

ハイパーカミオカンデ計画

～ニュートリノ研究の次の挑戦～



塩澤 真人

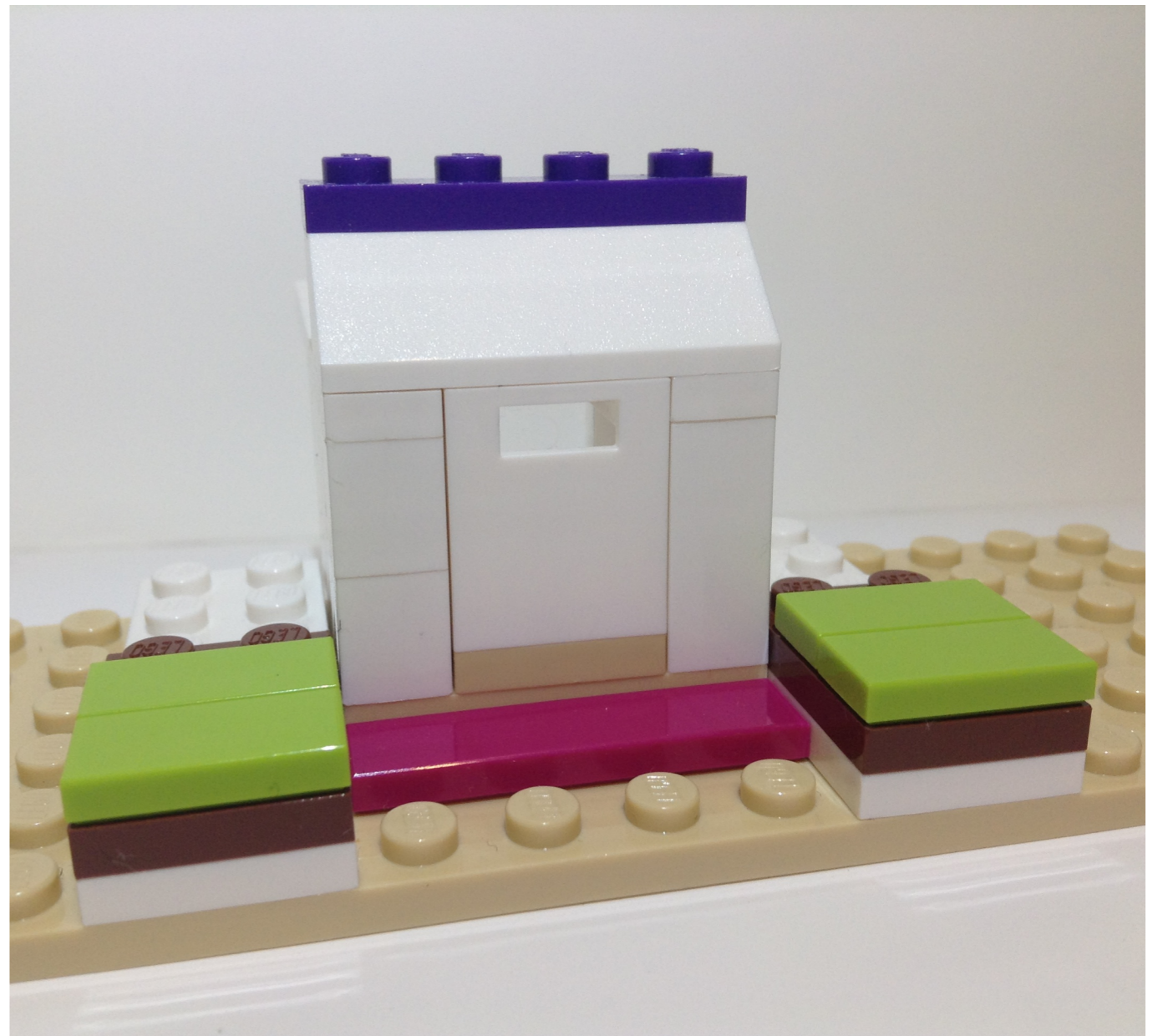
東京大学 宇宙線研究所 神岡宇宙素粒子研究施設
カブリ数物連携宇宙研究機構
次世代ニュートリノ科学連携研究機構

2019年1月12日、ハイパーカミオカンデ講演会



物質は何かからできているか？
その性質や役割を理解したい

物質の最小単位
||
素粒子
||
(構成) ブロック



全てのものは原子からできている

元素の周期表 *中学校で習います

周期\族	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	族/周期									
1	1 H 水素 1.008	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">典型非金属元素</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">典型金属元素</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">遷移金属元素</div> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 10px auto; width: 80%;"> <table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td style="width: 50%;">原子番号</td> <td style="width: 50%;">元素記号</td> </tr> <tr> <td colspan="2">元素名</td> </tr> <tr> <td colspan="2">原子量</td> </tr> </table> </div>																原子番号	元素記号	元素名		原子量		2 He ヘリウム 4.003	1			
原子番号	元素記号																											
元素名																												
原子量																												
2	3 Li リチウム 6.941	4 Be ベリウム 9.012	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 10px auto; width: 80%;"> <p style="text-align: center;">元素記号の元素は単体が常温で</p> <table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td style="width: 33%;">標準書体は固体</td> <td style="width: 33%;">下線の書体は液体</td> <td style="width: 33%;">斜体の書体は気体</td> </tr> </table> </div>																標準書体は固体	下線の書体は液体	斜体の書体は気体	5 B ホウ素 10.81	6 C 炭素 12.01	7 N 窒素 14.01	8 O 酸素 16.00	9 F フッ素 19.00	10 Ne ネオン 20.18	2
標準書体は固体	下線の書体は液体	斜体の書体は気体																										
3	11 Na ナトリウム 22.99	12 Mg マグネシウム 24.31																	13 Al アルミニウム 26.98	14 Si ケイ素 28.09	15 P リン 30.97	16 S 硫黄 32.07	17 Cl 塩素 35.45	18 Ar アルゴン 39.95	3			
4	19 K カリウム 39.1	20 Ca カルシウム 40.08	21 Sc スカンジウム 44.96	22 Ti チタン 47.88	23 V バナジウム 50.94	24 Cr クロム 52	25 Mn マンガン 54.94	26 Fe 鉄 55.85	27 Co コバルト 58.93	28 Ni ニッケル 58.69	29 Cu 銅 63.55	30 Zn 亜鉛 65.39	31 Ga ガリウム 69.72	32 Ge ゲルマニウム 72.61	33 As ヒ素 74.92	34 Se セレン 78.95	35 Br 臭素 79.9	36 Kr クリプトン 83.8	4									
5	37 Rb ルビジウム 85.47	38 Sr ストロンチウム 87.62	39 Y イットリウム 88.91	40 Zr ジルコニウム 91.22	41 Nb ニオブ 92.91	42 Mo モリブデン 95.94	43 Tc テクネチウム (99)*	44 Ru ルテニウム 101.1	45 Rh ロジウム 102.9	46 Pd パラジウム 106.4	47 Ag 銀 107.9	48 Cd カドミウム 112.4	49 In インジウム 114.8	50 Sn スズ 118.7	51 Sb アンチモン 121.8	52 Te テルル 127.6	53 I ヨウ素 126.9	54 Xe キセノン 131.3	5									
6	55 Cs セシウム 132.9	56 Ba バリウム 137.3	57~71 ランタノイド	72 Hf ハフニウム 178.5	73 Ta タンタル 180.9	74 W タングステン 183.8	75 Re レニウム 186.2	76 Os オスmium 190.2	77 Ir イリジウム 192.2	78 Pt 白金 195.1	79 Au 金 197.0	80 Hg 水銀 200.6	81 Tl タリウム 204.4	82 Pb 鉛 207.2	83 Bi ヒスマス 209.0	84 Po ポロニウム (210)	85 At アスタチン (210)	86 Rn ラドン (222)	6									
7	87 Fr フランシウム (223)	88 Ra ラジウム (226)	89~103 アクチノイド	104 Rf ラザホージウム (261)*	105 Db ドブニウム (262)*	106 Sg シーホーキウム (263)*	107 Bh ホーリウム (264)*	108 Hs ハッソウム (265)*	109 Mt マイトネリウム (268)*	110 Unn ウンウンニリウム (269)*	109 Uuu ウンウンウニウム (272)*	112 Unb ウンウンビウム (277)*		114 Unq ウンウンクアジウム (289)*		116 Unh ウンウンヘキシウム (289)*		118 Uuo ウンウンオクテウム (296)*	7									

*をつけた元素は人工的につくられたもので、天然には存在しない *原子番号110番以降は暫定的名称で性質は解明されていない

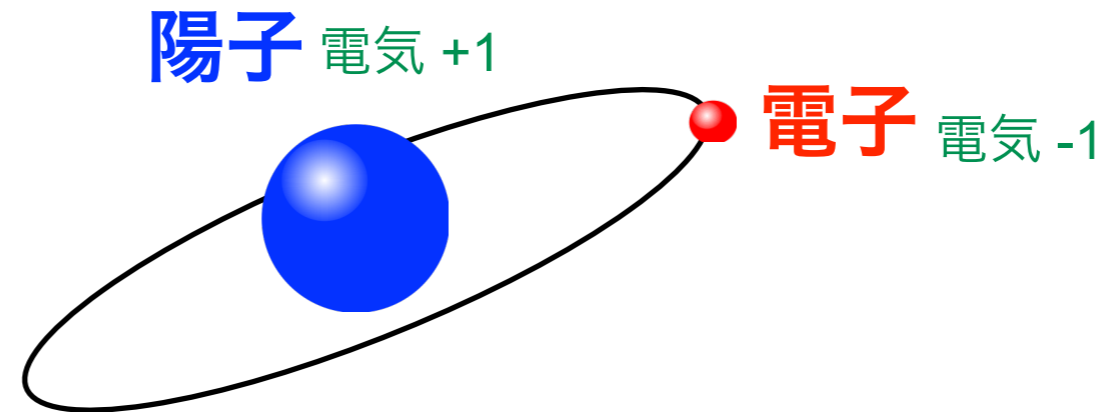
()をつけた値は、その元素の代表的な放射性同位体の質量数である(IUPAC)

Ver. 2.10 4/30/2005 著作: 清藤英樹@理科雑学アドベンチャー(<http://www.hello.to/science>)

57~71 ランタノイド	57 La ランタン 138.9	58 Ce セリウム 140.1	59 Pr プラセオジウム 140.9	60 Nd ネオジウム 144.2	61 Pm プロメチウム (145)	62 Sm サマリウム 150.4	63 Eu ユロピウム 152.0	64 Gd ガドリニウム 157.3	65 Tb テルビウム 158.9	66 Dy ジスプロシウム 162.5	67 Ho ホルミウム 164.9	68 Er エルビウム 167.3	69 Tm ツリウム 168.9	70 Yb イットルビウム 173.0	71 Lu ルテチウム 175.0
89~103 アクチノイド	89 Ac アクチニウム (227)	90 Th トリウム 232.0	91 Pa プロトアクチニウム 231.0	92 U ウラン 238.0	93 Np ネプツニウム (237)*	94 Pu プルトニウム (239)*	95 Am アメリシウム (243)*	96 Cm キュリウム (247)*	97 Bk バークリウム (247)*	98 Cf カリホルニウム (252)*	99 Es アインスタイニウム (252)*	100 Fm フェルミウム (257)*	101 Md メンデレビウム (256)*	102 No ノーベリウム (259)*	103 Lr ローレンシウム (260)*

原子は陽子と電子からできている

水素原子



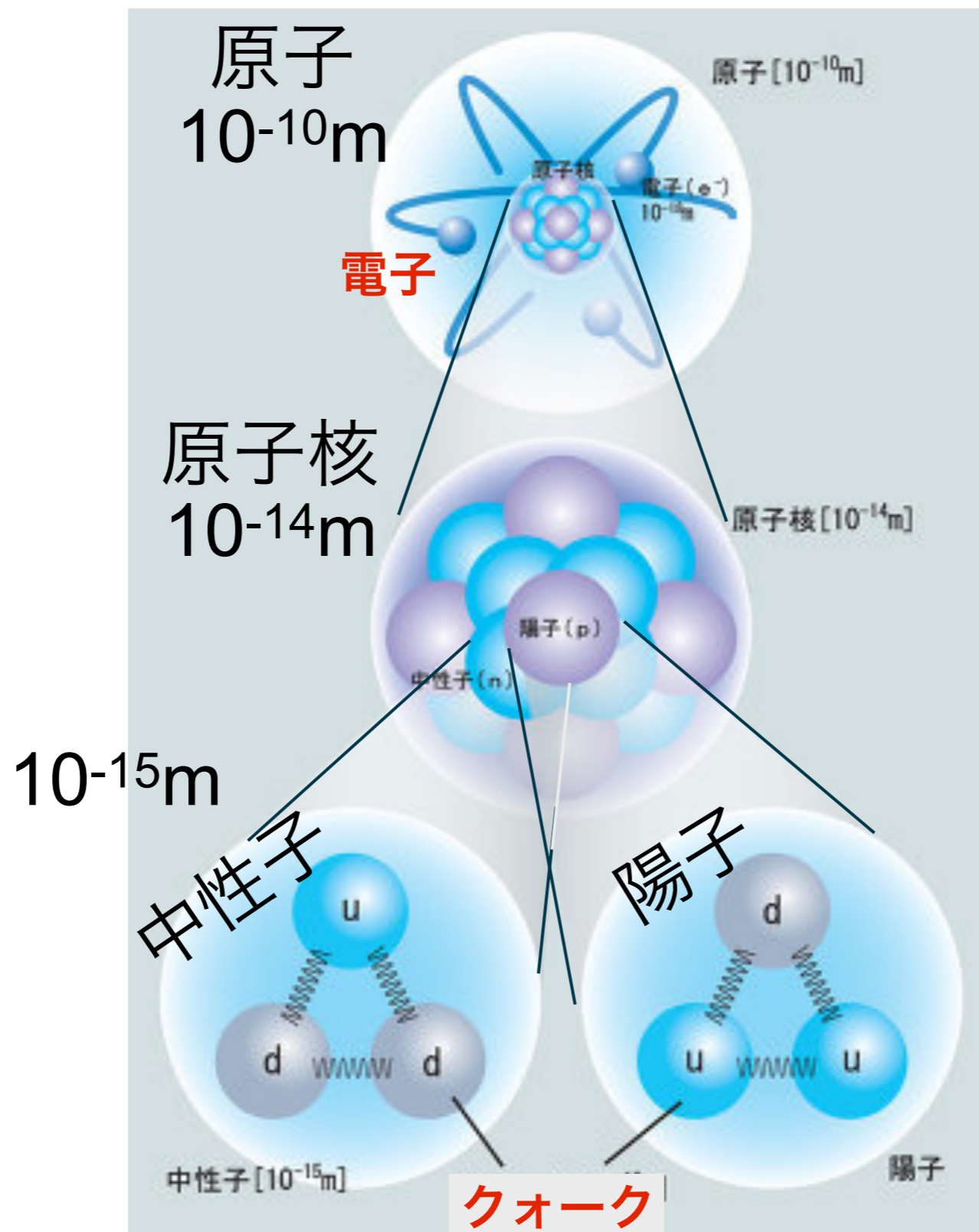
- 陽子と電子の数を増やしていくと、異なる原子となる*。例えば、

*中性子も増えます

- 2個→ヘリウム
- 3個→リチウム
- 4個→ベリリウム
- ...

これなら覚えられる！
でも、さらに分解できます。

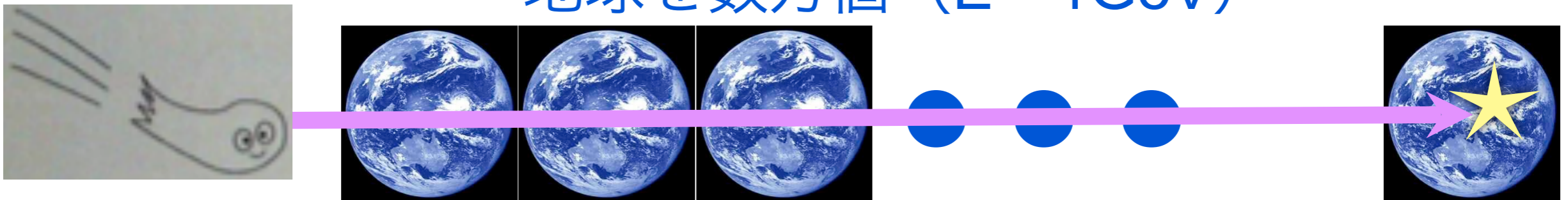
現代のブロック



V

ニュートリノ : 電子から電気をとったもの
つかまえにくい、ゆうれい粒子

地球を数万個 ($E \sim 1\text{GeV}$)



調べるのが難しく、まだよくわかっていない粒子

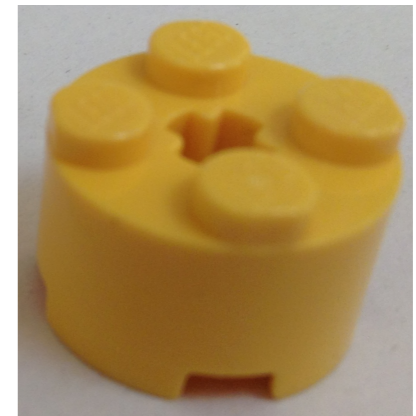
現代のブロック：まとめ

- ブロックは大きく 2種類ある

- クォーク



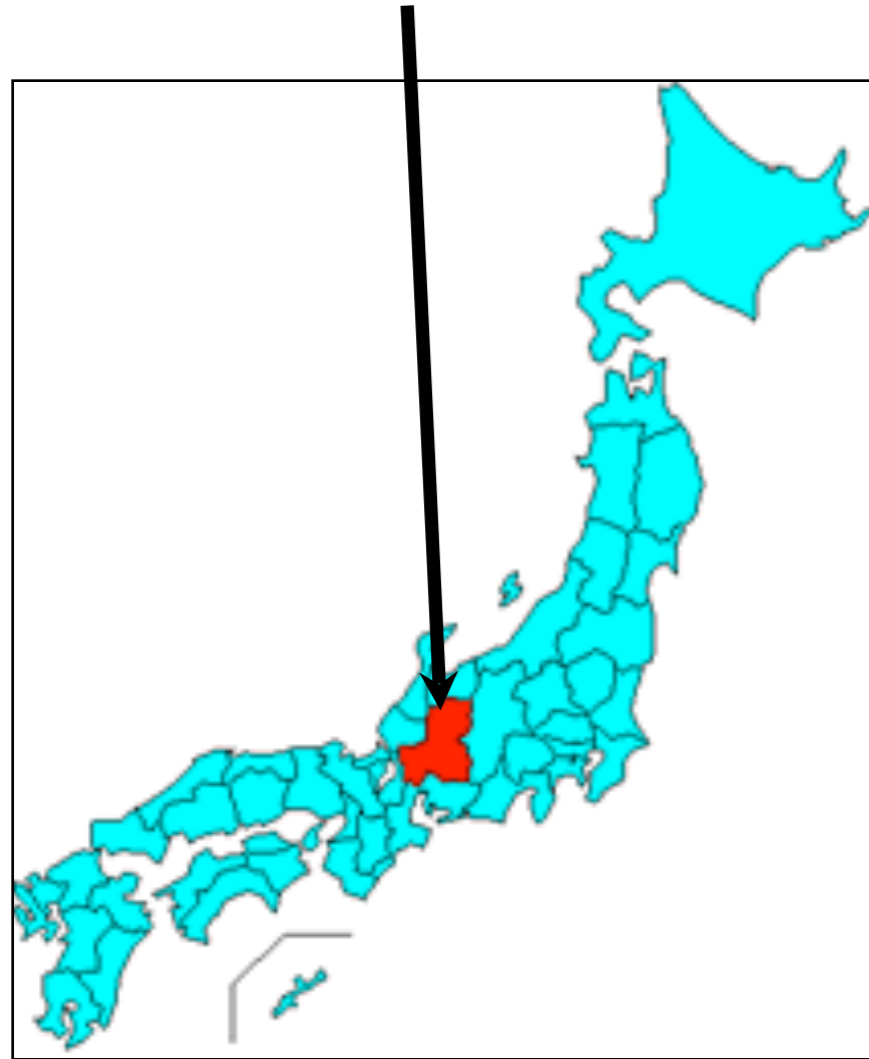
- ニュートリノ・電子グループ



- 全ての粒子には反粒子が存在する

スーパーカミオカンデ実験

岐阜県 飛騨市 神岡町

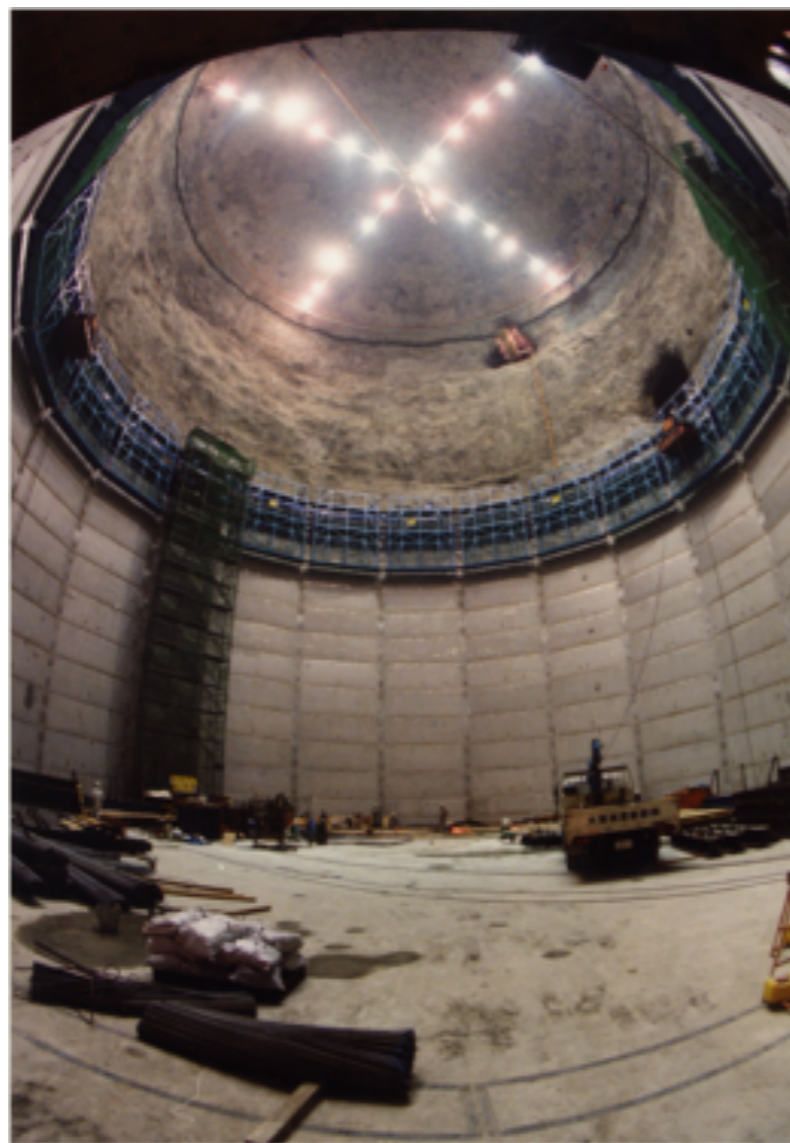


スーパーカミオカンデ:

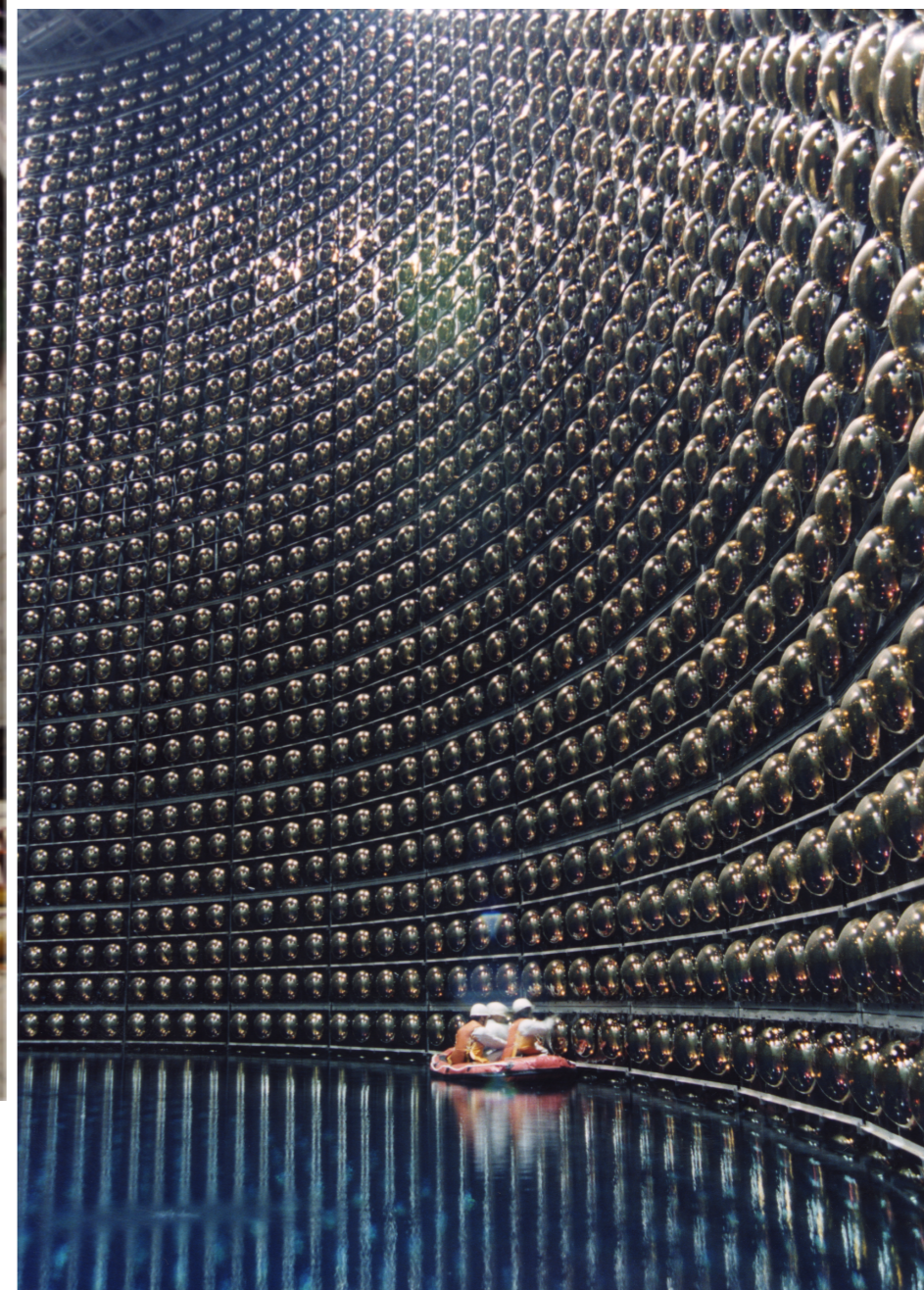
ゆうれい粒子ニュートリノを捕まえる装置
5万トン、40メートル



1991~
地下空洞掘削



1994~
水槽建設



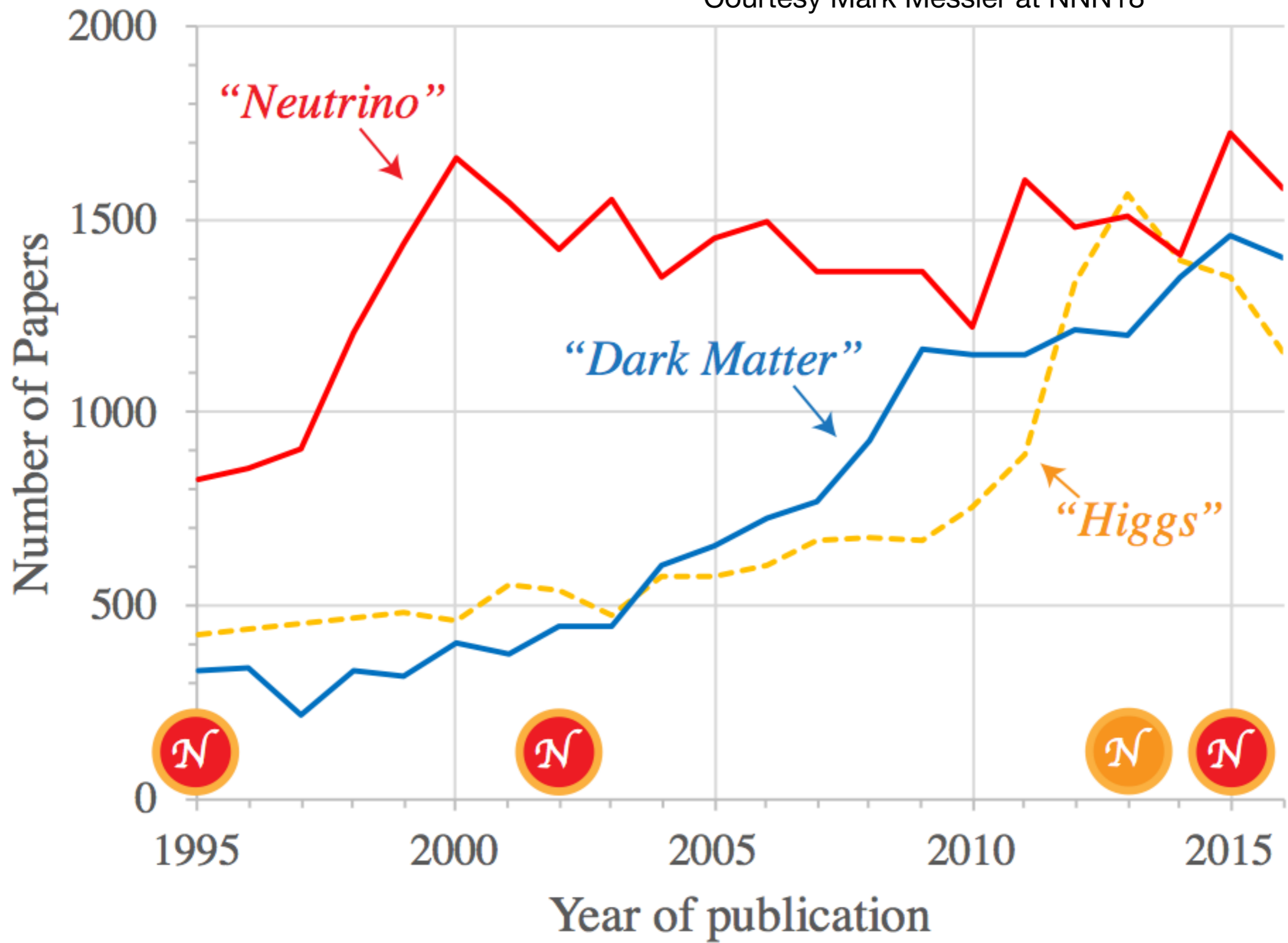
1995~ 給水
1996~ 運転

1998年6月5日
ニューヨークタイムズ

2015年ノーベル物理学賞
梶田隆章 教授

受賞理由：ニュートリノが
質量を持つことを示す、ニュー
トリノ振動の発見

- 発見されたニュートリノの性質は不思議なものだった
- ニュートリノの性質や役割の謎がさらに深まった



ニュートリノ研究の次の挑戦

ハイパーカミオカンデ

世界中の関心を集める科学

- 基礎科学の大きな問題、例えば宇宙の物質がなぜそのようになっているのか、また構成ブロックの統一法則に挑戦する

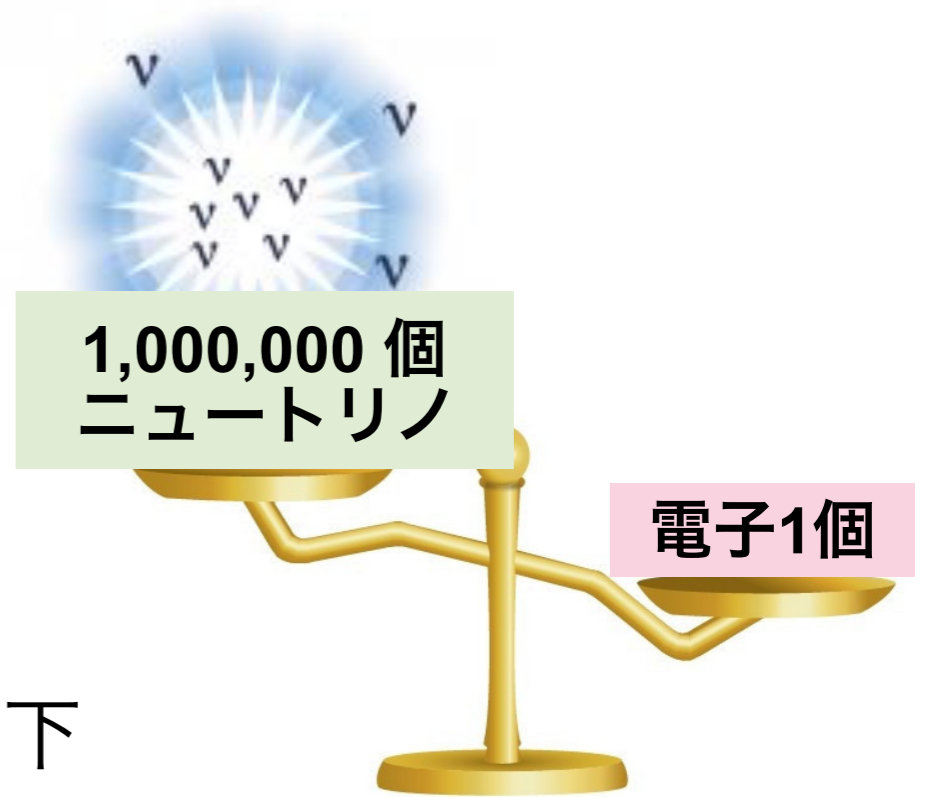
最新技術により世界をリードするプロジェクト

- スーパーカミオカンデの10倍規模となる、世界最大の検出器を建設する、
そして
- 陽子加速器J-PARCによる世界最大強度のニュートリノビームをとらえる

国際共同プロジェクト

- 海外協力国と協力して、設計、建設、運転

ニュートリノの性質



● 不思議な性質

- 極端に軽い質量 ← 電子の100万分の1以下
- 3種類のニュートリノが理論で許されるほぼ最大の大きさで混じりあっている
- 未知の法則が存在するはず

● ニュートリノはブロックを理解する鍵

- 全てのブロックをまとめて（統一的に）理解したい

ブロックを統一できるか？

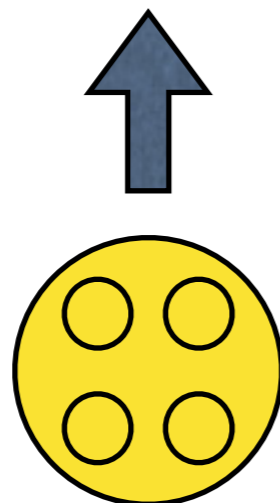
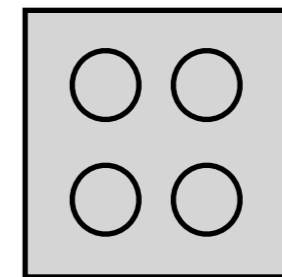
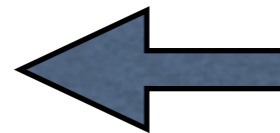
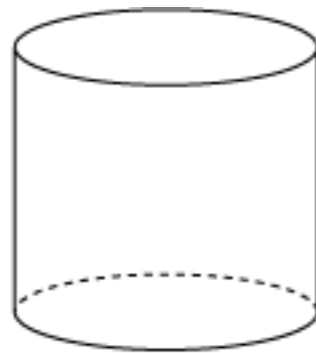
- ブロック（素粒子）は一つ*とする新理論（仮説）

*数学的に一つにするということ

- 全てのブロックをまとめて理解できる
- クォークがニュートリノ・電子に変身できる

統一したブロック*
(クォーク・電子・ニュートリノ)

クォークブロック

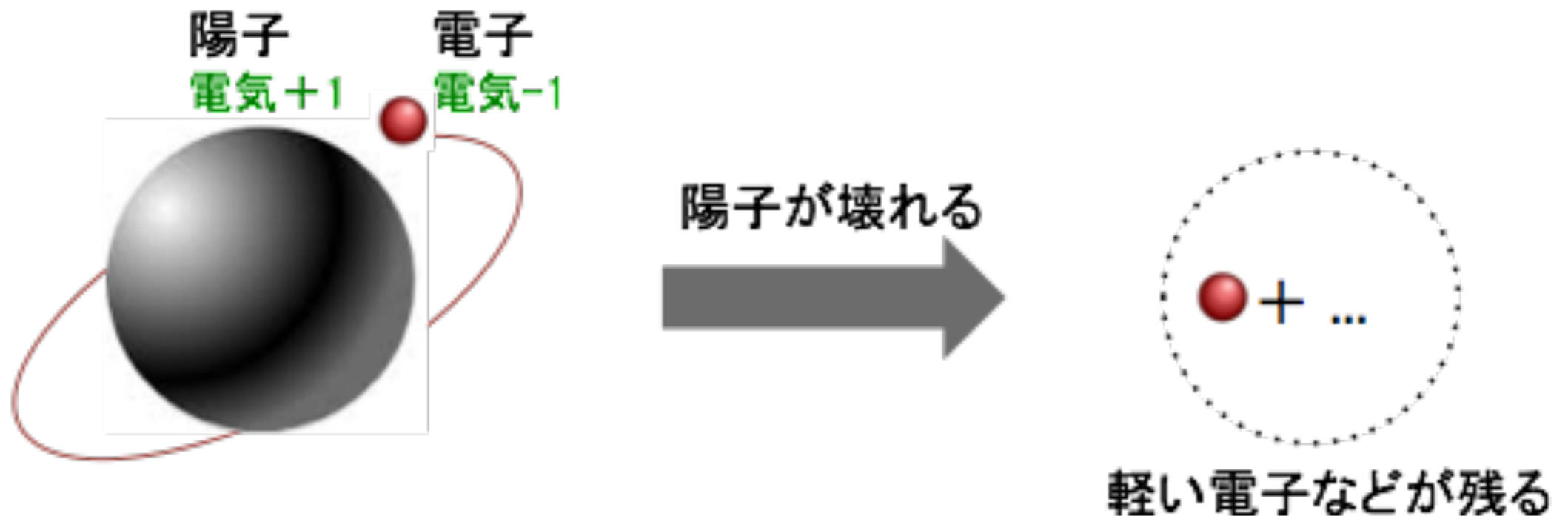


ニュートリノ・電子ブロック

ブロックを統一できるか？

- ブロック（素粒子）は一つとする新理論（仮説）
 - 全てのブロックをまとめて理解できる
 - クォークがニュートリノ・電子に変身できる
- 陽子がより軽い電子などに壊れる現象を预言する

原子の例(水素)

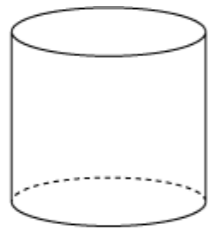


陽子が壊れることが見つかったら

- 大統一理論

- 素粒子の統一 ～ ブロックは1つ！

統一したブロック
(クォーク・電子・ニュートリノ)



- 宇宙（物質）は永遠ではない

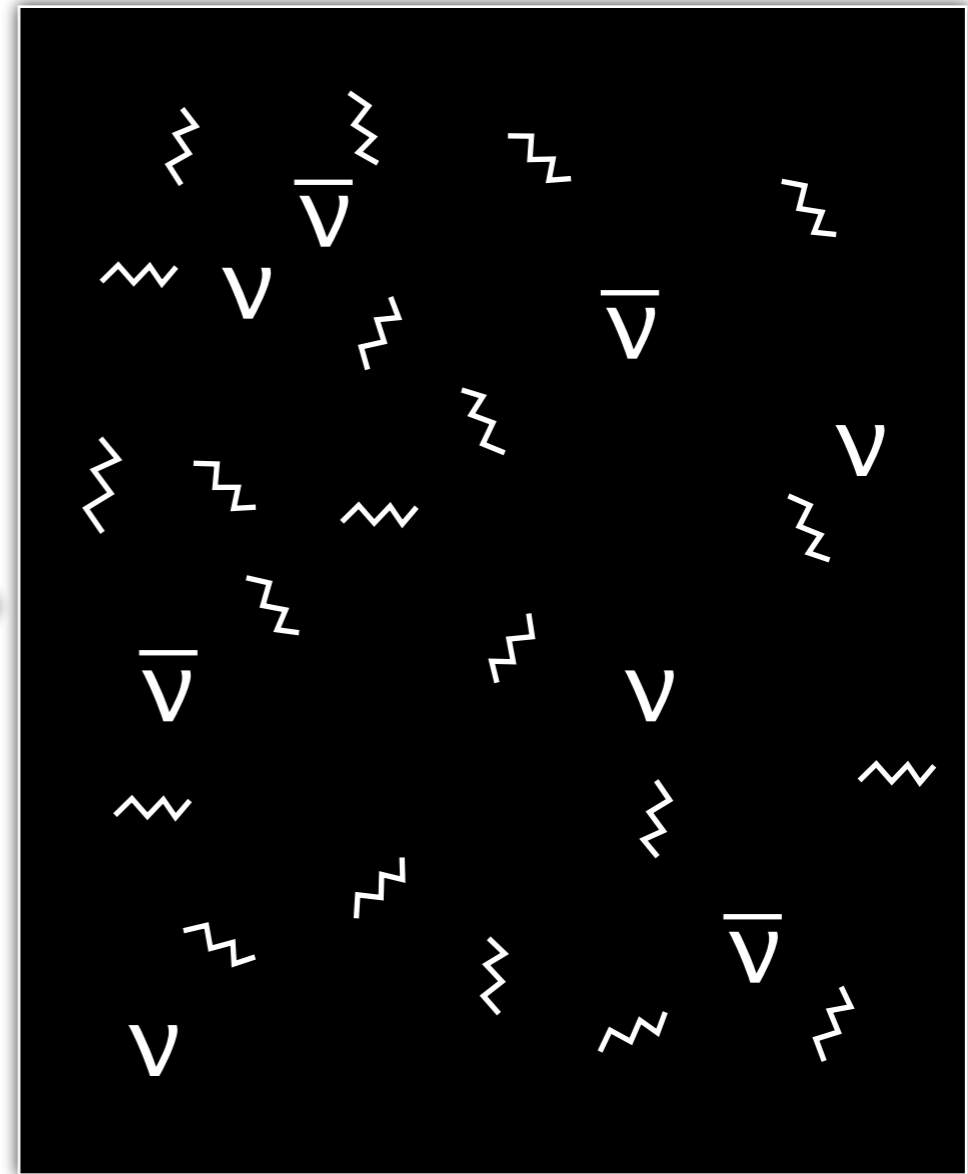
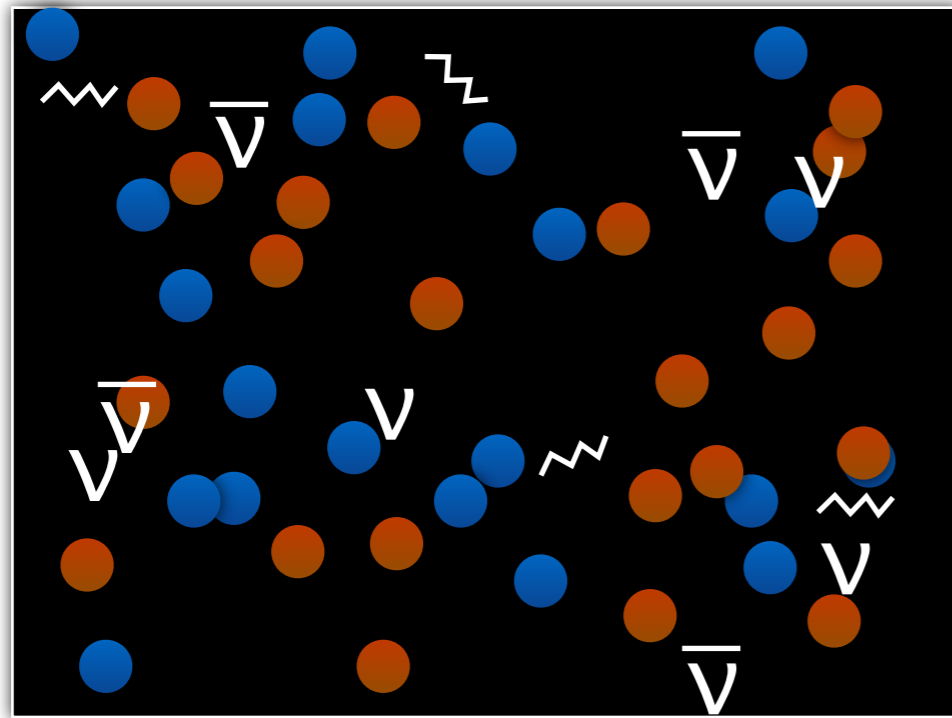
- 全ての星も人間も、消滅する運命

ハイパーカミオカンデで発見を目指す

宇宙のはじまり

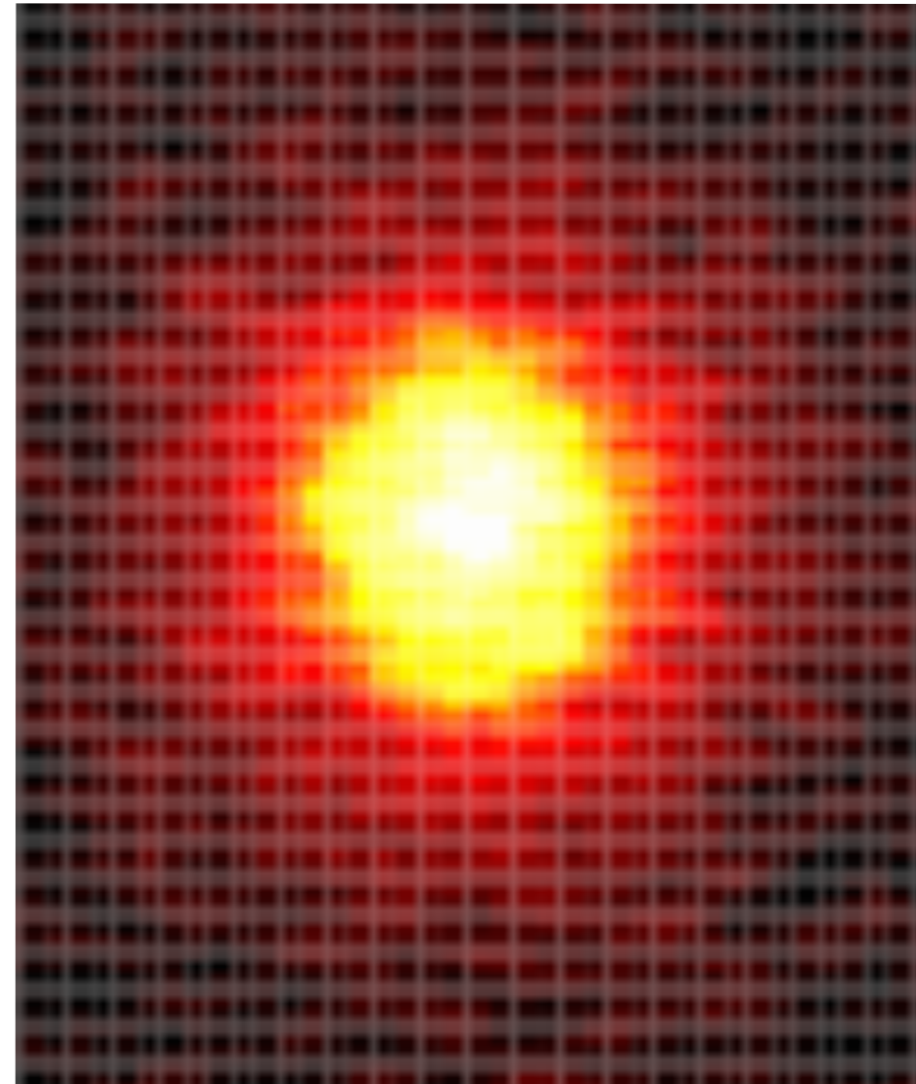
今

138億年前



- 物質は存在しないはず (矛盾) なぜ？
- ニュートリノの未測定 of 性質が解く鍵となる

ν は天体内部を見る”光”

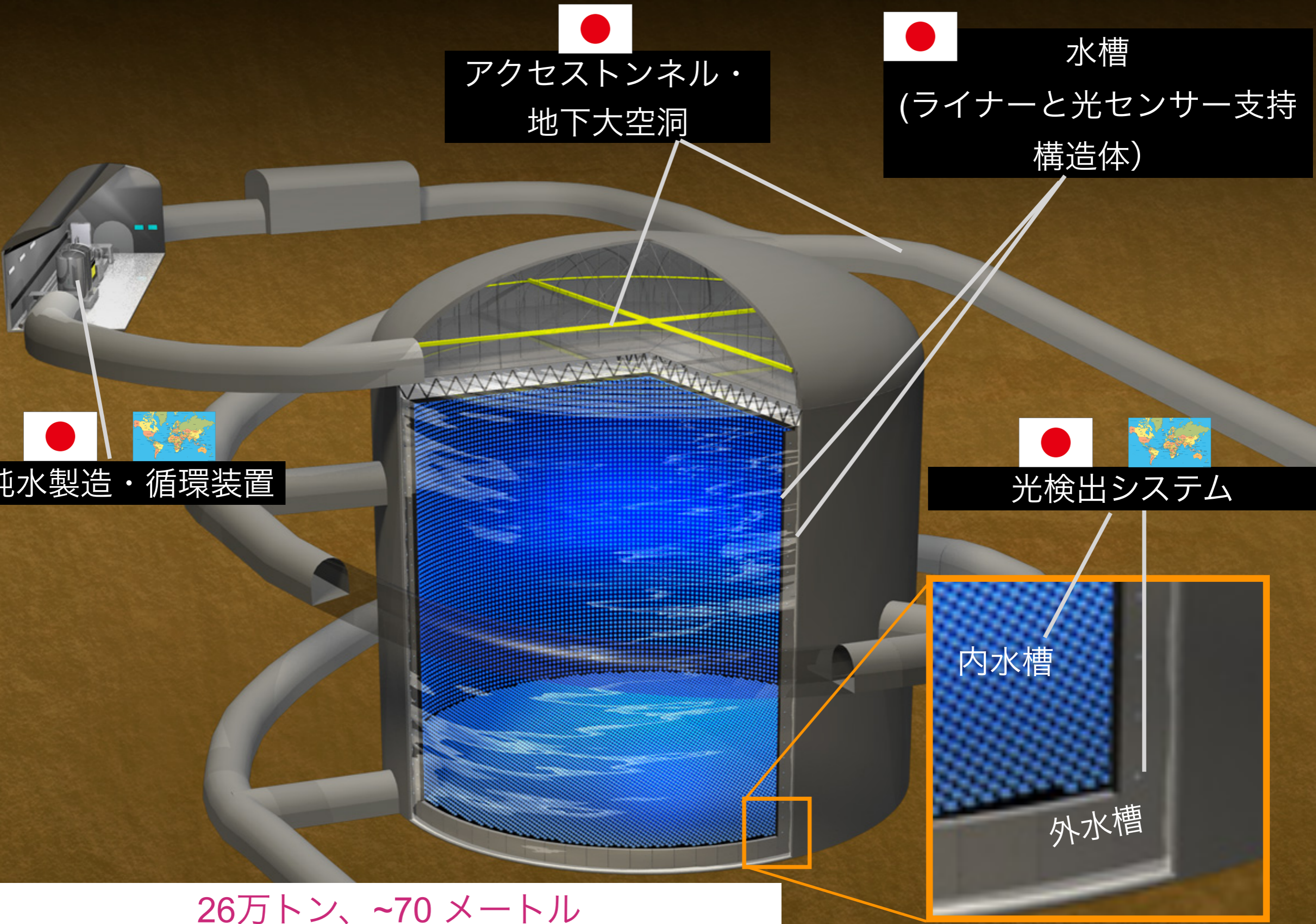


X線（レントゲン）：体の内部の様子を見る

ニュートリノ：太陽中心部の核融合、超新星爆発内部
やブラックホール誕生の瞬間

Hyper-Kamiokande video

<https://youtu.be/JFOE3D2z7LM>



アクセストンネル・
地下大空洞



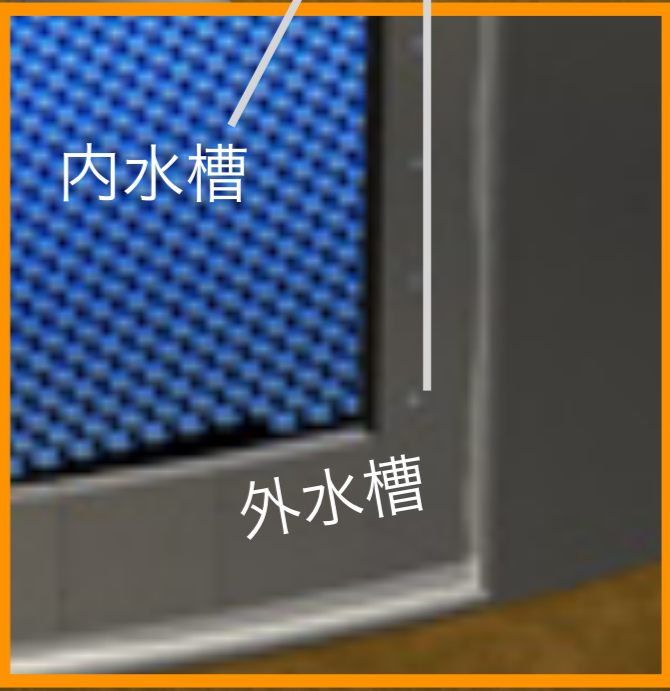
水槽
(ライナーと光センサー支持
構造体)



純水製造・循環装置



光検出システム

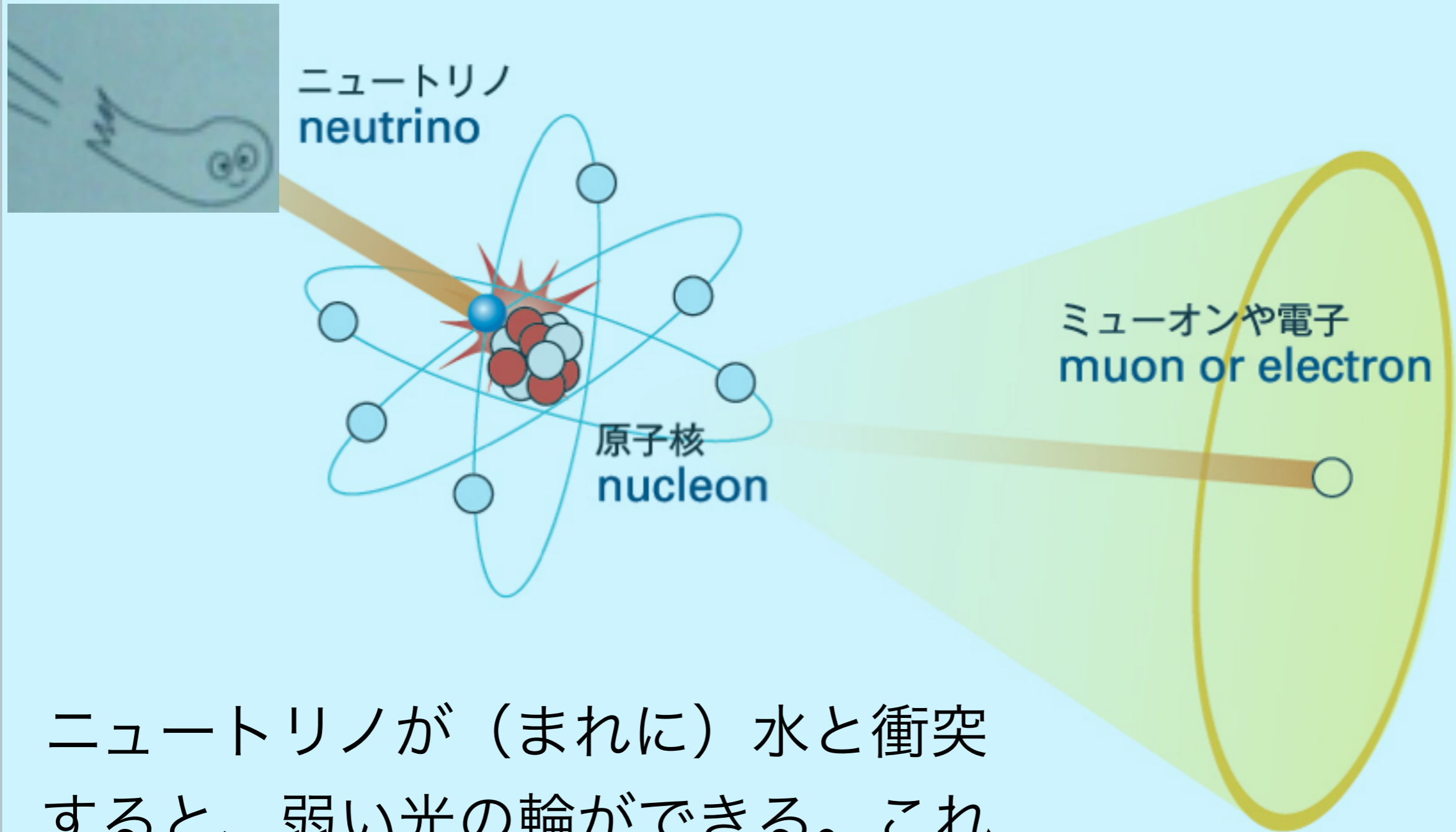


内水槽

外水槽

26万トン、~70メートル
観測に使う水の量はスーパーカミオカンデの8.4倍

ニュートリノのつかまえ方



ニュートリノが（まれに）水と衝突すると、弱い光の輪ができる。これを光センサーでつかまえる。

光センサー

直径50cm

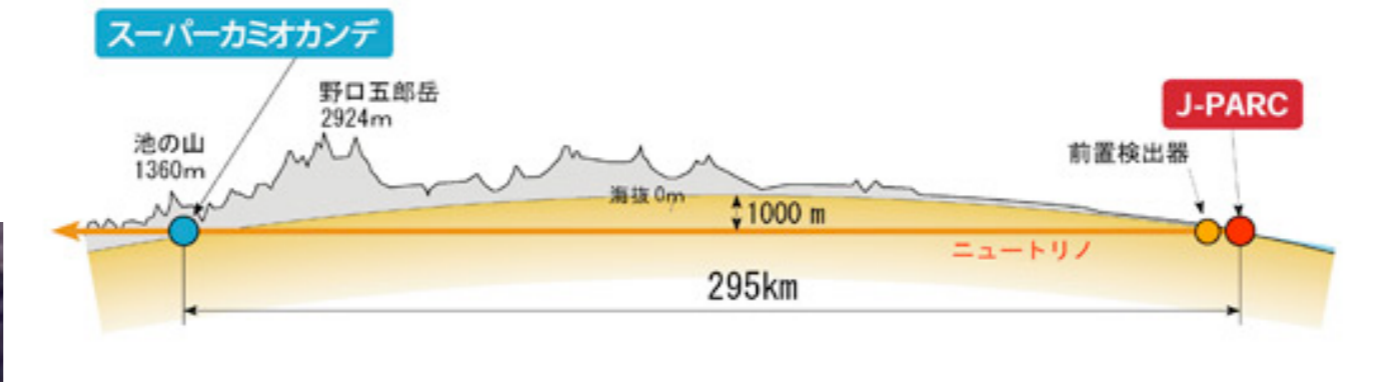


- 光のつぶ1つに感度を持つ
- 従来のものより性能を大幅にアップ
 - 光感度2倍、時間精度2倍、耐水圧2倍

大強度陽子加速器 J-PARC

大強度ニュートリノビーム生成施設

現在の~3倍に増強



J-PARC 施設
(KEK/JAEA共同)

ニュートリノビーム
スーパーカミオカンデへ
(295km先の岐阜県神岡)

リニアック

3GeVシンクロトロン

メインリング

ニュートリノビームライン

物質・生命科学実験施設

原子核・素粒子実験施設
(ハドロン実験施設)



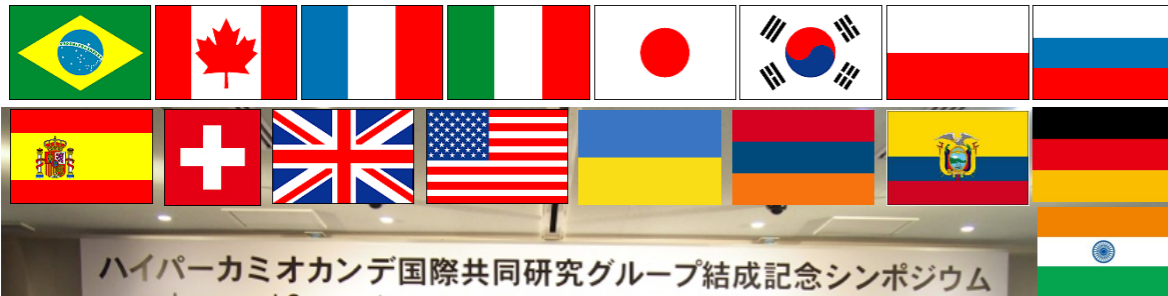
国際研究グループ

プロジェクト
リーダー (2名) 運営
委員長 国際
委員長



- 国際研究グループ
 - 17か国、80機関、~300名 (3/4海外)
 - 東大と高エネルギー加速器研究機構が中核機関

各国代表者 (+山内、梶田)



2015.1 研究グループ結成と協定調印式



グループ会議@ロンドン、2016年7月

大規模学術フロンティア促進事業等一覧

日本語の歴史的典籍の国際共同研究ネットワーク構築計画 (人間文化研究機構国文学研究資料館)

日本語の歴史的典籍30万点を画像データベース化し、新たな異分野融合研究や国際共同研究の発展を目指す。古典籍に基づく過去のオーロラの研究、江戸時代の食文化の研究など他機関や産業界と連携した新たな取組を開始。



大型電波望遠鏡「アルマ」による国際共同利用研究の推進 (自然科学研究機構国立天文台)

日米欧の国際協力によりチリに建設した口径12mと7mの電波望遠鏡からなる「アルマ」により、生命関連物質の探索や惑星・銀河形成過程の解明を目指す。



超高性能プラズマの定常運転の実証 (自然科学研究機構核融合科学研究所)

我が国独自のアイデアによる「大型ヘリカル装置(LHD)」により、高温高密度プラズマの実現と定常運転の実証を目指す。また、将来の核融合炉の実現に必要な学理の探求と体系化を目指す。



大強度陽子加速器施設(J-PARC)による物質・生命科学及び原子核・素粒子物理学研究の推進 (高エネルギー加速器研究機構)

日本原子力研究開発機構(JAEA)と共同で、世界最大級のビーム強度を持つ陽子加速器施設を運営。多様な粒子ビームを用いて基礎研究から応用研究に至る幅広い研究を推進。



スーパーカミオカンデによるニュートリノ研究の推進 (東京大学宇宙線研究所)

超大型水槽(5万トン)を用いニュートリノを観測し、その性質の解明を目指す。ニュートリノの検出(2002年ノーベル物理学賞小柴先生)、ニュートリノの質量の存在の確認(2015年ノーベル物理学賞梶田先生)などの画期的成果。



※同研究所が実施する「スーパーカミオカンデ計画」の運営費に、「ハイパーカミオカンデ計画」の可能性調査を実施するための経費として、5千万円を計上。具体的な調査事項としては、工法等の見直しによる建設費の圧縮、実施主体における自主財源の確保、国内外の関係機関との連携等による体制の強化等を想定。



(ハイパーカミオカンデ(イメージ))

放射光施設による実験研究 (高エネルギー加速器研究機構)

学術研究だけでなく産業利用も含め物質の構造と機能の解明を目指す。白川先生(2000年ノーベル化学賞)、赤崎先生・天野先生(2014年ノーベル物理学賞)などの研究に貢献。



大型光学赤外線望遠鏡「すばる」の共同利用研究 (自然科学研究機構国立天文台)

米国ハワイ島に建設した口径8.2mの「すばる」望遠鏡により、銀河が誕生した頃の宇宙の姿を探る。約129億光年離れた銀河を発見するなど、多数の観測成果。



30m光学赤外線望遠鏡(TMT)計画の推進 (自然科学研究機構国立天文台)

日米加中印の国際協力により口径30mの「TMT」を米国ハワイに建設し、太陽系外の第2の地球の探査、最初に誕生した星の検出等を目指す。



スーパーBファクトリーによる新しい物理法則の探求 (高エネルギー加速器研究機構)

加速器のビーム衝突性能を増強し、宇宙初期の現象を多数再現。「消えた反物質」「暗黒物質の正体」の解明など新しい物理法則の発見・解明を目指す。小林・益川先生の「CP対称性の破れ」理論(2008年ノーベル物理学賞)を証明。



新しいステージに向けた学術情報ネットワーク(SINET)整備 (情報・システム研究機構国立情報学研究所)

国内の大学等を100Gbpsの高速通信回線ネットワークで結び、共同研究の基盤を提供。国内800以上の大学・研究機関、約300万人の研究者・学生が活用。



大型低温重力波望遠鏡(KAGRA)計画 (東京大学宇宙線研究所)

一辺3kmのL字型のレーザー干渉計により重力波を観測し、ブラックホールや未知の天体等の解明を目指すとともに、日米欧による国際ネットワークを構築し、重力波天文学の構築を目指す。



高輝度大型ハドロン衝突型加速器(HL-LHC)による素粒子実験 (高エネルギー加速器研究機構)

CERNが設置するLHCについて、陽子の衝突頻度を10倍に向上し、現行のLHCよりも広い質量領域での新粒子探索や暗黒物質の直接生成等を目指す国際共同プロジェクト。日本は、加速器及び検出器の製造に係る分担を通じて貢献。



南極地域観測事業 (情報・システム研究機構国立極地研究所)

南極の昭和基地での大型大気レーダー(PANSY)による観測等を継続的に実施し、地球環境変動の解明を目指す。オゾンホール発見など多くの科学的成果。



まとめ

- ハイパーカミオカンデで素粒子と宇宙の大きな謎に挑戦する
 - 物質（ブロック）を統一的に理解
 - 宇宙の物質がなぜ存在できたのかの謎
- 2020年建設開始、順調にいけば2027年実験開始を予定している