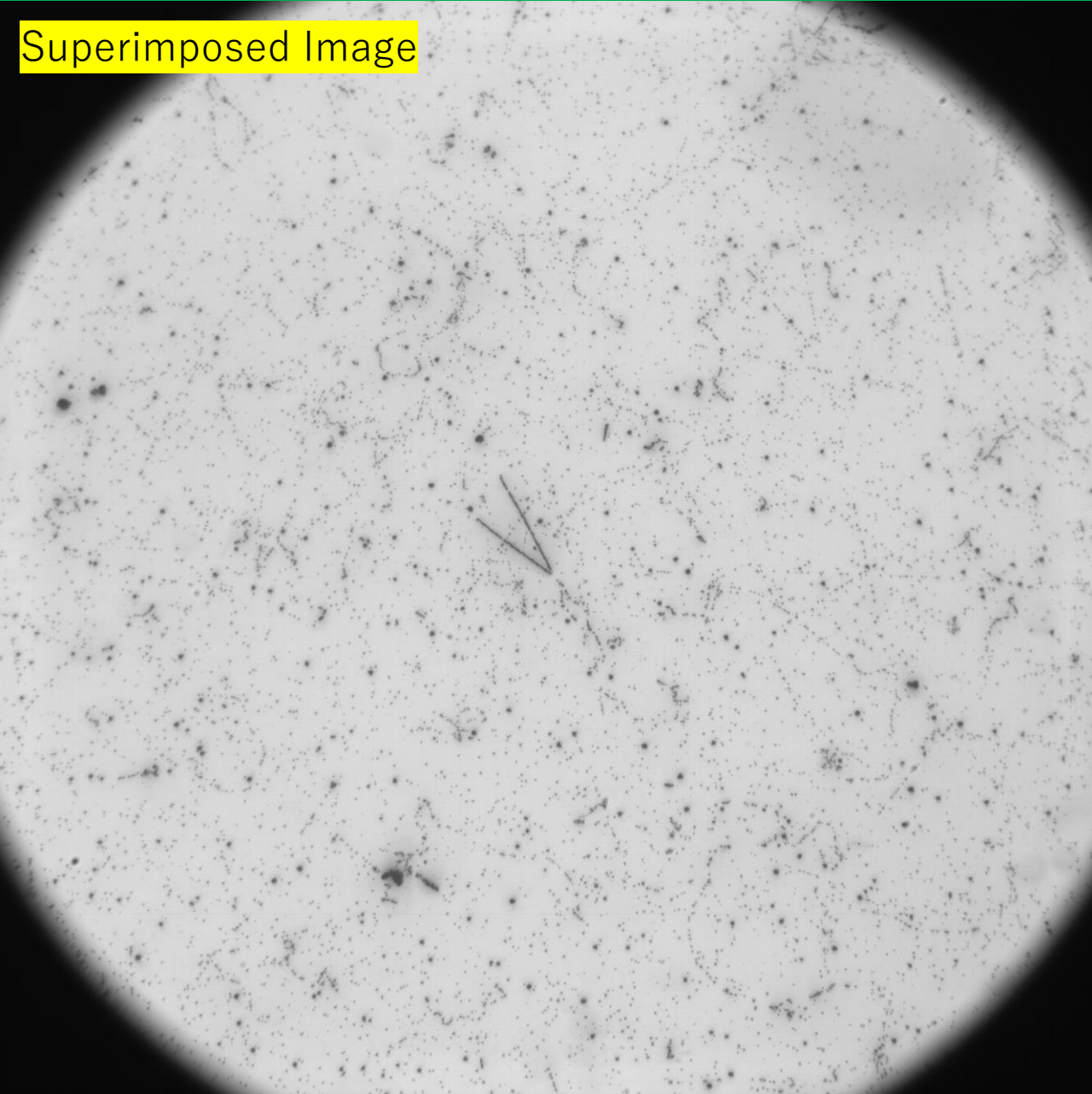
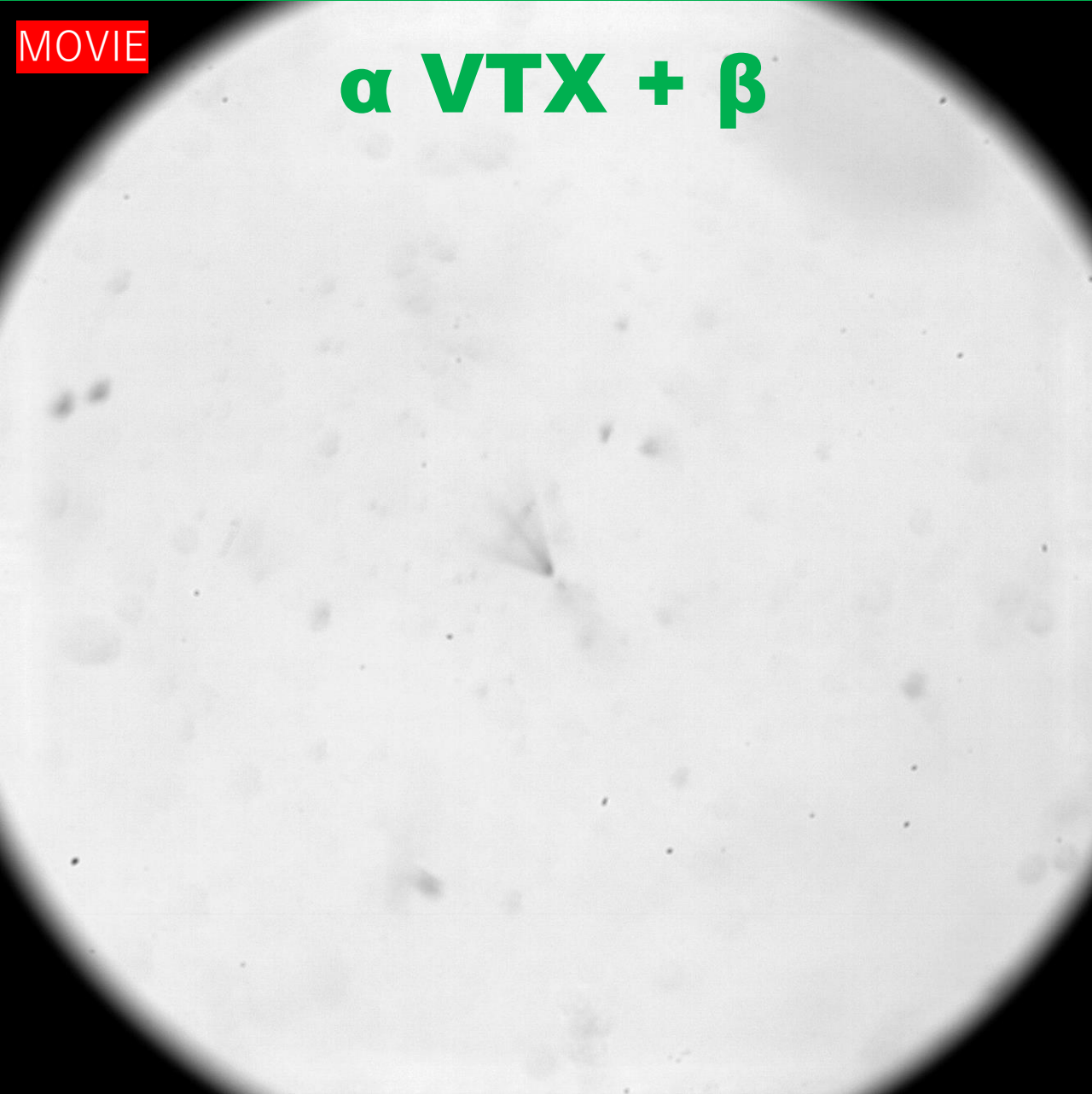
原子核乾板でどれくらい測定できるか?
(6日, 120日測定)



MOVIE

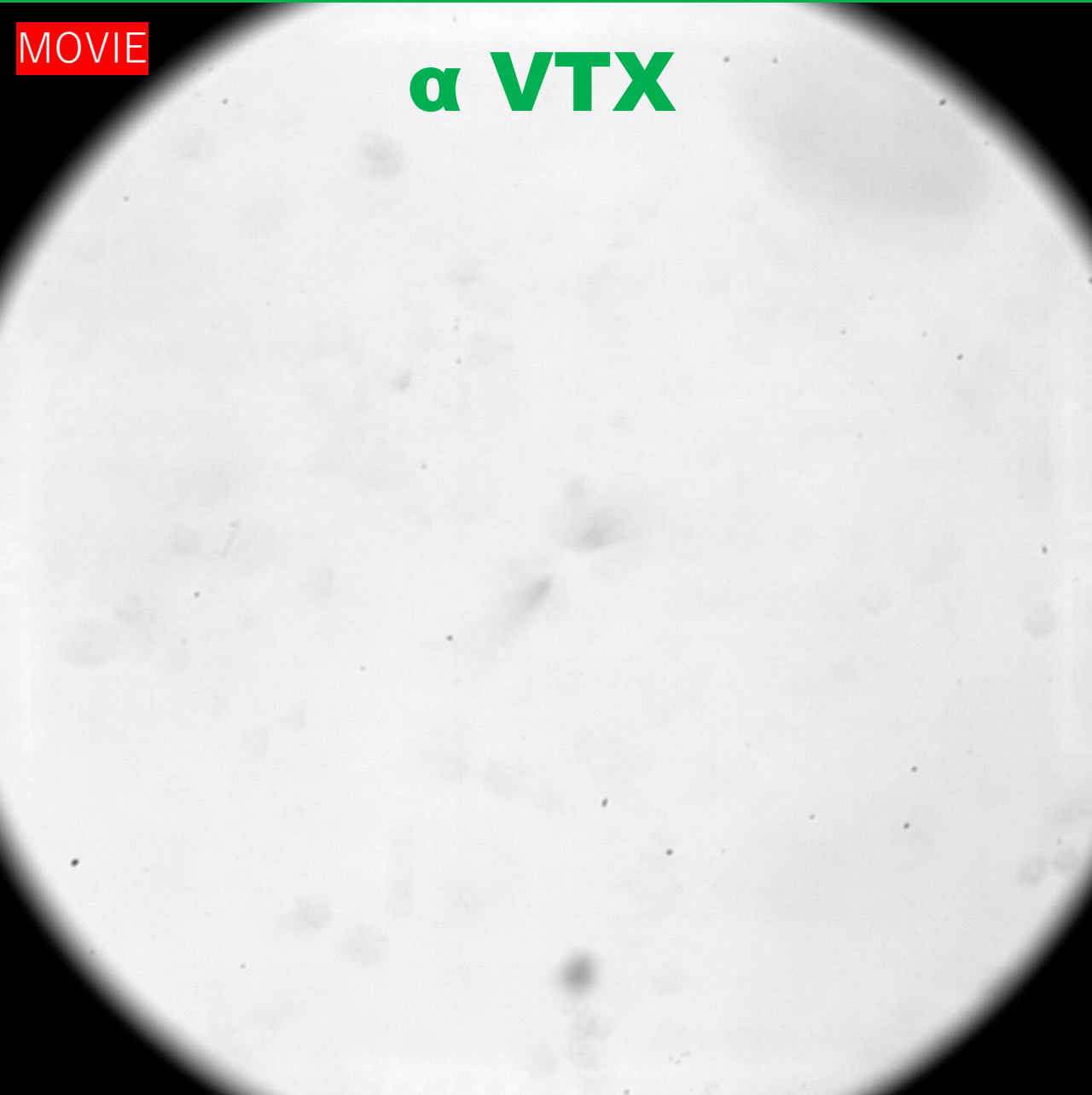
α VTX + β

Superimposed Image

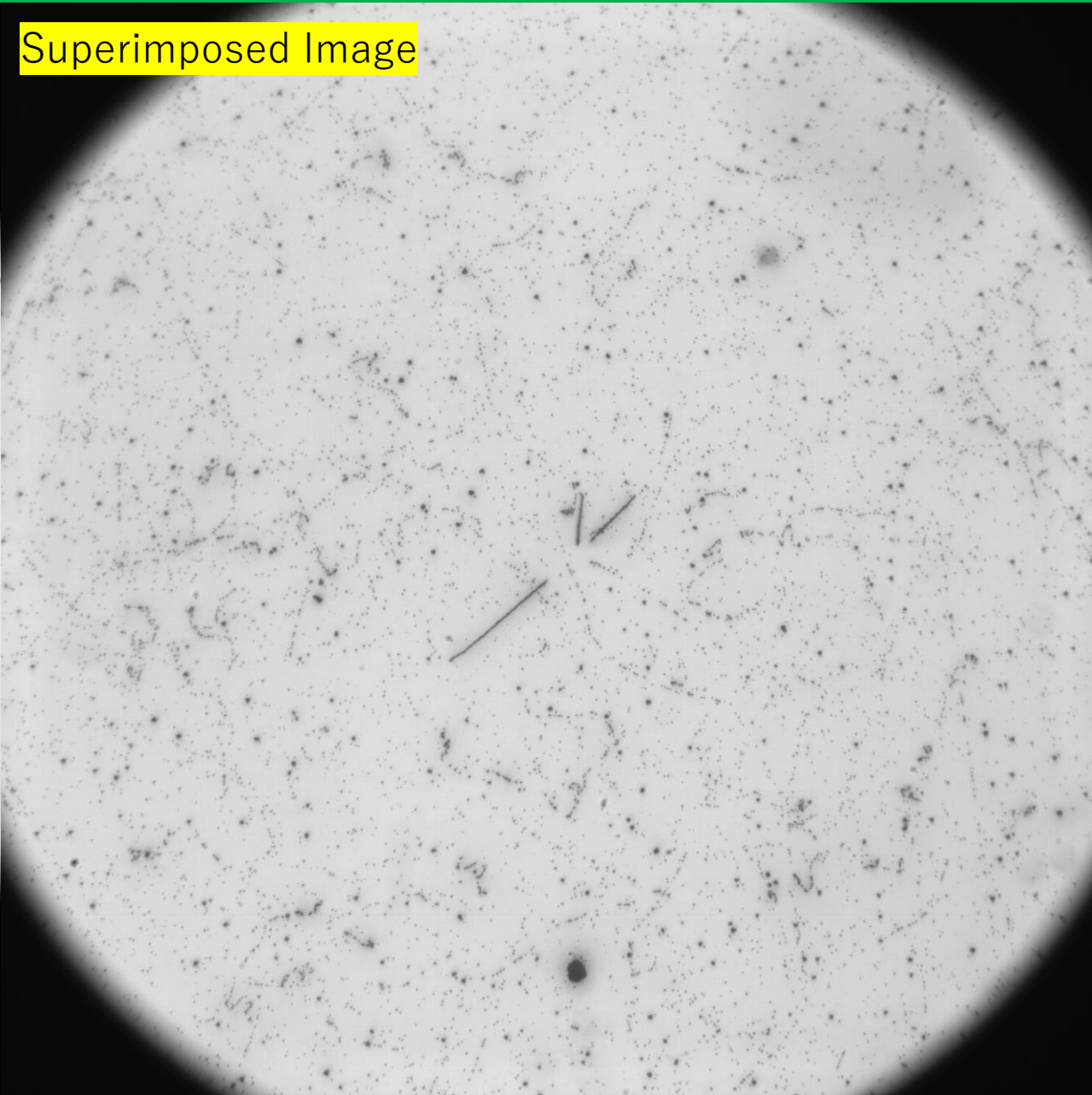


MOVIE

α VTX

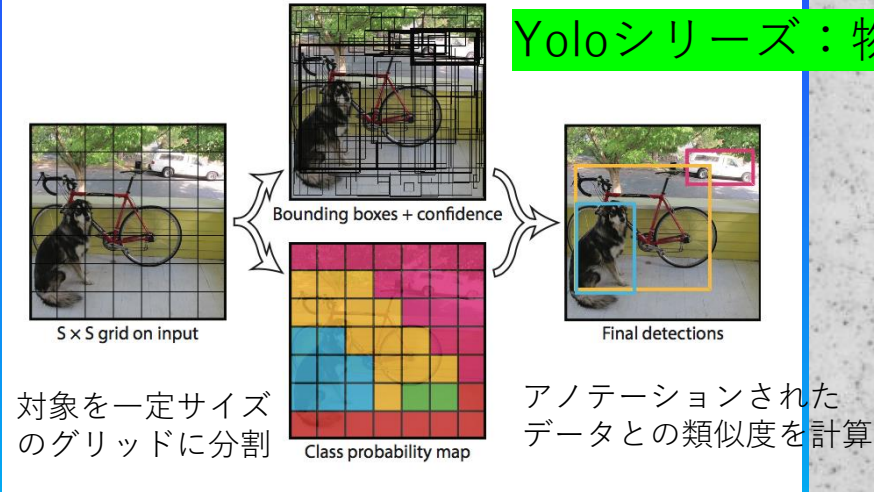


Superimposed Image

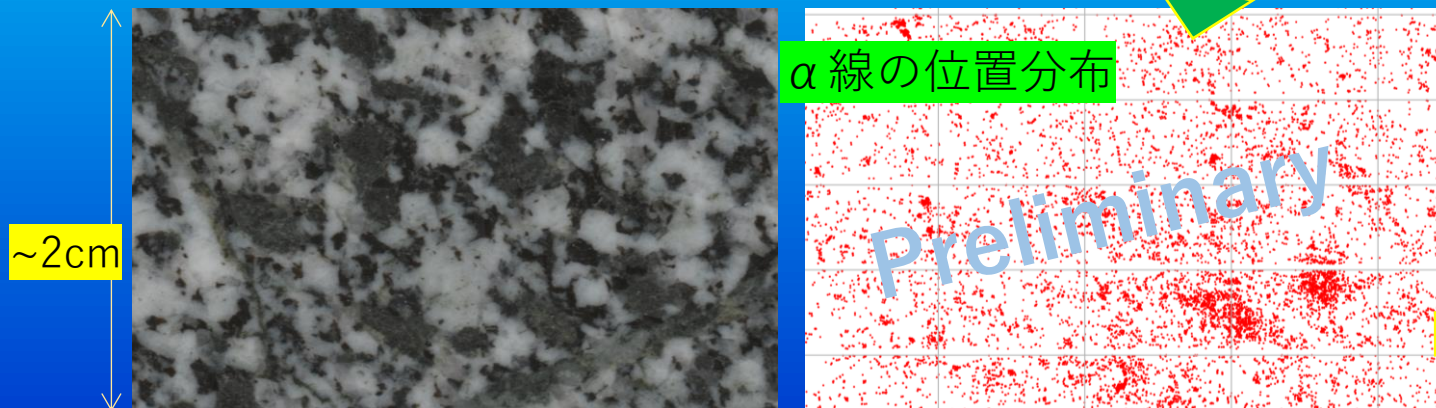


機械学習による α 線飛跡の検出

Yoloシリーズ：物体検出アルゴリズムのひとつ



● 120日サンプルの測定



α 線検出性能の評価・鉱物分布との比較

原子核乾板による地球科学研究

岩石の放射性同位体分布の測定

地殻だけでなく、噴火等で地表に現れたマンタルの岩石研究
→ 地球の形成・進化

隕石・月の岩石の分析

→ 月・星の形成・進化

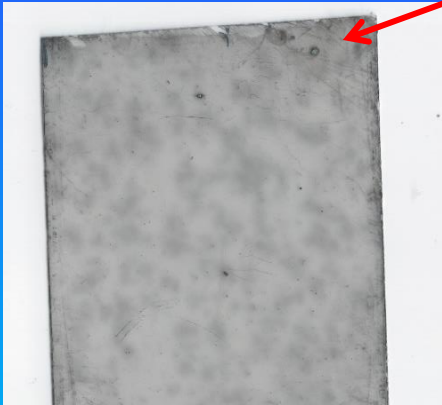
α 線計測に基づく半減期測定

→ 年代測定への利用

岩石学・地球化学・地震波・年代測定
の専門家との学際融合研究を開始！

原子核乾板中の β 線測定

地球惑星科学



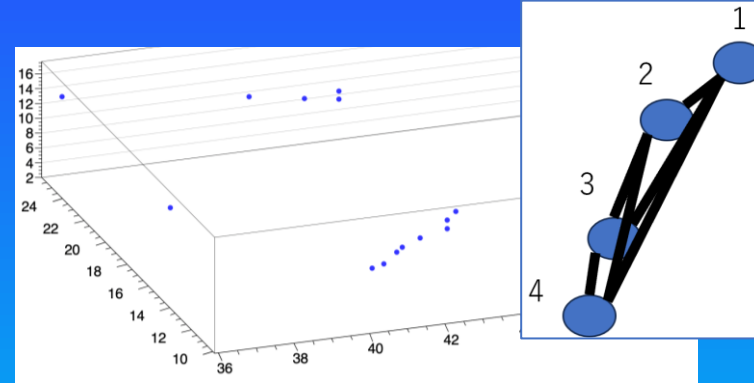
120日岩石サンプルのひとつ

まだら模様が見える
→ β 線
 β 線のみエリアもある
(カリウム起因?)

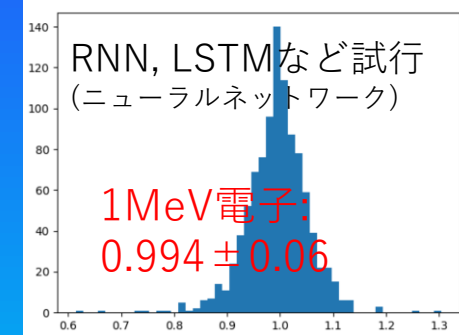
β 線測定も重要な情報になる

β 線検出用アルゴリズム・飛跡測定法の開発

曲線飛跡(β 線)の自動飛跡認識



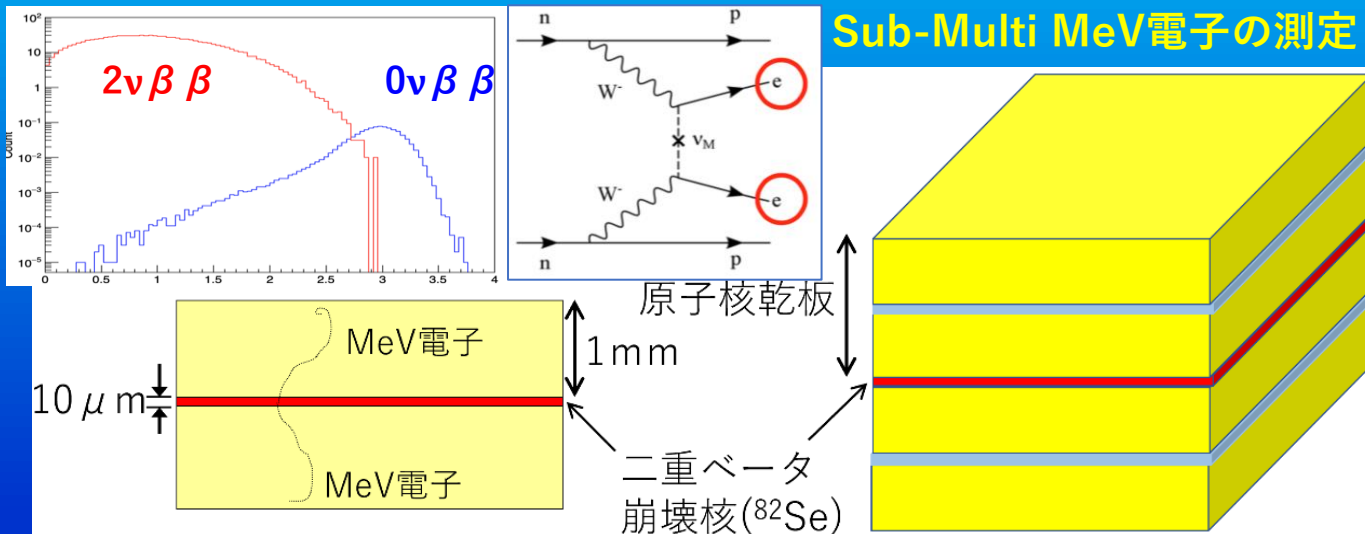
運動量測定：
機械学習の適用



現在のフィルム間接続アルゴリズムを拡張

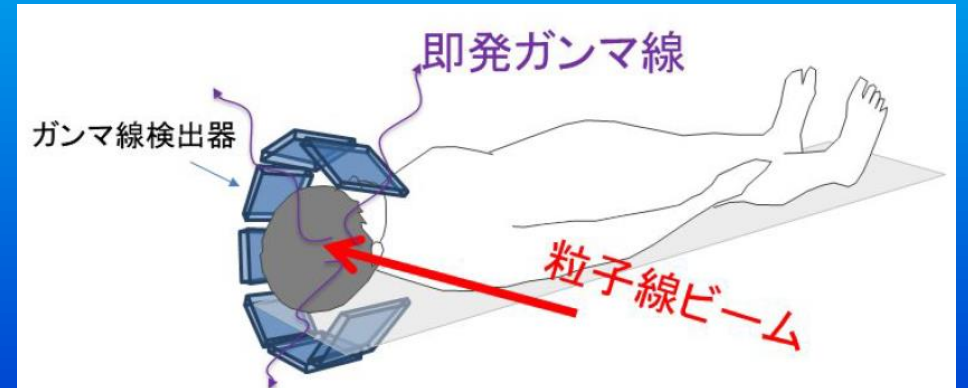
素粒子・宇宙 → $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索

Sub-Multi MeV電子の測定



放射線医療への応用 → FLASH治療

Multi MeVの γ 線 → Sub-Multi MeV電子の測定



即発ガンマ線を使った超高線量率粒子線(FLASH)治療の
治療中モニター・事前シミュレーションの改良

まとめ

- 原子核乾板の技術開発を長年進めてきた。
- 原子核乾板を用いた加速器ニュートリノ実験NINJAを推進中。
- ニュートリノ-原子核反応研究の深化
 - 長基線ニュートリノ振動実験・ステライルニュートリノ探索
- 原子核乾板での α 線・ β 線の測定技術を開発中。
 - 地球ニュートリノ研究
 - 岩石学 → 地球・月などの形成・進化の研究
 - 年代測定学
 - $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索実験
 - 放射線がん治療への応用
- 興味のある方、ぜひ共同研究しましょう。

Back up