

東京都立大学 高エネルギー実験研究室



2022年8月28～30日
ゼミ合宿@那須

高エネルギー実験研究室：構成

スタッフ(2024年4月時点)

- ・教授：角野秀一
- ・助教：汲田哲郎
- ・連携客員教員：足立一郎、西田昌平 ※
- ・客員教員：住吉孝行
- ・客員研究員：今野智之、岩田修一

※ 足立教授と西田准教授は KEK 所属の連携客員教員

大学院生(2024年4月時点)

- ・ D: 0 名
 - ・ M2: 4 名
 - ・ M1: 1 名
- 卒研究生(現在): 3 名

来年度大学院生募集人員: 3 名 ~ 4 名

- 放射線検出器、電子回路、計算機などに興味がある方
- 大規模な実験に興味がある方
- とにかく手を動かしてみるのが好きな方

高エネルギー実験研究室: 活動等

☆ 研究室の活動

- ・研究室ミーティング: 1回 / 週 (研究の進捗状況等の報告)
- ・ゼミ(4年生、M1): 1回 / 週 (相対論的量子力学、特殊相対論、統計処理、検出器)
- ・ミニマム教程: 計算機(C++)、実験、相対論
- ・研究室旅行(熱海、蓼科、那須、箱根、伊豆、秩父、富士、水上、他): 9月頃
- ・日帰りハイキング: 11月頃、日帰りで近郊の山へ
- ・飲み会: 約1回 / 月
料理が好き、お菓子作りに興味がある方も歓迎(求ム)

☆ 都立大物理(高エネ実験、原子物理、宇宙実験)研究室間のイベント

- ・合同花見: 4月
- ・ソフトボール大会: 6月頃

☆ 高エネルギー物理の大学間の活動

- ・高エネルギー物理春の学校(毎回琵琶湖畔): 5月頃
- ・flavor physics workshop(富田林、柏、三浦、新潟、沼津、浜松、他): 10月頃
- ・神無月会: 東京近郊の大学の高エネルギー物理研究室合同のBBQ(10月頃)

☆ 2023年度卒業生(卒研究生:4名、修士課程2年:3名)の進路

- ・卒研究生: 就職3名、修士課程(本研究室)進学1名
- ・修士課程: 企業に就職3名

素粒子標準模型から新物理へ

高精度
(稀な現象)

ニュートリノの物理

- T2K 実験
- DCBA 実験
- HyperK 実験

高輝度電子加速器 (Bの物理)

- BelleII 実験

新物理

本研究室では現在

- Belle II 実験
- T2K 実験
- Hyper K 実験
- DCBA 実験
- ATLAS 実験

を行っている。

標準模型

高エネルギー電子加速器

- ILC 実験
- (将来計画)

主要な素粒子実験をほぼ網羅

	物質粒子			力を伝える粒子	
	第1世代	第2世代	第3世代		
クォーク	u アップ	c チャーム	t トップ	強い力 g グルーオン	
	d ダウン	s ストレンジ	b ボトム		
レプトン	ν_e eニュートリノ	ν_μ μ ニュートリノ	ν_τ τ ニュートリノ	電磁力 γ 光子	
	e 電子	μ ミューオン	τ タウ		
				弱い力 W⁺ W⁻ Wボソン	
				Z Zボソン	
	ヒッグス場に伴う粒子			H ヒッグス粒子	

高エネルギーハドロン加速器

- LHC ATLAS 実験

高エネルギー

「物理学70の不思議」

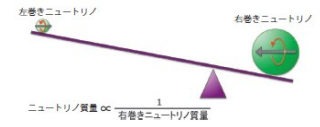
<https://www.jps.or.jp/books/gakkaishi/70wonders.php>

06 ニュートリノはなぜこんなに軽いのか？

ニュートリノは素粒子の一種である。1930年にパウリ(W. Pauli)が存在を理論的に予想してから80年以上、1956年にライネス(F. Reines)とカワン(C. Cowan)がはじめて実験で検出してから60年が過ぎたが、いまだに素性がよくわかっていない。

質量は素粒子の基本物理量の1つであるにもかかわらず、ニュートリノではその測定にまだ成功していない。ただし、ニュートリノ振動の発見から、その値は非常に小さいものの0ではないことはわかっていて、また宇宙の大規模構造におけるゆらぎの観測から、3種のニュートリノの質量の和は約0.23 eV以下と考えられている。この質量は、ほかの素粒子に比べてあまりに軽すぎる(ニュートリノ以外で最も軽い電子の100万分の1以下)。なぜニュートリノはこんなに軽いのだろうか？

すべての素粒子にはその反粒子が存在する。ニュートリノと反ニュートリノが別の粒子だとすれば、ニュートリノの質量もほかのすべての素粒子と起源は同じ(ディラック質量)であり、ニュートリノだけが特異的に軽いのは不自然である。一方、ニュートリノと反ニュートリノが同じ粒子の場合(マヨラナ粒子:39参照)、「右巻きニュートリノ」



は極めて重いマヨラナ質量をもつことができ、「シーソー機構」(図)とよばれる質量固有値の反比例関係を通して、我々の世界を飛び交っているニュートリノの質量を特異的に小さくすることができる。

さらにおもしろいことに、この極めて重い右巻きマヨラナニュートリノは、物質粒子への崩壊と反物質粒子への崩壊の確率が異なる可能性がある。初期宇宙における右巻きマヨラナニュートリノの生成と崩壊によって、我々の住むこの宇宙の「物質優勢の謎」が説明できるかもしれない。「ニュートリノはなぜ軽い?」という問いは、この素粒子物理学最大の謎に迫る糸口なのである。

* ビッグバンによって物質と厳密に同じ分量だけ生成されたはずの反物質は、どこに消えたのか。09参照。

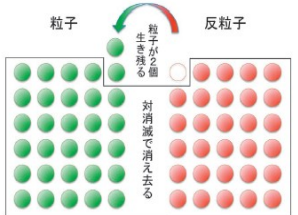
DCBA 実験

09 なぜ我々は物質だけからできているのか？

我々の世界は素粒子からできている。素粒子には「反粒子」という、質量はまったく同じで性質がまったく逆、という相棒が存在する。たとえば最も身近な素粒子である電子には、「陽電子」という反粒子が存在する。粒子と反粒子は電荷などの性質がまったく反対なので、出会うと正と負が打ち消し合って消滅し、エネルギーの塊になってしまう。逆にエネルギーを狭い空間に集中させると、粒子と反粒子の対をつくり出すことができる。

宇宙のはじまりであるビッグバンにおいても、巨大なエネルギーの塊から粒子と反粒子が生み出された。粒子と反粒子は必ず対になってつくられるので、宇宙に粒子が創成されたとき、粒子と反粒子、すなわち物質と反物質は厳密に同じ分量だけつくられた。だが現在の宇宙には、見わたる限り物質しかない。反物質はいったどこに消えたのだろうか？

ビッグバン以降の宇宙の進化において反物質が消えてなくなる条件は、「サハロフの3条件」として知られている。すなわち(1)バリオン数の非保存、(2)CPの非保存、(3)熱平衡の破れの3つである。このうちバリオン数を保存しない反応があること、宇宙の進化において熱平衡がない



状態があったことはわかっている。CP非保存の過程とは、図の矢印のように、反粒子と粒子の数のバランスを崩す過程である。この過程により粒子の数が反粒子よりわずかに多くなり、反粒子がすべて対消滅で消え去った後、わずかながら粒子が残ることになる。この過程があることもわかっているが、その大きさが小さすぎて現在の宇宙の物質質量を説明できていない。未発見の新たなCP非保存の過程を探る、熾烈な競争がくり広げられている。

日本物理学会創立70周年記念企画

物理学70の不思議

14. 原子核の形 15. 電子GCD 16. 素粒子の世代 17. 素粒子の統一 18. 量子コンピュータ
 19. フォトメトリック 20. 素粒子の検出 21. 素粒子の加速 22. 素粒子の衝突 23. 素粒子の相互作用
 24. 素粒子の質量 25. 素粒子の寿命 26. 素粒子の生成 27. 素粒子の崩壊 28. 素粒子の検出
 29. 素粒子の相互作用 30. 素粒子の検出 31. 素粒子の検出 32. 素粒子の検出
 33. 素粒子の検出 34. 素粒子の検出 35. 素粒子の検出 36. 素粒子の検出
 37. 素粒子の検出 38. 素粒子の検出 39. 素粒子の検出 40. 素粒子の検出
 41. 素粒子の検出 42. 素粒子の検出 43. 素粒子の検出 44. 素粒子の検出
 45. 素粒子の検出 46. 素粒子の検出 47. 素粒子の検出 48. 素粒子の検出
 49. 素粒子の検出 50. 素粒子の検出 51. 素粒子の検出 52. 素粒子の検出
 53. 素粒子の検出 54. 素粒子の検出 55. 素粒子の検出 56. 素粒子の検出
 57. 素粒子の検出 58. 素粒子の検出 59. 素粒子の検出 60. 素粒子の検出
 61. 素粒子の検出 62. 素粒子の検出 63. 素粒子の検出 64. 素粒子の検出
 65. 素粒子の検出 66. 素粒子の検出 67. 素粒子の検出 68. 素粒子の検出
 69. 素粒子の検出 70. 素粒子の検出 71. 素粒子の検出 72. 素粒子の検出
 73. 素粒子の検出 74. 素粒子の検出 75. 素粒子の検出 76. 素粒子の検出
 77. 素粒子の検出 78. 素粒子の検出 79. 素粒子の検出 80. 素粒子の検出
 81. 素粒子の検出 82. 素粒子の検出 83. 素粒子の検出 84. 素粒子の検出
 85. 素粒子の検出 86. 素粒子の検出 87. 素粒子の検出 88. 素粒子の検出
 89. 素粒子の検出 90. 素粒子の検出 91. 素粒子の検出 92. 素粒子の検出
 93. 素粒子の検出 94. 素粒子の検出 95. 素粒子の検出 96. 素粒子の検出
 97. 素粒子の検出 98. 素粒子の検出 99. 素粒子の検出 100. 素粒子の検出

※ 互いに密接に関係
→ 明記していない実験にも
関係がある

07 なぜ暗黒物質ははまだ見つからないのか

近年における宇宙観測の発展の結果、我々の宇宙に通常の方法では検出にからない物質、いわゆる暗黒物質が存在することが確定的となった。では、その正体は何であろうか？ これまで確認されている素粒子や、それらが構成する物質は、暗黒物質にはならないことがわかっている。その正体をめぐる謎は宇宙の暗黒物質問題とよばれ、物理学における最重要問題の1つとなっている。



暗黒物質の正体については、さまざまな仮説が提案されている。有力なのは、暗黒物質は質量が陽子の100倍程度の中性で安定な新しい素粒子とする、WIMP (Weakly Interacting Massive Particle) 仮説である。この仮説は、素粒子標準模型を超える物理と深く関係する可能性を示し、また標準模型の素粒子とある程度の強さで相互作用をすることも保証する。そのため、理論と実験の両面で強く支持され、現在その検証が世界中で行われている。

WIMPの探索は図のように、高エネルギー粒子衝突で暗黒物質をつくり出す加速器探索、我々の周囲に漂う暗黒物質を地下の検出器でとらえる直接探索、銀河系や近傍銀河などにいる暗黒物質が、対消滅の際に生成する高エネルギー粒子線(反陽子やガンマ線)をとらえる間接探索の3

本柱を軸に行われている。これらの実験の検出感度は上がっているが、いまだWIMPの検出にはいたっていない。この事実は何を意味するのだろうか？ 実験の感度が上がれば、いずれ発見される可能性は十分にある。これまでの高感度探索は、特定の素粒子(クォーク、グルーオンやヒッグス粒子)との相互作用に依存する傾向があった。ほかの素粒子との相互作用に感度がある実験(電子-陽電子加速器など)の推進や、特定の相互作用によらず幅広くシグナルが期待できる間接探索の高感度化が重要となる。あるいは、暗黒物質はWIMPではない可能性もある。その場合、どのような候補がありうるのか、背後にどのような物理が考えられるのか、そしてどのように検証すればいいのか、新しいアイデアに基づく再考が必要となるだろう。

LHC ATLAS, Belle II 実験

11 ヒッグス粒子の背後にある物理は何か？

2012年のヒッグス粒子の発見は記憶に新しい。素粒子の標準模型では、物質を構成する粒子と力を伝える粒子により、我々の宇宙を記述する。力の伝わり方は理論の対称性が支配しており、たとえば電磁気力は位相変換の対称性に基づく。このような理論体系において、力を伝える粒子は質量をもたない。実際、電磁気力は遠隔力であり、力を伝える光子には質量がない。一方、自然界には短距離のみで働く弱い力があり、こちらは質量をもつ粒子が力を伝えると解釈するとよく記述される。しかし、そのような粒子は理論の予言能力を壊すことが知られていた。そこで、理論と無矛盾な質量を実現するために導入された粒子がヒッグス粒子である。光子は超伝導物質中であたかも質量をもつかのようにふるまうが、同様に、我々の宇宙が超伝導相に移行したため、弱い力を伝える粒子に見かけ上の質量が生じたと考えられるのである。ヒッグス粒子はこの相転移の引き金を握る。標準模型では、宇宙が超伝導相に移ることで、それまで同一の対称性で記述されていた力を伝える粒子群が、質量をもたない光子と、質量をもつ弱い力を伝える粒子に分化する。この相転移を「対称性の破れ」とよぶ。これによって、異なる2つの力が統一に理解されたのである。

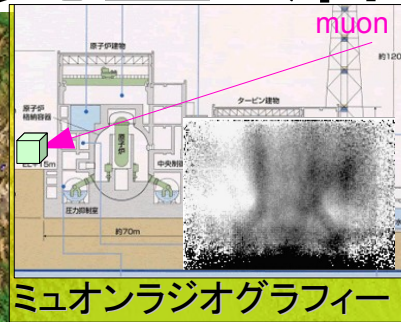


それではなぜ対称性は破れたのであろうか？ 標準模型の枠内では、対称性の破れの起源は明らかにされていない。そこで、「自然に」対称性が破れる新しい物理模型が盛んに議論されている。たとえば、高次補正によって常伝導相が不安定となり、自発的(力学的)に超伝導相に移る可能性が考察されている。超対称性(フェルミ粒子とボース粒子を入れかえる対称性)をもつ標準模型や、ゲージ・ヒッグス統合余剰次元模型(力を伝える粒子の余剰次元成分としてヒッグス粒子が現れる)、複合ヒッグス模型(ヒッグス粒子を、より基本的な粒子からなる複合粒子と考える)などがその候補である。標準模型を超えたこれらの新物理模型は、それぞれ新粒子を予言する。したがって、今後のLHC実験やILC計画などによる新粒子の発見や、ヒッグス粒子の精密測定による新物理の検証が期待される。

Belle(II) 実験、T2K 実験

Belle II 実験、ATLAS 実験

高エネルギー実験研究室：活動の場



T2K: ニュートリノ振動実験
HyperK: ニュートリノ実験、核子崩壊実験
Belle II: 電子・陽電子衝突型加速器実験
DCBA: 二重ベータ崩壊実験
UNI: ポジトロニウム実験
ミュオンラジオグラフィ: 宇宙線を用いた原子炉・火山などの透視
LHC ATLAS: 最高エネルギー陽子・陽子衝突型加速器実験
UNIを除き、他大学・国内外研究機関との共同実験



Belle II実験

3世代のクォークの混合を表すユニタリ行列
(カビボ・小林・益川行列)

$$V = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix}$$

物質粒子			反物質粒子			
	第1世代	第2世代	第3世代	第1世代	第2世代	第3世代
クォーク	アップ	チャーム	トップ	反アップ	反チャーム	反トップ
	ダウン	ストレンジ	ボトム	反ダウン	反ストレンジ	反ボトム
レプトン	電子	負ミューオン	負タウ	陽電子	正ミューオン	正タウ
	ニュートリノ	ニュートリノ	ニュートリノ	反ニュートリノ	反ニュートリノ	反ニュートリノ

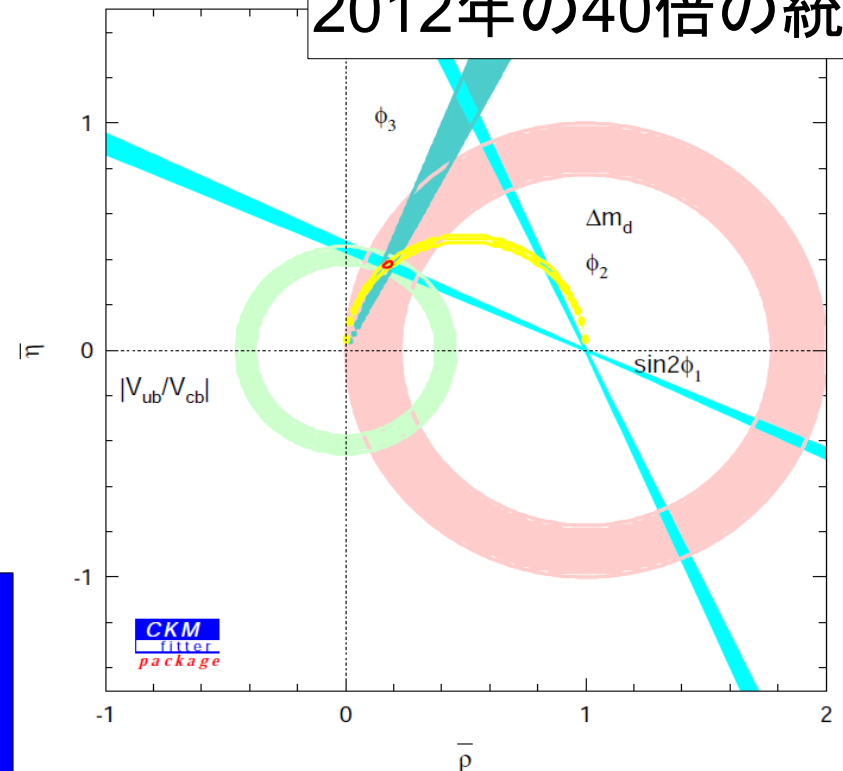
3x3 ユニタリ行列は一つの複素位相を持つ→CP対称性の破れ

- ユニタリティ条件($VV^+=1$)の一つを三角形として記述
- 三角形の辺の長さや角度を複数の方法で精密測定

三角形が閉じているか?
閉じている→3世代クォークの混合
閉じていない→新物理が関与

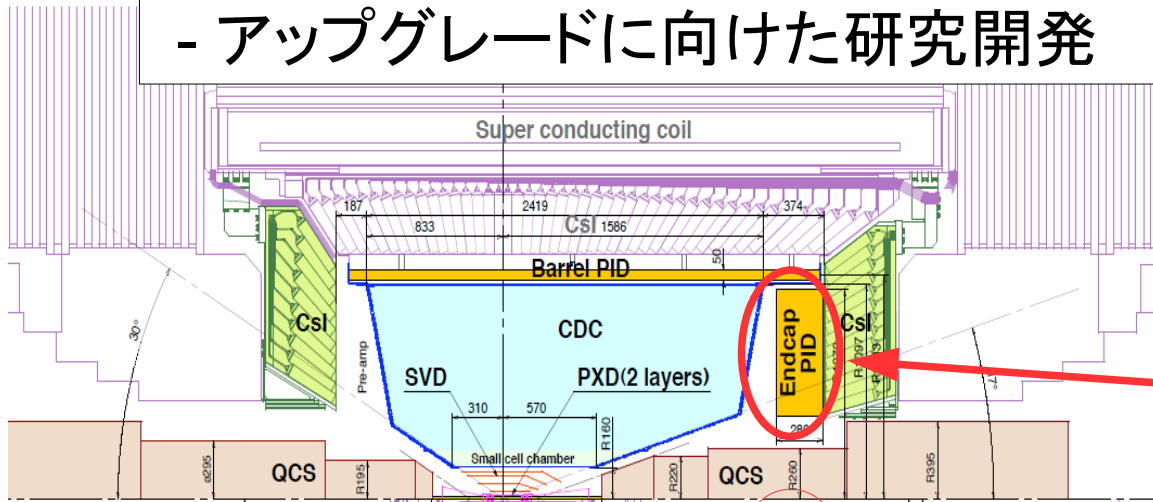
ユニタリティ三角形の精密測定により
新しい物理を探索し、
さらにそのフレーバー構造を探る

2012年の40倍の統計

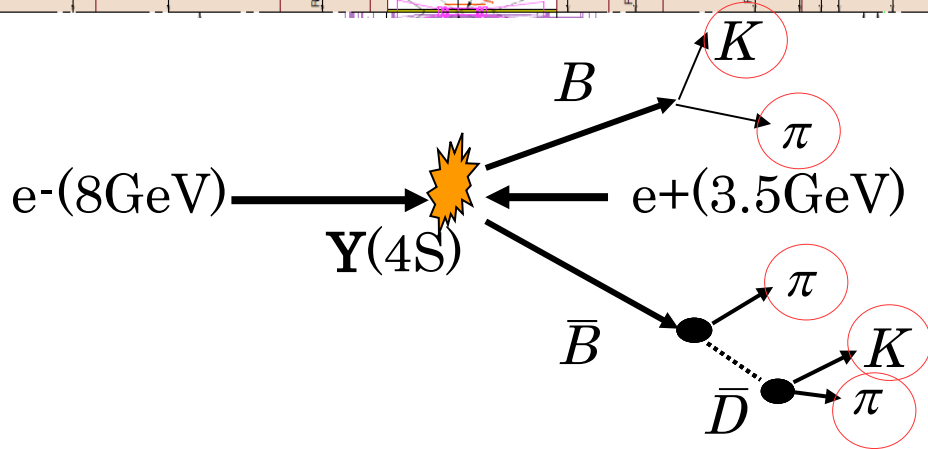
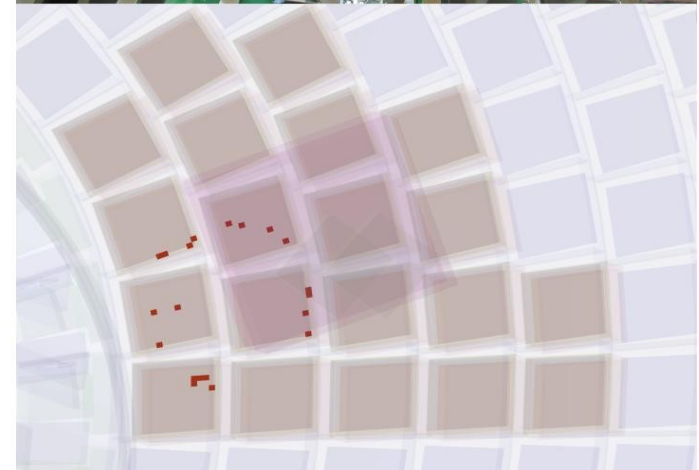
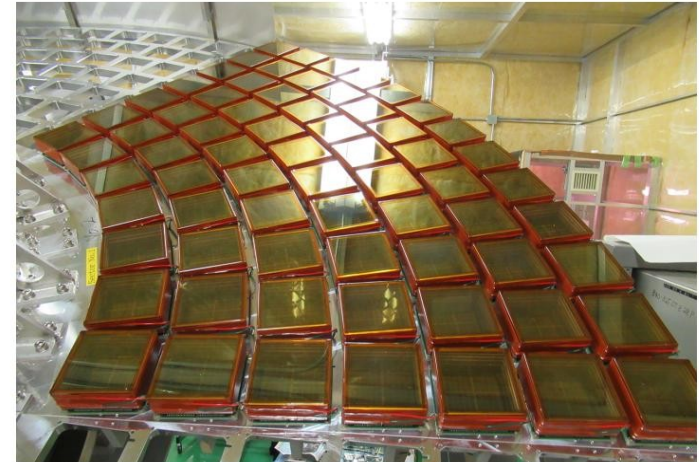


Belle II 検出器の開発

- 都立大では、Belle II 検出器の粒子識別装置(ARICH)を担当
- Belle II 実験でのARICH 検出器の運用
 - アップグレードに向けた研究開発



ARICH検出器(の一部)

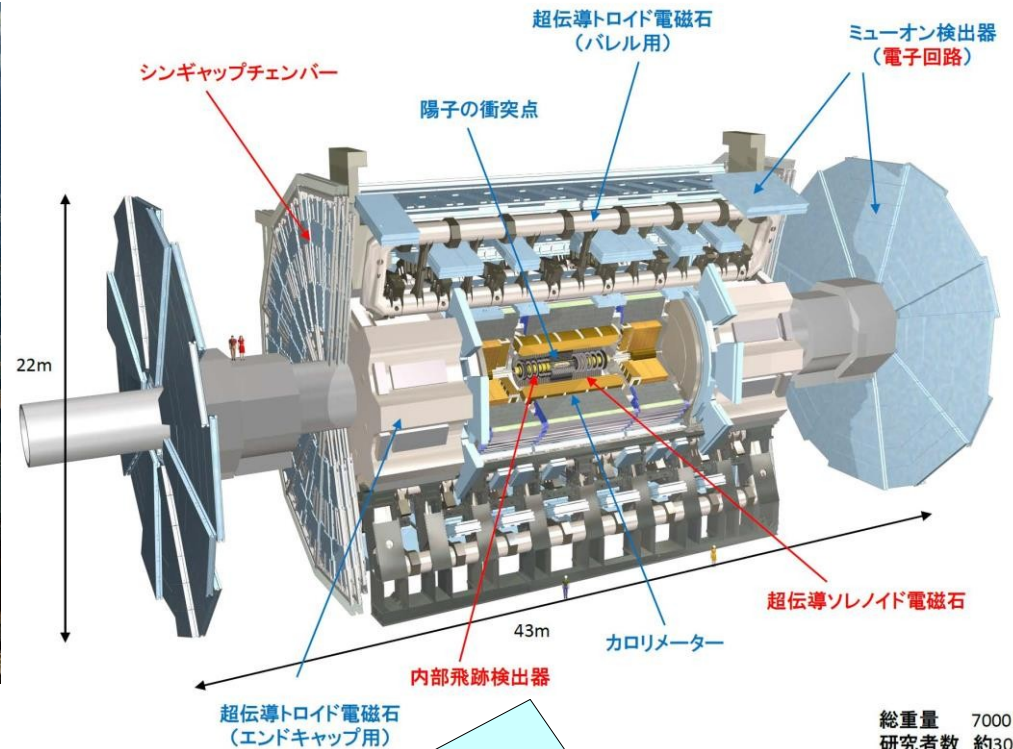


終状態のK, π 中間子を精度よく同定し、
B中間子の崩壊事象を効率的に再構成

実際のチェレンコフ光のリング

LHC ATLAS 実験

- 世界最高エネルギーの衝突型加速器実験
(エネルギーフロンティアの実験)
- 「TeV 領域」で標準模型を超える新しい物理を探索



赤は日本の分担部を示す

総重量 7000トン
研究者数 約3000人
参加国 38

都立大では内部飛跡検出器のアップグレードに参加

LHC ATLAS 実験の研究内容

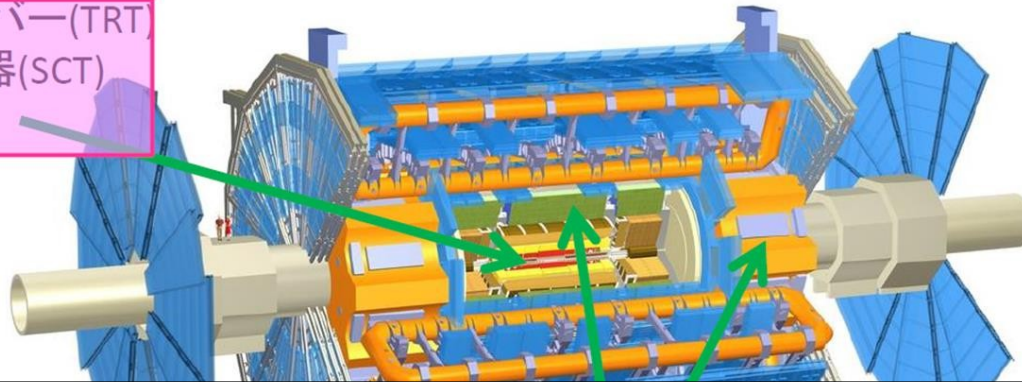
都立大では、新しいピクセル検出器の組み立てに関する研究開発に参加

内部飛跡検出器

ストローチューブチェンバー(TRT)
シリコンストリップ検出器(SCT)
ピクセル検出器(Pixel)

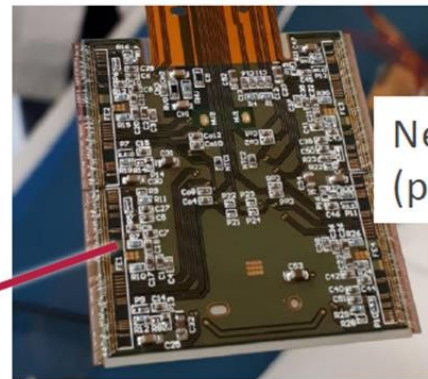
総入れ替え！
すべてシリコン検出器

パイルアップとの区別！

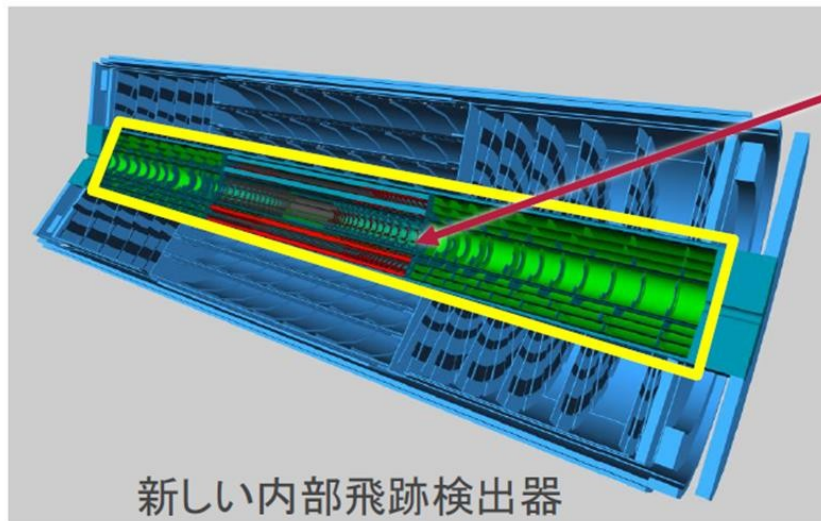


HL-LHCに向けた新しいピクセル検出器

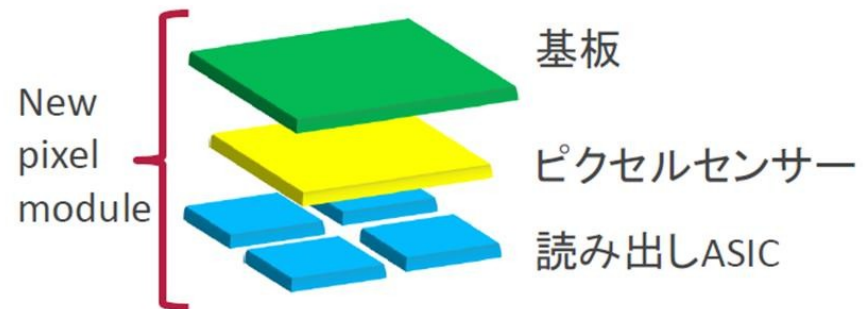
- 約8,000個のピクセルモジュールから構成



New pixel module
(prototype)



新しい内部飛跡検出器



新しいピクセルモジュール

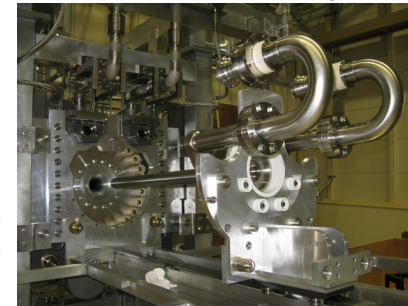
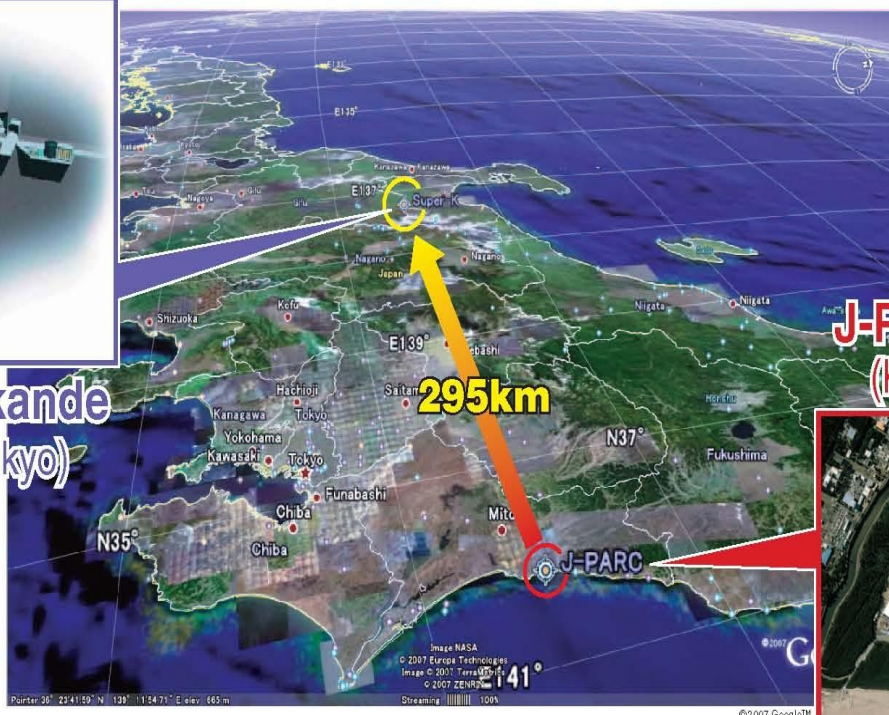
T2K実験、ハイパーカミオカンデ実験

T2K 実験: 加速器を用いたニュートリノ振動実験

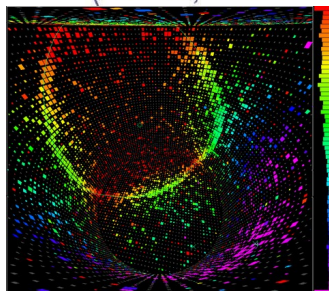
- J-PARC 加速器 (茨城県東海村) を用いてミュ-ニュートリノビームを生成
- 約 300km 地中を走り、スーパーカミオカンデ (岐阜県神岡町) で検出



Super-Kamiokande
(ICRR, Univ. Tokyo)



J-PARC Main Ring
(KEK-JAEA, Tsukuba)



「Discover Magazine」の2013年トップ記事ベスト100に

Archeology, Paleontology and Evolution	Neuroscience and Behavior
#1 Ancient DNA sequencing success	#13 Real-world mind melding
#2 Most precise level advance date lineage	#14 Transgenic brain
#3 European foot found in North Carolina	#15 Whales remain central for whale
#4 A surprising beautiful tool time	#16 The making of a myth: evidence
#5 Pearly shellfish genome & oyster shown	#17 3-D atlas of the brain
#6 Richard III: missing piece found at last	#18 Finding a missing link
#7 Fossil dinosaur find expands family tree	#19 Chasing emotions
#8	#20 Human grid cells
#9	#21 Revisiting the role of amyloid
#10	#22 Sleep your fears away
#11	#23 Evidence for brain research
#12	#24 Correlating over suffering mental illness
#13	#25 Understanding ICh
#14	
#15	
#16	
#17	
#18	
#19	
#20	
#21	
#22	
#23	
#24	
#25	
#26	
#27	
#28	
#29	
#30	
#31	
#32	
#33	
#34	
#35	
#36	
#37	
#38	
#39	
#40	
#41	
#42	
#43	
#44	
#45	
#46	
#47	
#48	
#49	
#50	
#51	
#52	
#53	
#54	
#55	
#56	
#57	
#58	
#59	
#60	
#61	
#62	
#63	
#64	
#65	
#66	
#67	
#68	
#69	
#70	
#71	
#72	
#73	
#74	
#75	
#76	
#77	
#78	
#79	
#80	
#81	
#82	
#83	
#84	
#85	
#86	
#87	
#88	
#89	
#90	
#91	
#92	
#93	
#94	
#95	
#96	
#97	
#98	
#99	
#100	

- 2010年: 実験開始

- 2013年: ミュ-ニュートリノ → 電子ニュートリノ出現を世界で初めて発見

ハイパーカミオカンデ実験: スーパーカミオカンデの後継実験

→ ニュートリノの CP 対称性 (粒子・反粒子の対称性) の破れの解明、陽子崩壊の発見へ

4. ハイパーカミオカンデ 検出器の開発



T2K&HK実験の研究内容

Intermediate neutrino detector

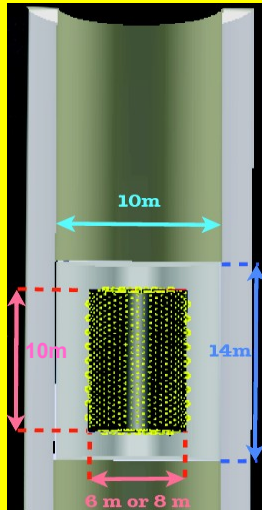
J-PARC

water equiv. 1,700m
NEUTRINO BEAM
295 km

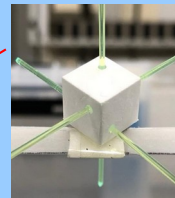
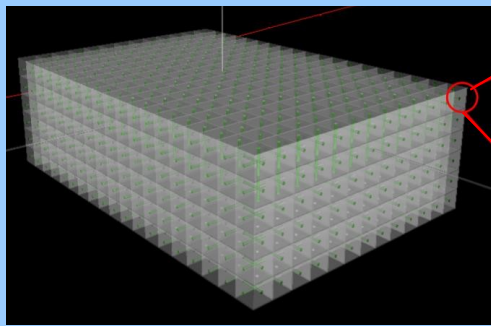
-1° 2°

3. 新しいニュートリノ検出器の開発

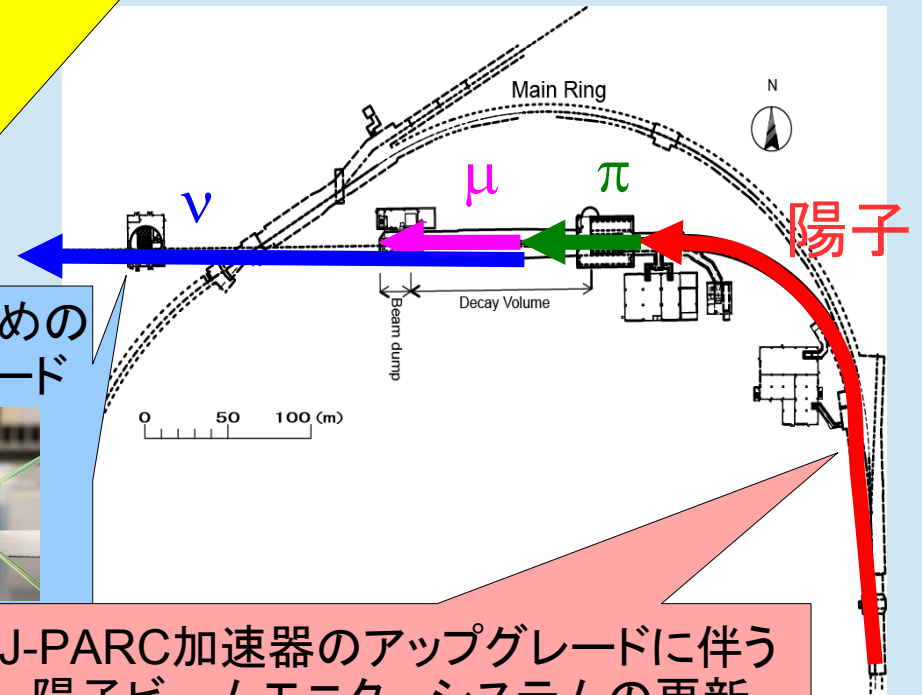
ハイパーカミオカンデ中間距離
水チェレンコフ検出器 (IWCD)



2. ニュートリノ反応を詳細に調べるための 前置検出器 ND280 のアップグレード



J-PARC ニュートリノ実験施設

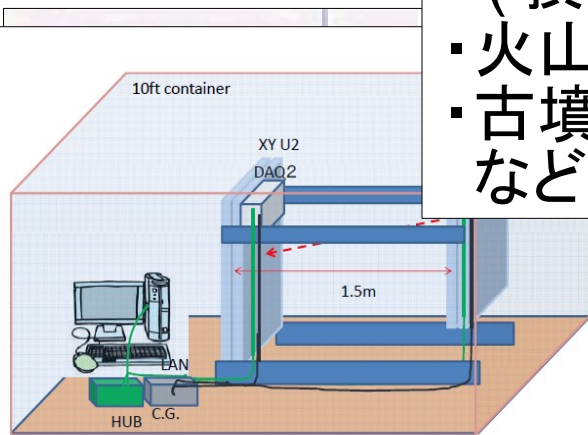


1. J-PARC加速器のアップグレードに伴う 陽子ビームモニターシステムの更新

ミュオンラジオグラフィ

宇宙線ミュオンを用いた、大規模な物体の内部構造の調査

- ・ (損傷した) 原子炉の炉心の状態の調査
- ・ 火山のマグマの状態の調査
- ・ 古墳の中の空間の有無の調査
など



ミュオン検出器



ミュオンラジオグラフィ

宇宙線ミュオンを用いた、大規模な物体の内部構造の調査

- ・ (損傷した) 原子炉の炉心の状態の調査
- ・ 火山のマグマの状態の調査
- ・ 古墳の中の空間の有無の調査
など

岩手山を透視

ミュオンで見た岩手山

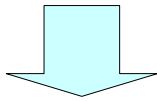
ミュオン検出器

UNI実験

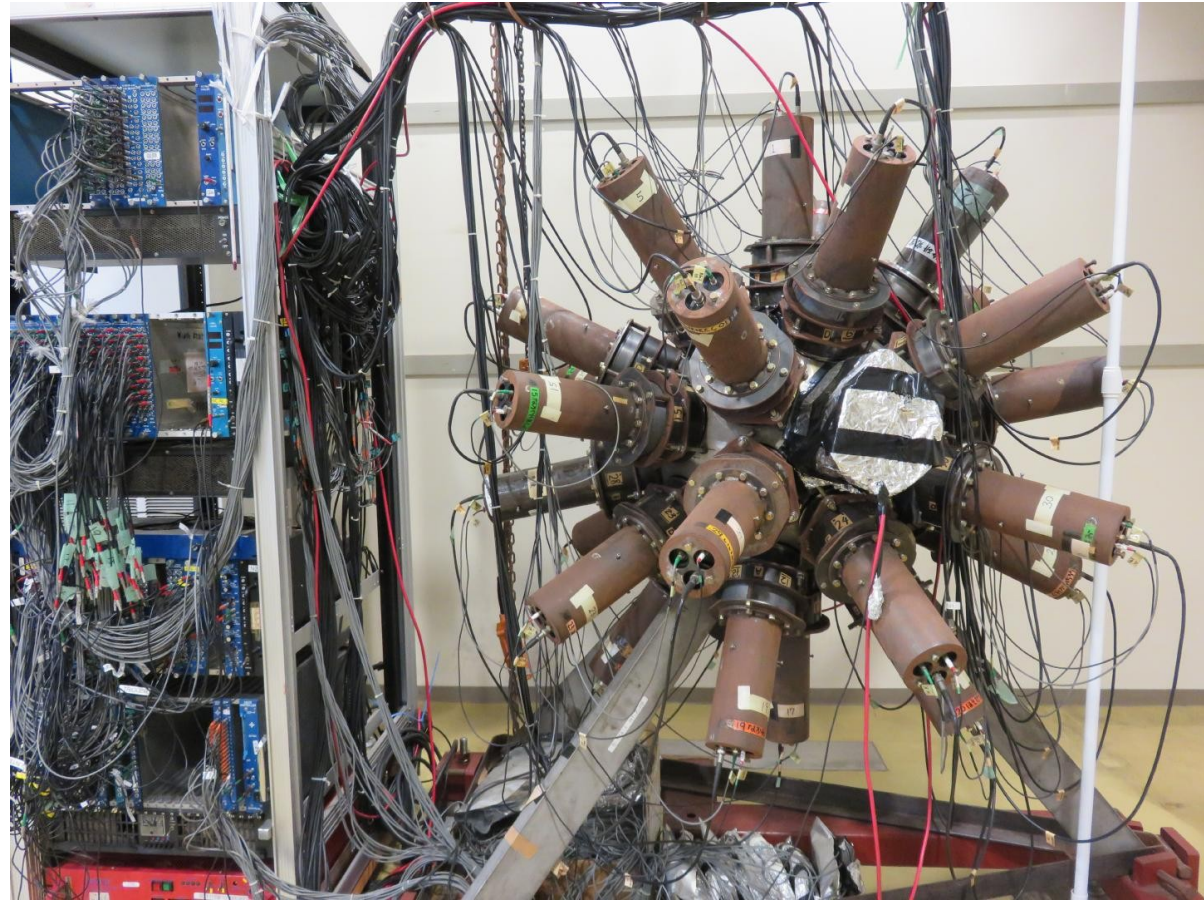
ポジトロニウム生成・崩壊実験

ポジトロニウム：
電子・陽電子の束縛状態

ポジトロニウムの稀崩壊
(5本の γ 線への崩壊)
の探索

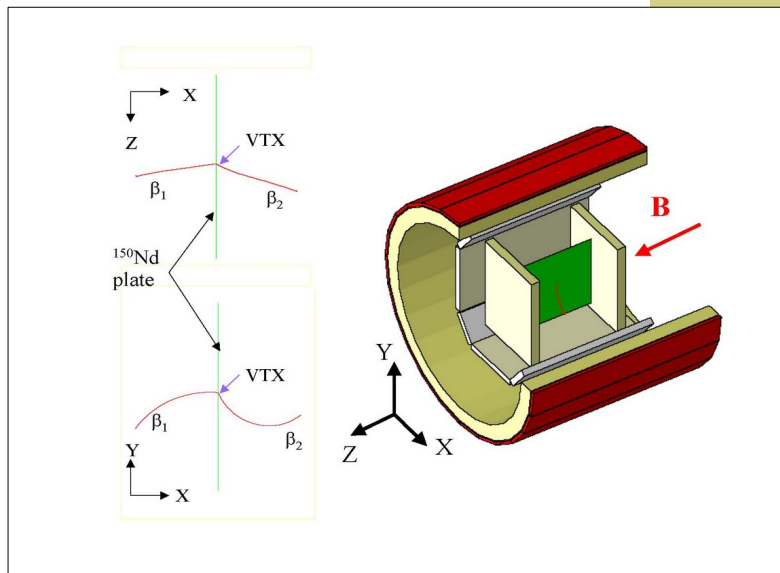


QEDの精密測定へ

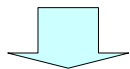


DCBA実験

- 二重ベータ崩壊実験
 - ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊の探索
ニュートリノの基本的性質 (マヨナラ性、質量) の解明へ
- 飛跡検出器で二本のベータ線の飛跡を検出
 - **ベータ線の運動量を測定する世界で唯一の実験**



現在は小規模の実験
→ 原理の実証



将来的に大規模実験へ

