



XENON

暗黒物質探索への挑戦： 地下から探る宇宙の謎



東京大学カブリIPMU
山下雅樹

2025/04/13

東京大学宇宙線研究所 ×カブリ数物連携宇宙研究機構

第32回 春の合同一般講演会



本日の話

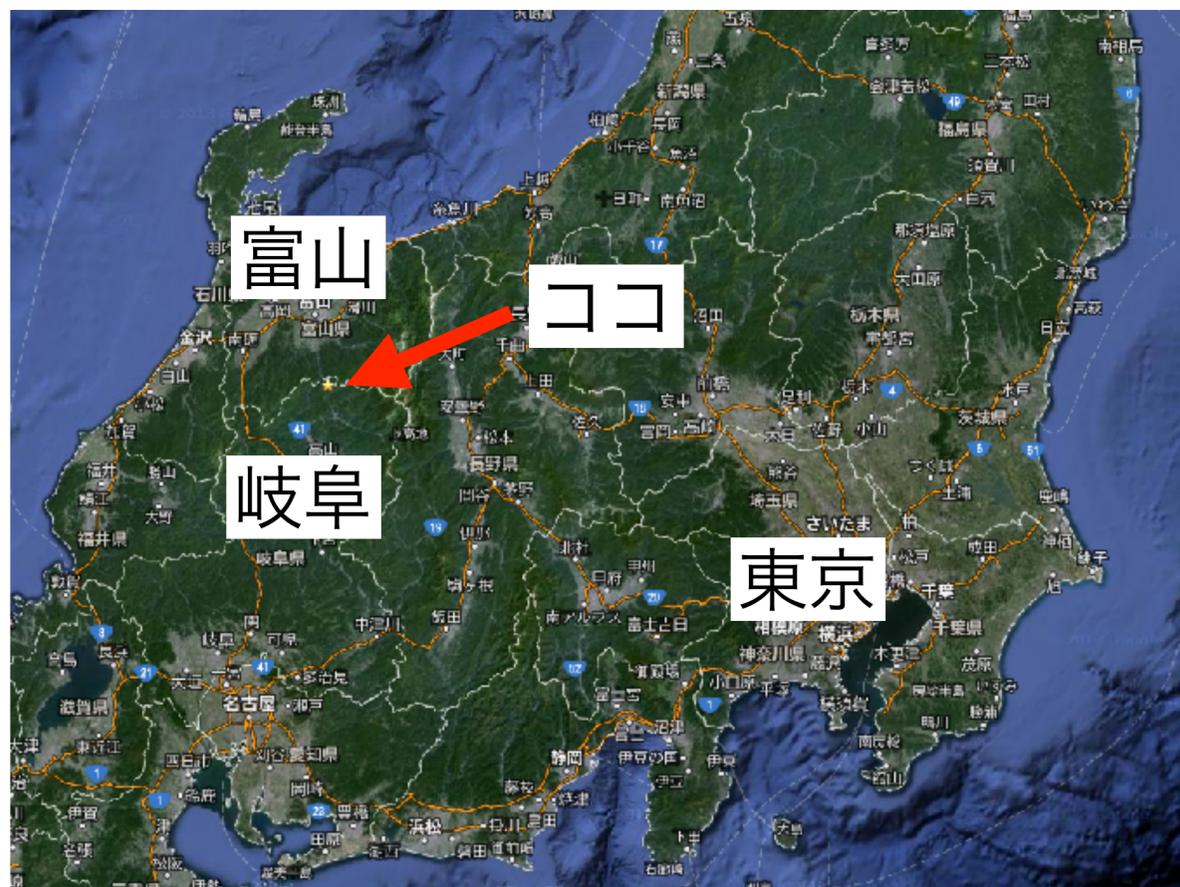
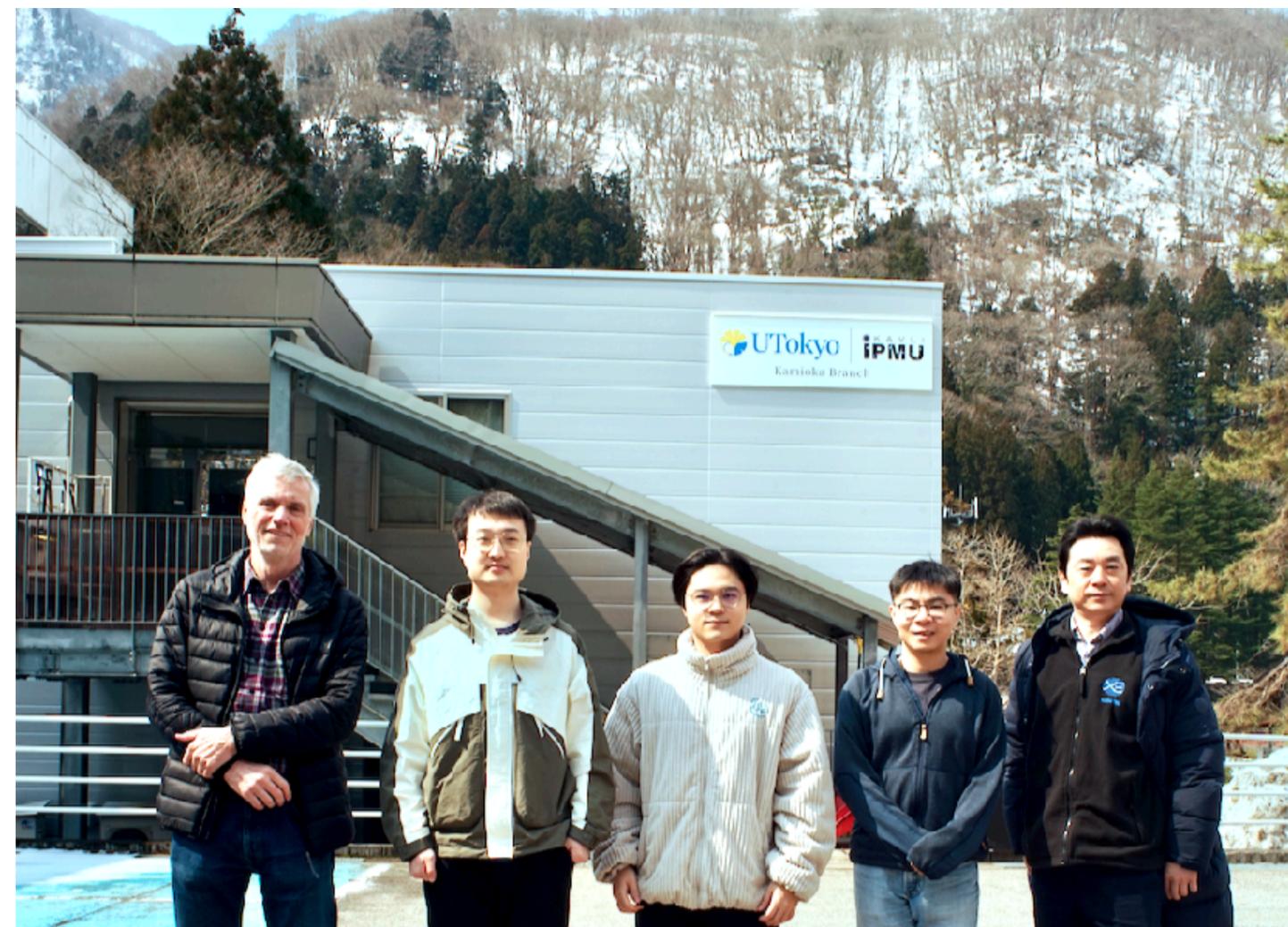
- 自己紹介
- 宇宙の歴史と暗黒物質
- 暗黒物質の探し方
- イタリアでのXENON実験
- 今後の展開



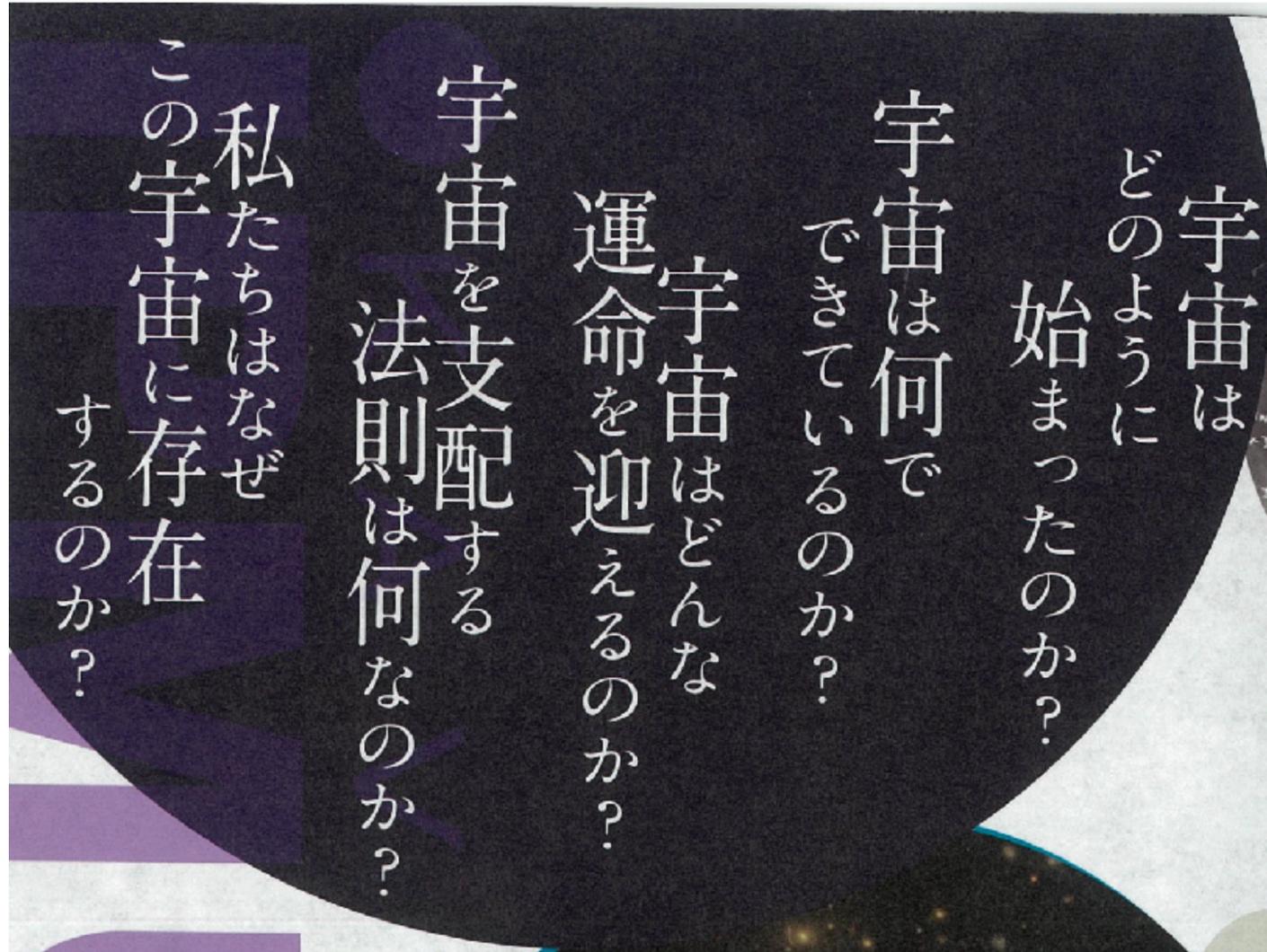
自己紹介

- 東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構
 - 神岡ブランチ (岐阜県飛騨市, 神岡地下実験のあるところ)
- 研究：
 - 宇宙素粒子実験 暗黒物質, ニュートリノなど

神岡ブランチ (岐阜県)



パンフレットより



もの知り新聞

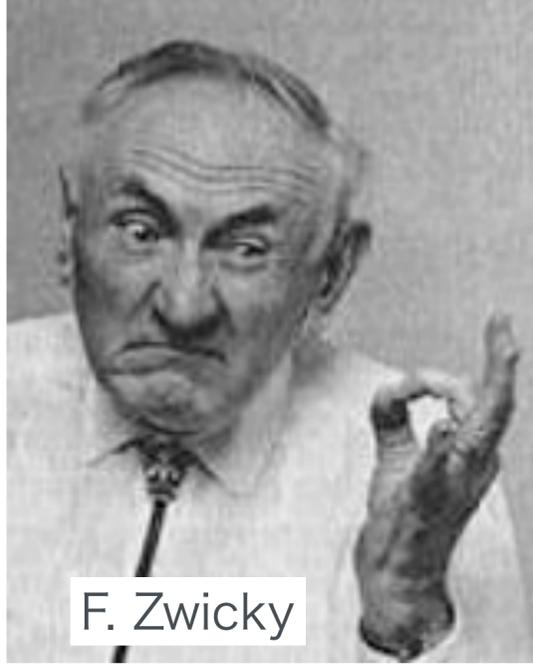


<https://www.ipmu.jp/sites/default/files/2023-10/monoshiri-16s.pdf>



宇宙の歴史と暗黒物質（ダークマター）

見えない暗黒物質の歴史



1933

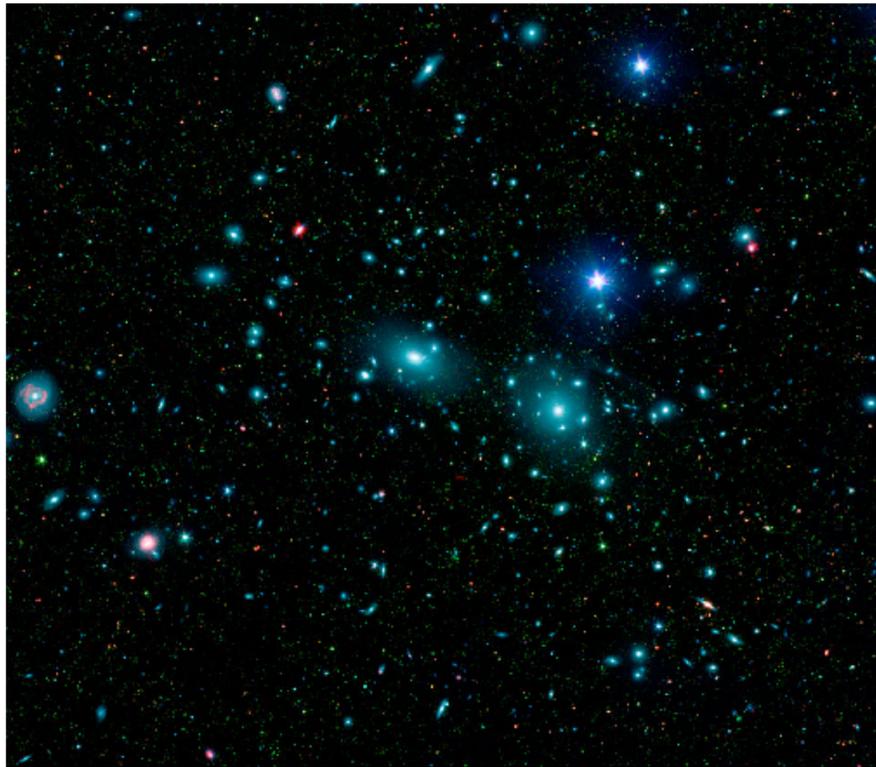
F. Zwicky

髪座銀河団の運動から見積もった重さと観測と大きな食い違い

400倍！重さが足りない。

目に見えない何かある？（暗黒物質）

かみのけ座銀河団



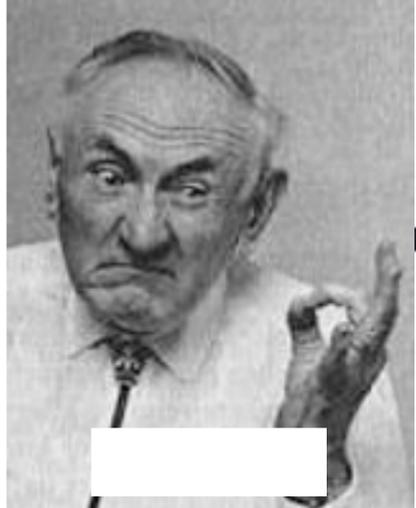
NASA / JPL-Caltech / L. Jenkins (GSFC)

NASA / JPL-Caltech / L. Jenkins (GSFC)

しかし、、、

観測技術が未熟で見えてないだけかも？

（彼自身変わり者だったらしい。。）



見えない暗黒物質の歴史



1933

F. Zwicky

髪座銀河団の運動から見積もった重さと観測と大きな食い違い

400倍！重さが足りない。

目に見えない何かある？（暗黒物質）

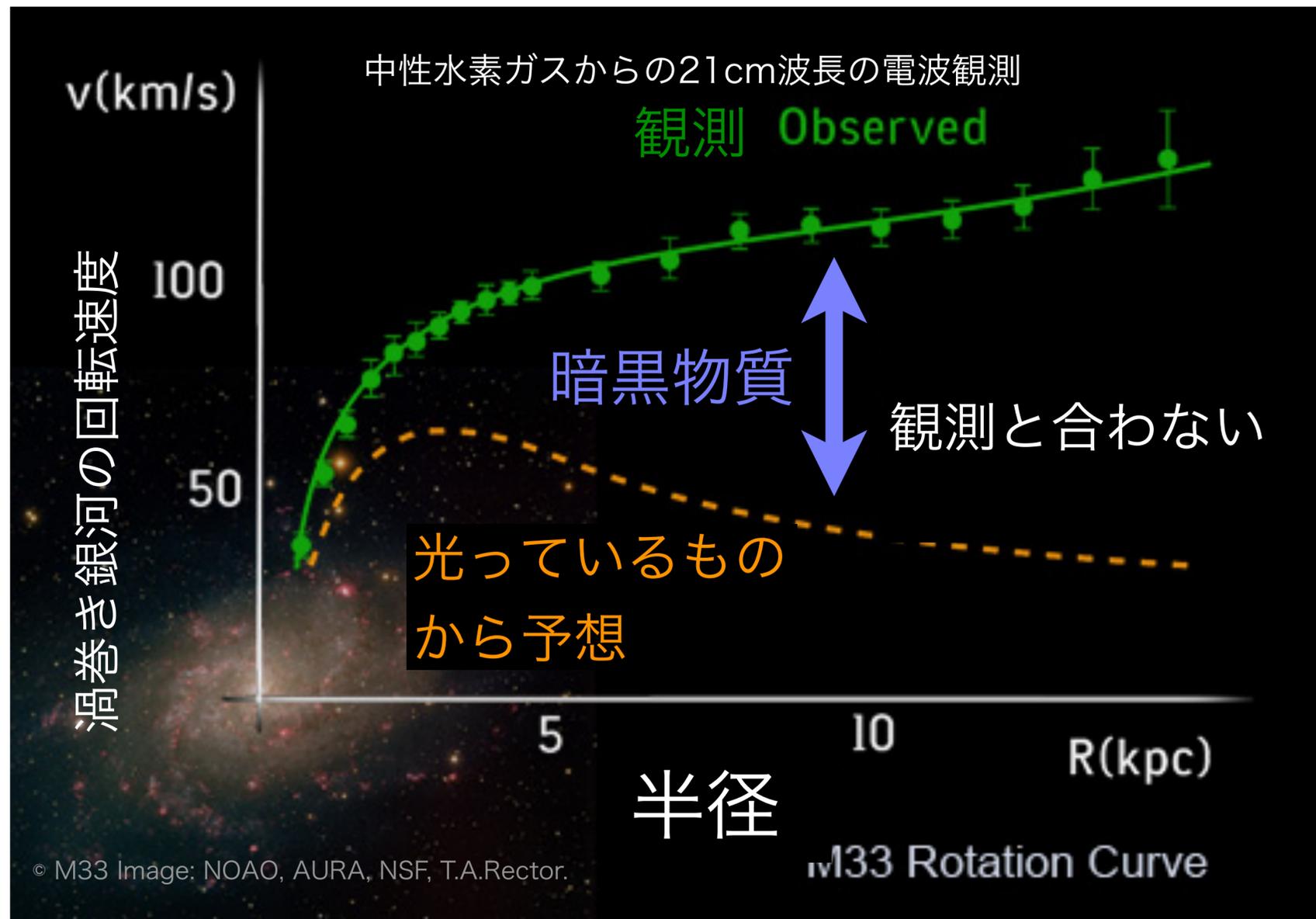
1970年後半

ヴェラ・ルービンらによる渦巻き銀河の回転速度

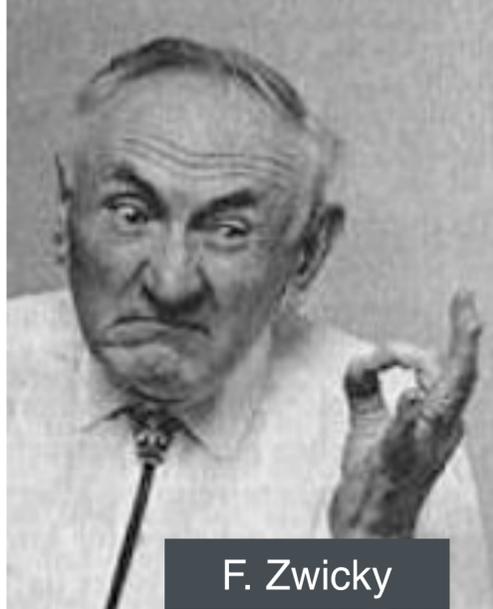
観測より大きな質量が存在しないと銀河の運動が説明できない。

それまでの光学による観測に代わって、
70年代後半に入って電波を用いた観測が発展。

ケプラーの法則から軌道の速度は計算できる



見えない暗黒物質の歴史



1933

F. Zwicky

髪座銀河団の運動から見積もった重さと観測と大きな食い違い
400倍！を指摘 → 重さが足りない。

目に見えない何かある？（暗黒物質）

1970年後半

ヴェラ ルービンらによる 渦巻き銀河の回転速度

観測より大きな質量が存在しないと銀河の運動が説明できない。

1989-1993

COBEによるCMBの観測（人工衛星）

2001-2010

WMAPによるCMBの観測（人工衛星）

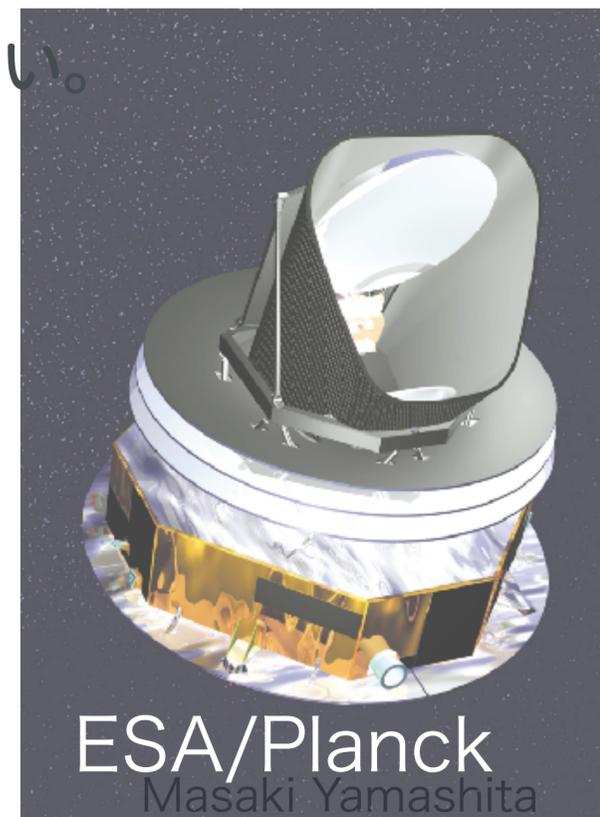
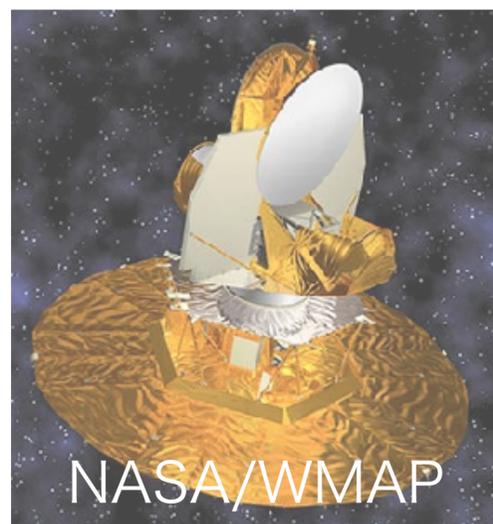
2009-2013

PlanckによるCMBの観測（人工衛星）

Cosmic Microwave Background

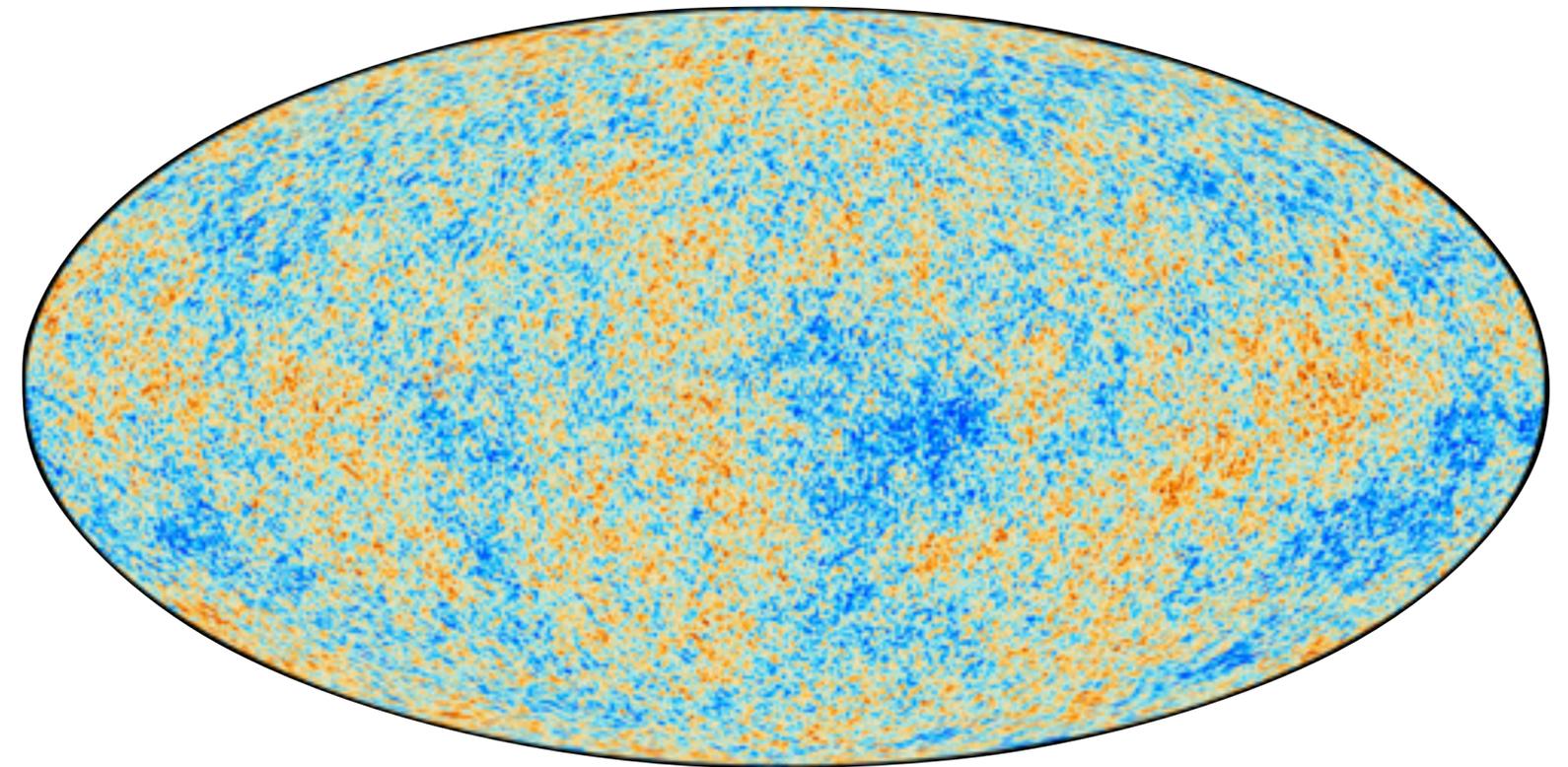
宇宙マイクロ波背景放射

=> 138億年前の光の痕跡



- 宇宙初期 (38万歳) の姿のスナップショット
- いろんなことが分かった
 - 最初にちょっと密度がゆらいでいた
 - (10万分の1程度の温度の揺らぎ)
- 宇宙の年齢 **138億年**
- **宇宙の中身** などなど

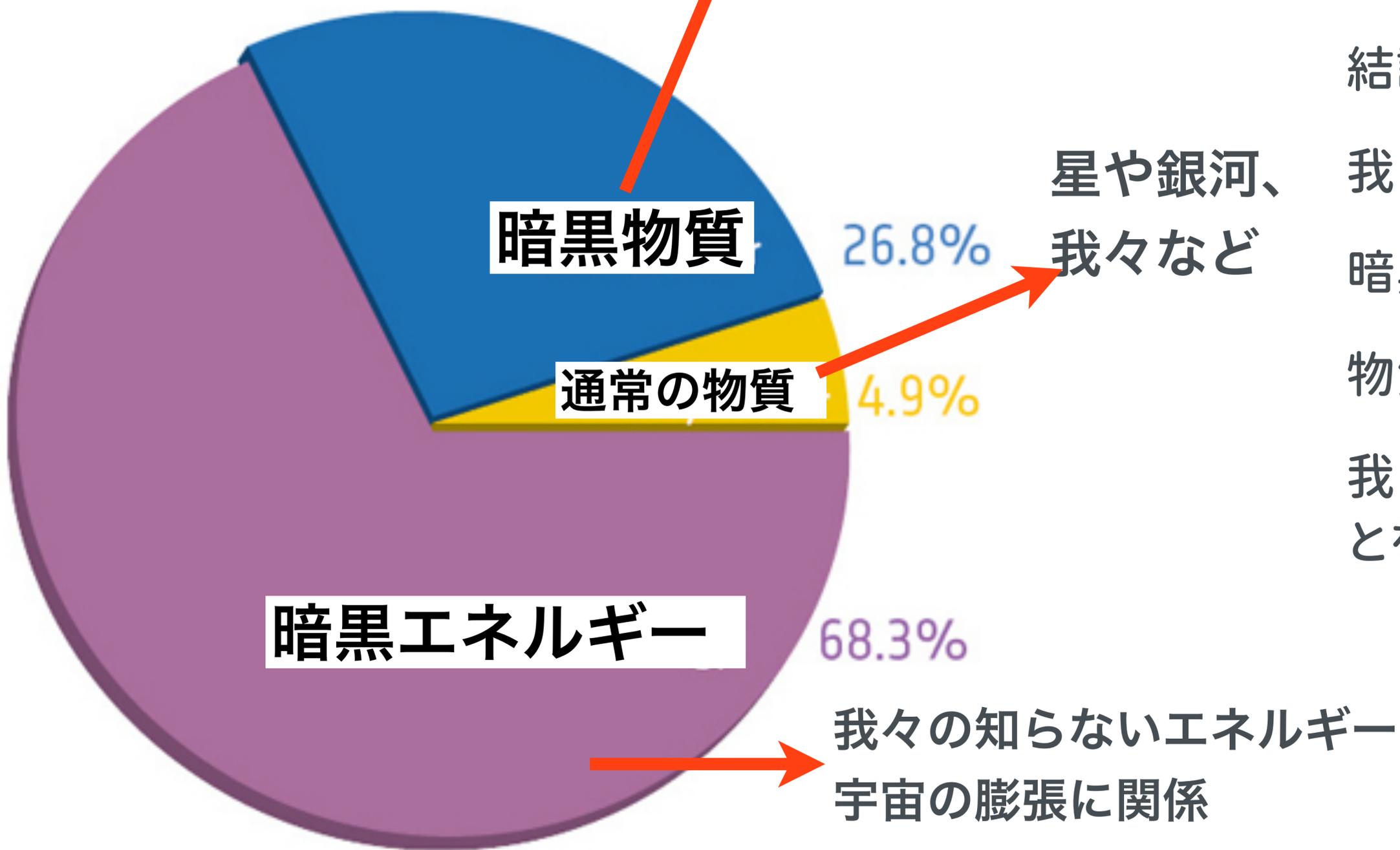
宇宙38万歳の温度の揺らぎ



PLANCK

さらに宇宙のレシピ！

我々の知らない物質



結論：

我々の知っている物質はたった5%

暗黒物質+暗黒エネルギー 95%

物質の80%は暗黒物質

我々は宇宙のほとんどを知らないことを知った。。。。

さらに宇宙のレシピも！

我々の知らない物質

星や銀河、 結論：

る物質はたった5%
黒エネルギー 95%
暗黒物質
のほとんどを知らないこ
。

宇宙のテスト

氏名: 地球人

5点 →

ダー

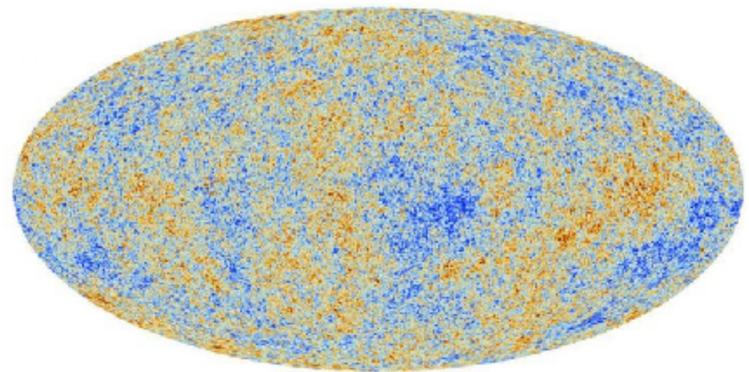
宇宙の膨張は

このゆらぎが何を引き起こしたのか？

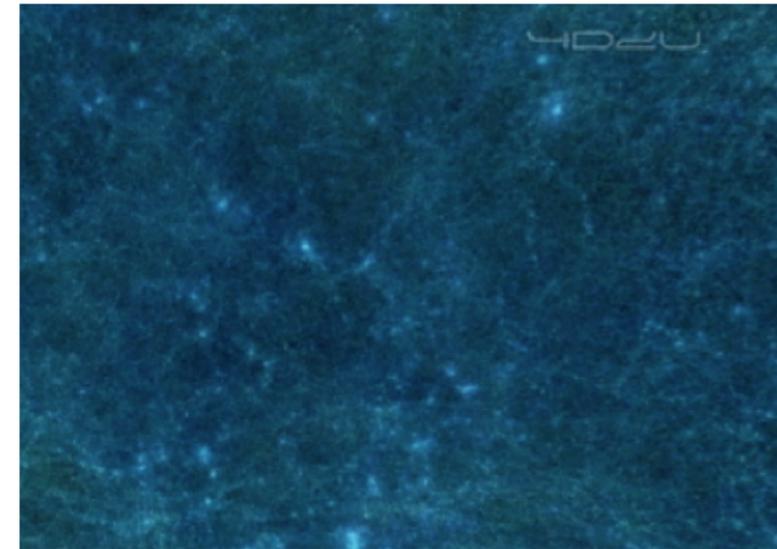
時間

138億年前

現在



138億年前
(38万年歳)



密度の揺らぎ

ダークマターが集まる

塵やガスが集まり、星、銀河できる

我々が誕生

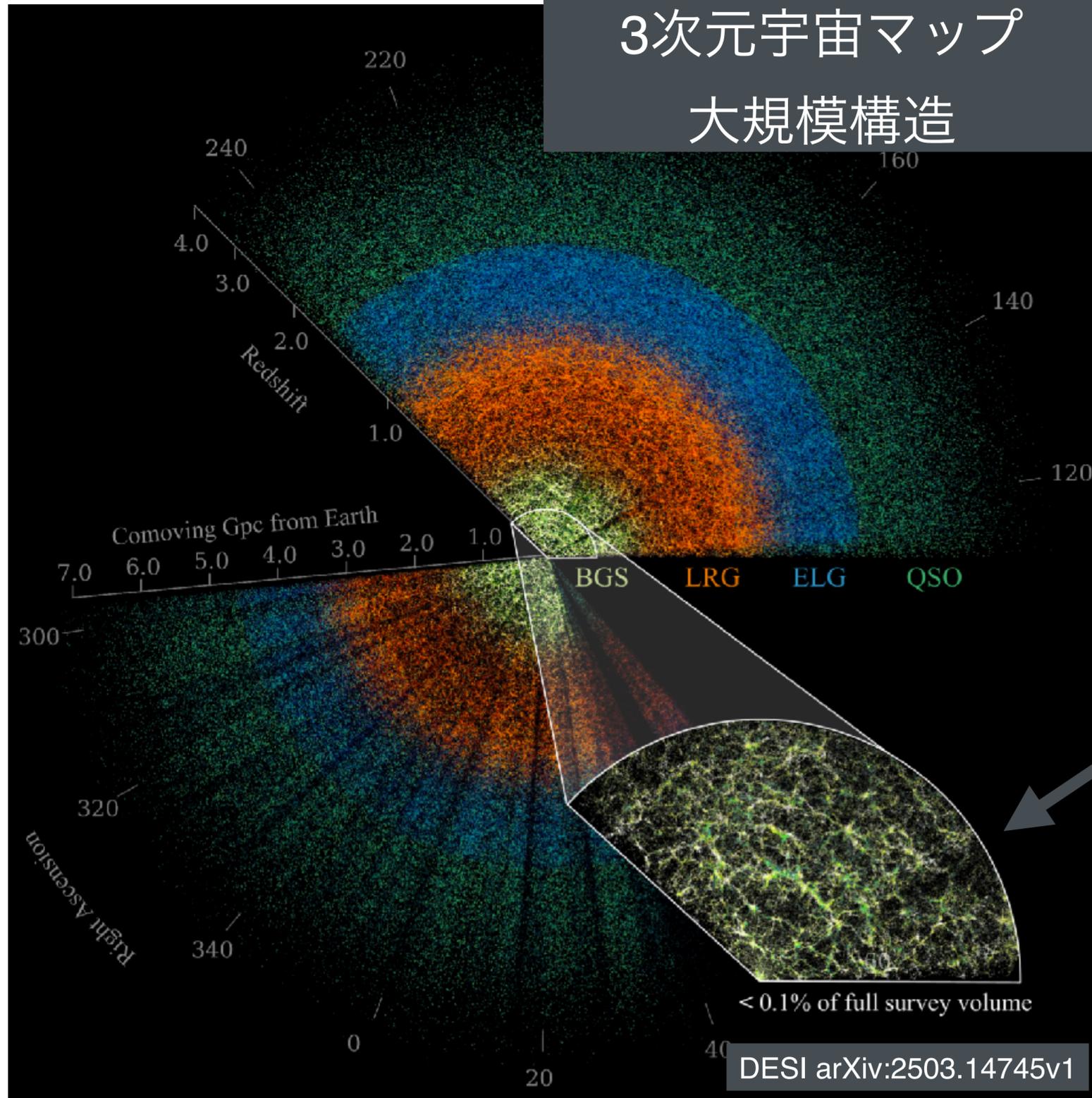
宇宙の歴史に欠かせない存在

4D2U Project, NAOJ

シミュレーション

現実はい？ 最新の宇宙マップ

3次元宇宙マップ
大規模構造



現在



4D2U Project, NAOJ

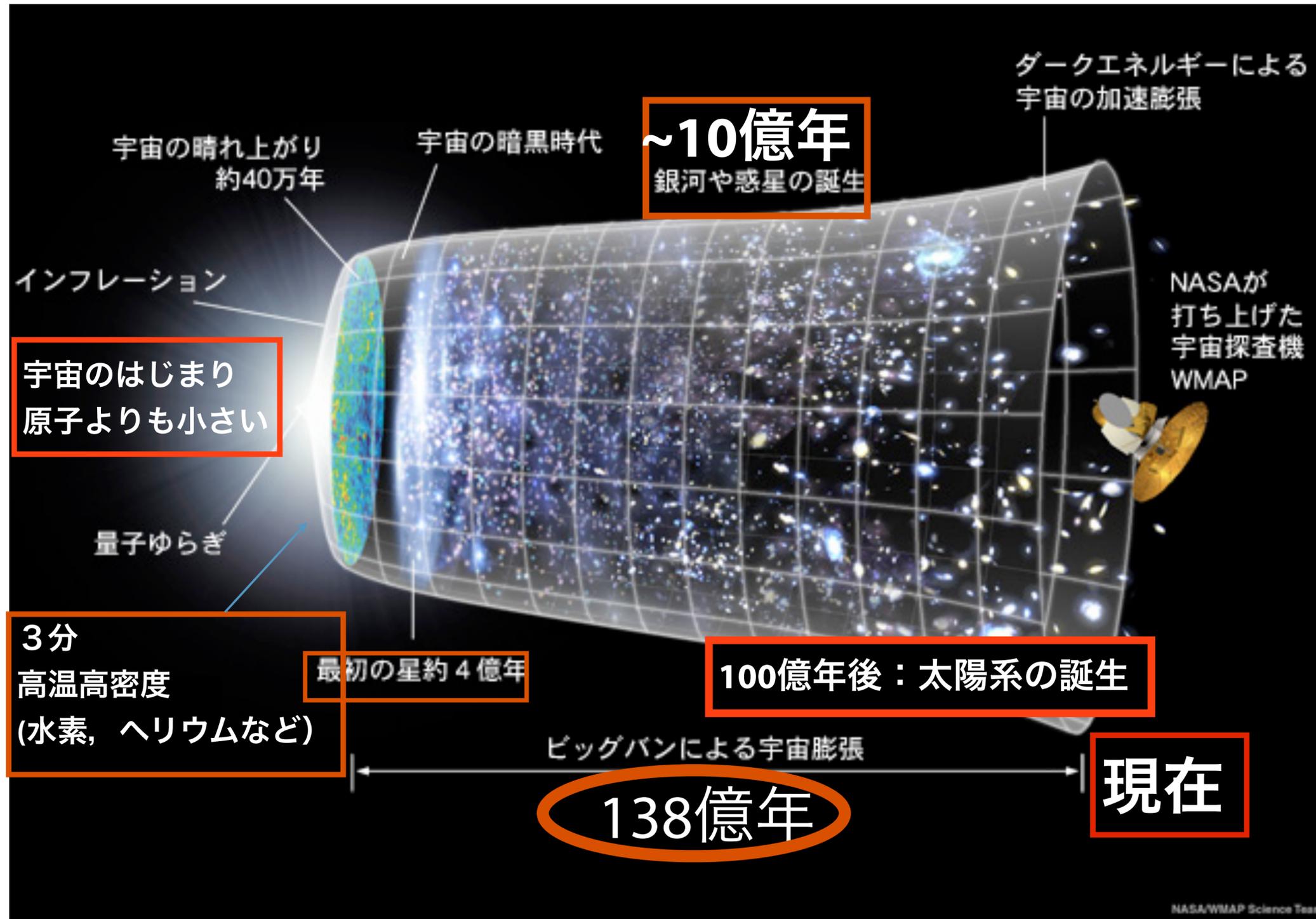
ムラムラにあつまるということは身近にも



衛星による夜景写真

NASA: visible earth

宇宙の歴史



キツネが王子さまに語ったこと

「…大切なものは目にみえないんだ。」

「僕たちの家でも、星でも、砂漠でも、その美しさのもとになるものはめに見えないんだね…」



1943

見えないけれど、そこにあるもの

暗黒物質は目に見えません。光を発しないし、吸収もしない。
けれど、宇宙の構造を形づくり、銀河を結びとめる“もの”として確かに存在しています。

暗黒物質の探し方



- 中性である
 - 電荷をもたない
- 陽子や中性子ではない
 - 宇宙背景放射，弱い相互作用
- 冷たい（ゆっくり動いている。）
 - 大規模構造をつくります
- 安定，または長い寿命（138億年）

暗黒物質の候補

- ニュートリノ
 - 原始ブラックホール
 - アクシオン
 - Weakly Interacting Massive Particle (**WIMP**)
- 弱い相互作用をする大質量粒子

• 予言された新粒子？

- 素粒子標準模型最後のヒッグス粒子が発見され標準モデル粒子はすべて揃ったがこのどれにも当てはまらない。

宇宙物理だけでなく素粒子物理にとっても重要

WIMPが有力候補と考えられる理由

理由

- ・宇宙初期に他の粒子と同じように熱的に生成されるシナリオ
 - 宇宙の熱い時に生成され
 - 宇宙の膨張によって温度が下がり残る
 - 大きな成功を収めているので、極めて自然な仮説
 - ビッグバン元素合成** (水素やヘリウムなど最初の三分)
 - 宇宙マイクロ放射の晴れ上がり**
- ・他の物質といっしょに振る舞い同じ温度
 - => **標準模型の素粒子と相互作用するはず。**

ダイヤモンドダスト
(水蒸気が凍る)



Government of Japan

素粒子

- ・標準理論を超えた理論で自然と出てくる粒子
 - 例えば超対称性理論

暗黒物質探索方法

直接探索

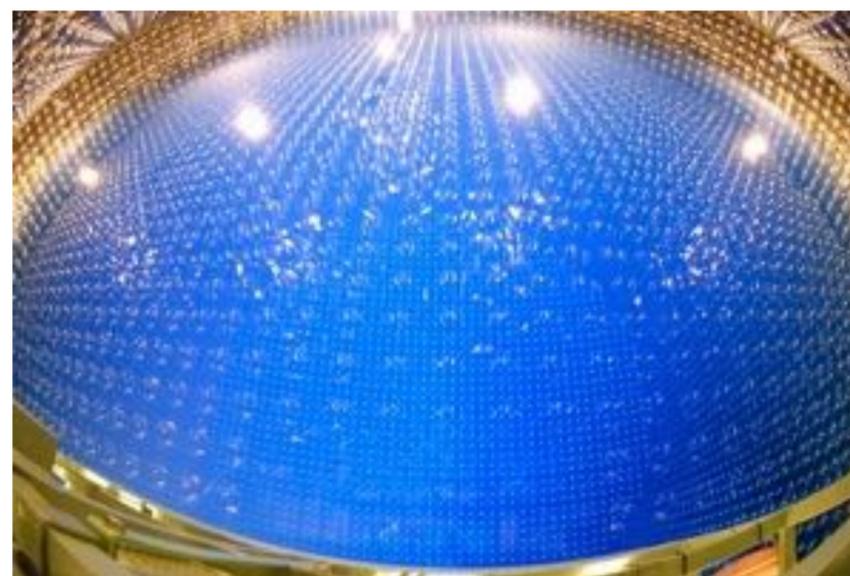


我々の身の回りにも
暗黒物質物質が飛んでるはず!

XENON実験など

暗黒物質が直接物質を
叩いたときの信号を捉える

間接探索



スーパーカミオカンデ
ハイパーカミオカンデなど

太陽や銀河中心で
暗黒物質が対消滅したときに
生成した粒子を捉える
(ニュートリノ, 陽電子など)

加速器探索



LHC (Atlas) など

大きなエネルギーを
つくって無理やりつくる
宇宙初期を再現

XENON実験の紹介



XENON コラボレーション



XENON

- 200+ 人
- 30研究機関
- 12ヶ国

7:00



16:00



0:00



AMERICA

- UC San Diego
San Diego
- Houston
- THE UNIVERSITY OF CHICAGO
Chicago
- COLUMBIA UNIVERSITY
New York City
- PURDUE UNIVERSITY
Lafayette



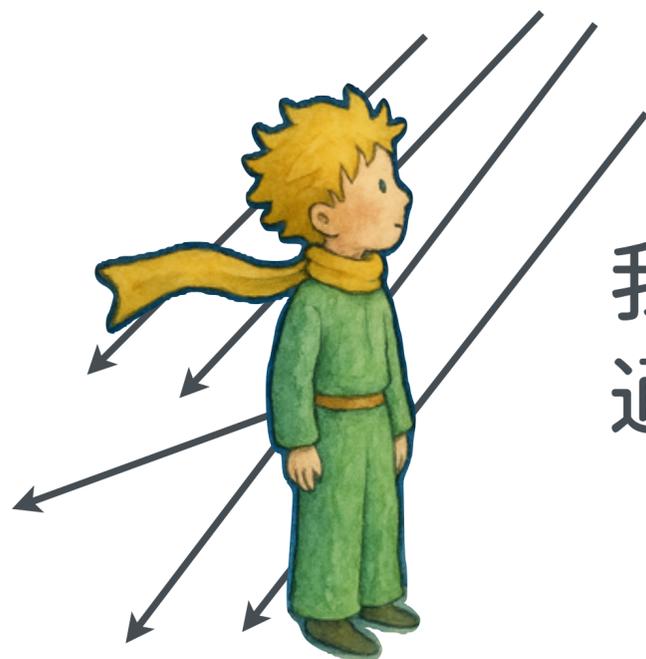
ASIA

- 清華大學
Beijing
- 西湖大學
Hangzhou
- Shenzhen
- 東京大学
Tokyo
- NAGOYA UNIVERSITY
Nagoya
- KOBE

- Zurich
- KIT Karlsruhe Institute of Technology
- Universität Münster
- UNI FREIBURG
- JGU Mainz
- MAD-PLANCK-INSTITUT FÜR KERNSPEKTROSKOPIE HEIDELBERG
- HEIDELBERG
- Nikhef Amsterdam
- Stockholm University Stockholm
- UNIVERSIDADE DE COIMBRA
- Subatech Nantes
- LPNHE PARIS
- INFN TORINO
- INFN BOLOGNA
- INFN L'AQUILA
- INFN ASSERGI
- INFN NAPOLI

- WEIZMANN INSTITUTE OF SCIENCE Rehovot
- NYU ABU DHABI Abu Dhabi

身の回りの暗黒物質はどのくらいか？



我々の気づかない間に体を**毎秒何十億もの暗黒物質が通過しているが、10年に1回も反応しない。**

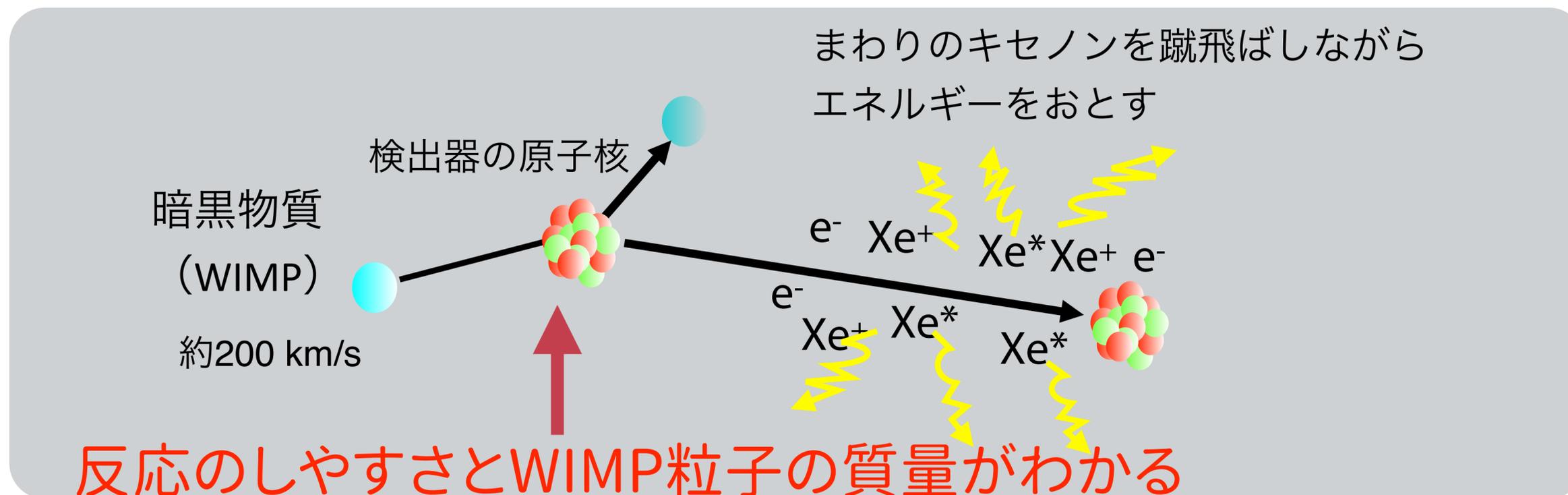
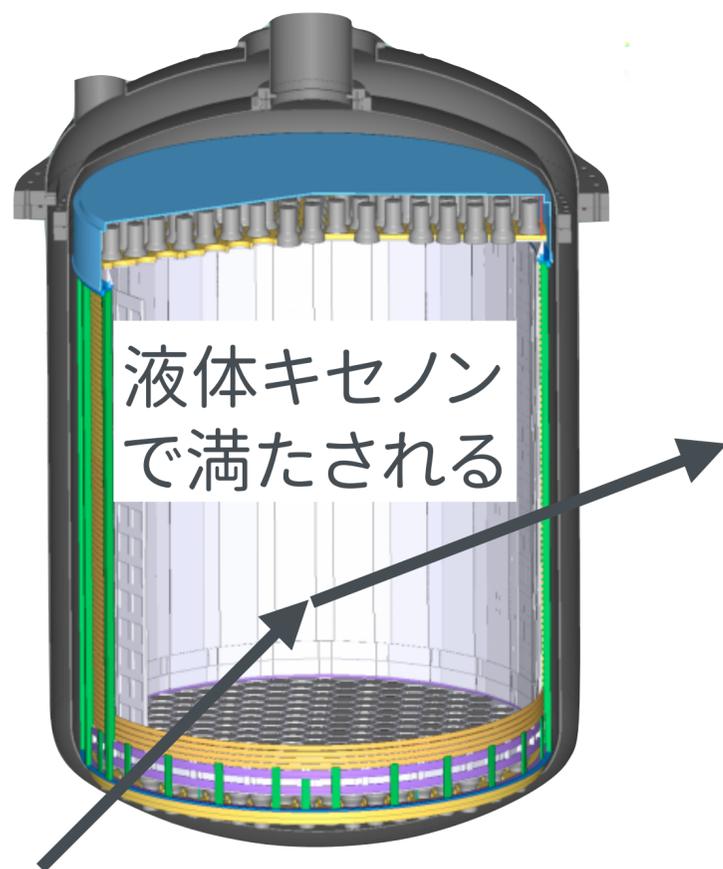


暗黒物質の質量を水素の100倍くらいと考えると
地球近傍で1Lに**数個**存在するくらいの密度

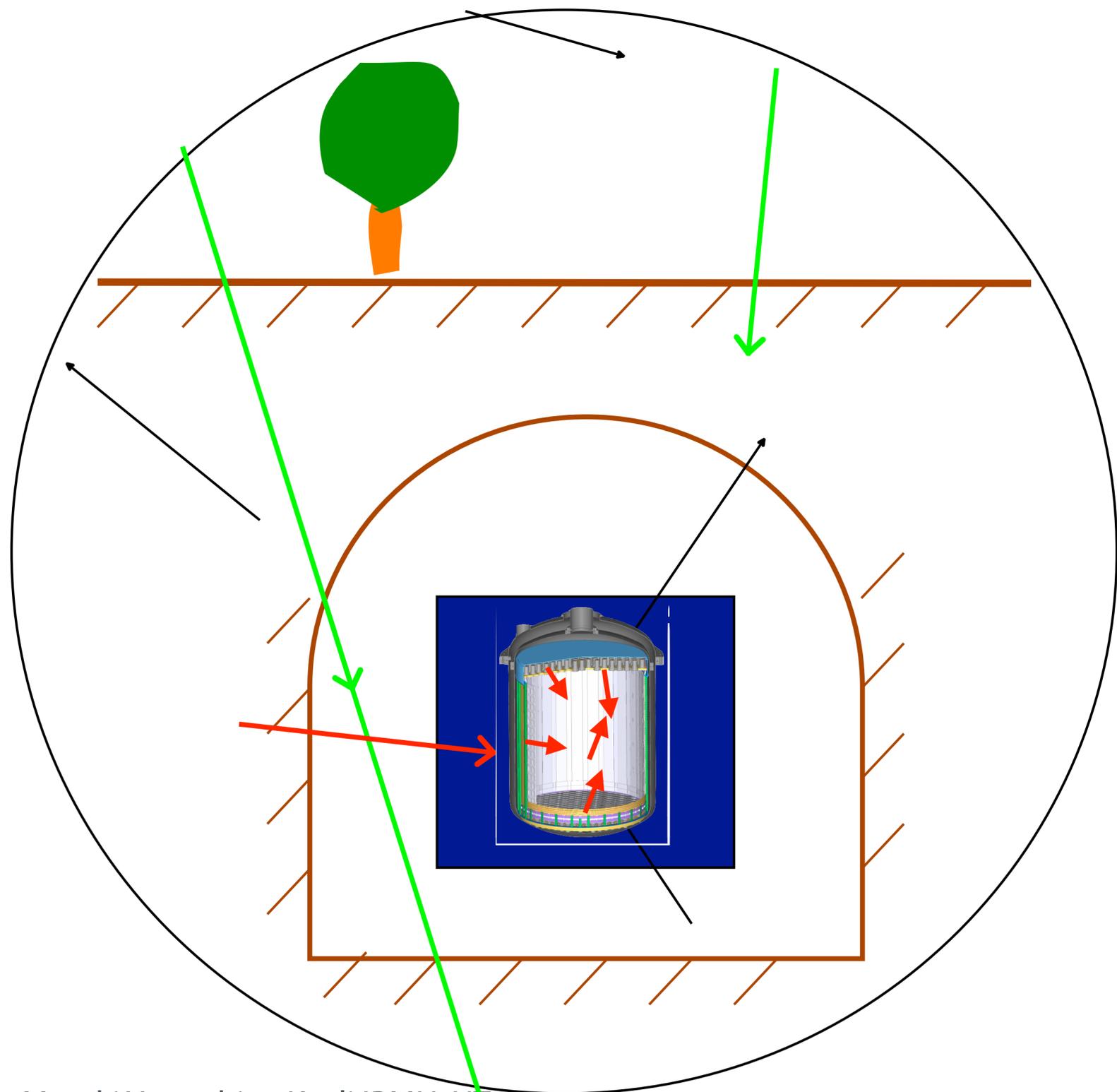
稀にしか反応しない暗黒物質をどうやってとらえるか？

暗黒物質直接探索原理

ビリヤードの用に暗黒物質によって蹴飛ばされた信号を使う



稀にしか反応しないので



- 標的を大きく。

- 検出の大型が必要。(トンスケール)

- ノイズを減らす。特に自然にある放射線が大きな問題。

- 地下, 遮蔽隊でブロック

- 高純度の材料

XENON実験の歴史 (大きくしてきた)

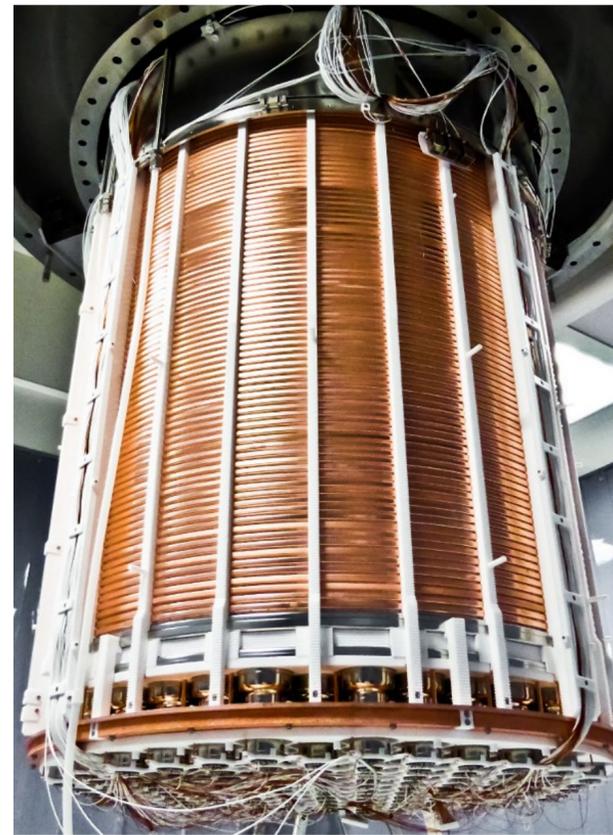
XENON10



XENON100



XENON1T



XENONnT



2005-2007

25 kg - 15cm drift

$\sim 10^{-43}$ cm²

2008-2016

161 kg - 30 cm drift

$\sim 10^{-45}$ cm²

2012-2018

3.2 ton - 1 m drift

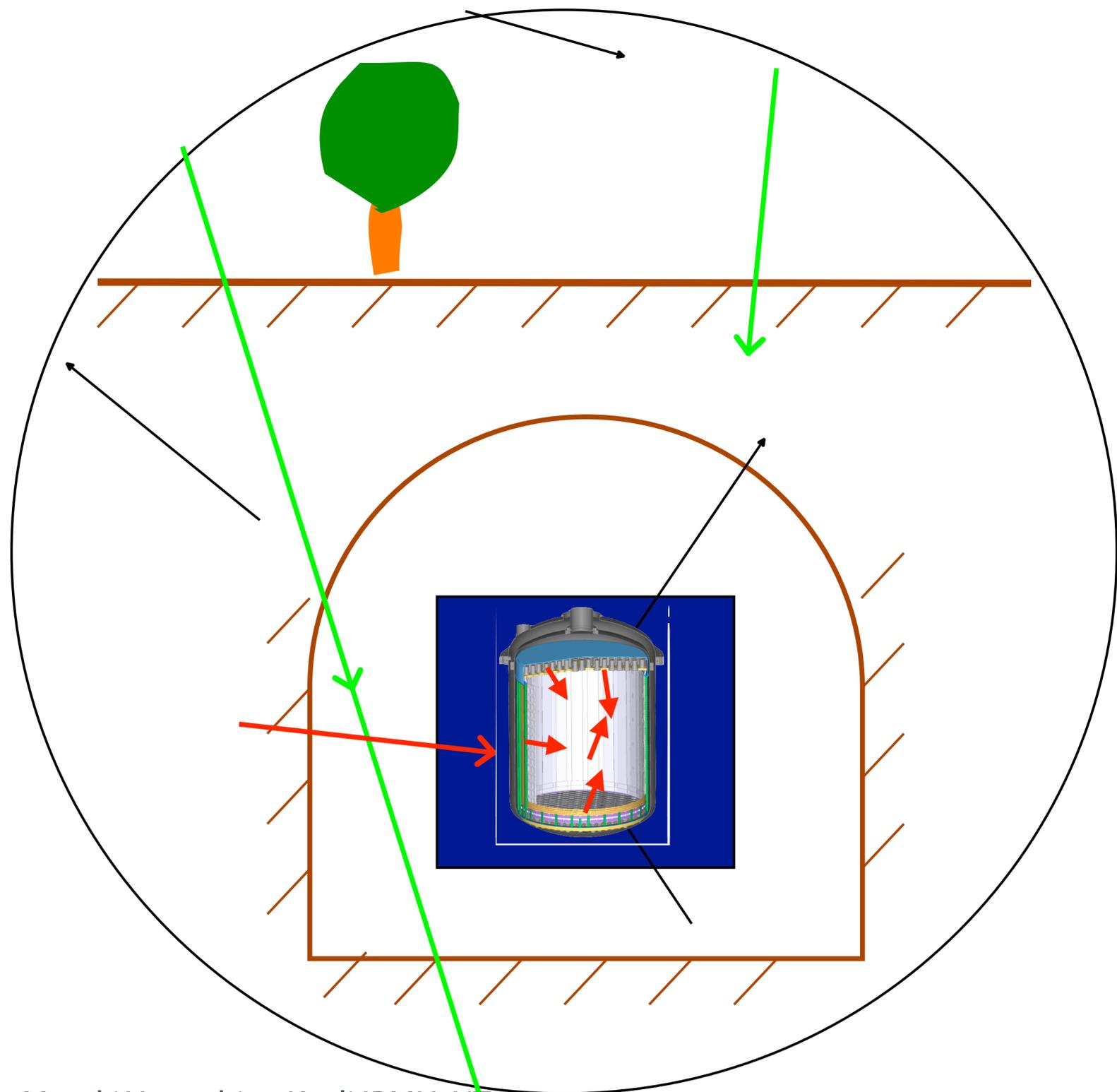
$\sim 10^{-47}$ cm²

2019-202x

8.6 ton - 1.5 m drift

$\sim 10^{-48}$ cm²

稀にしか反応しないので



- 標的を大きく。
- 検出の大型が必要。(トンスケール)

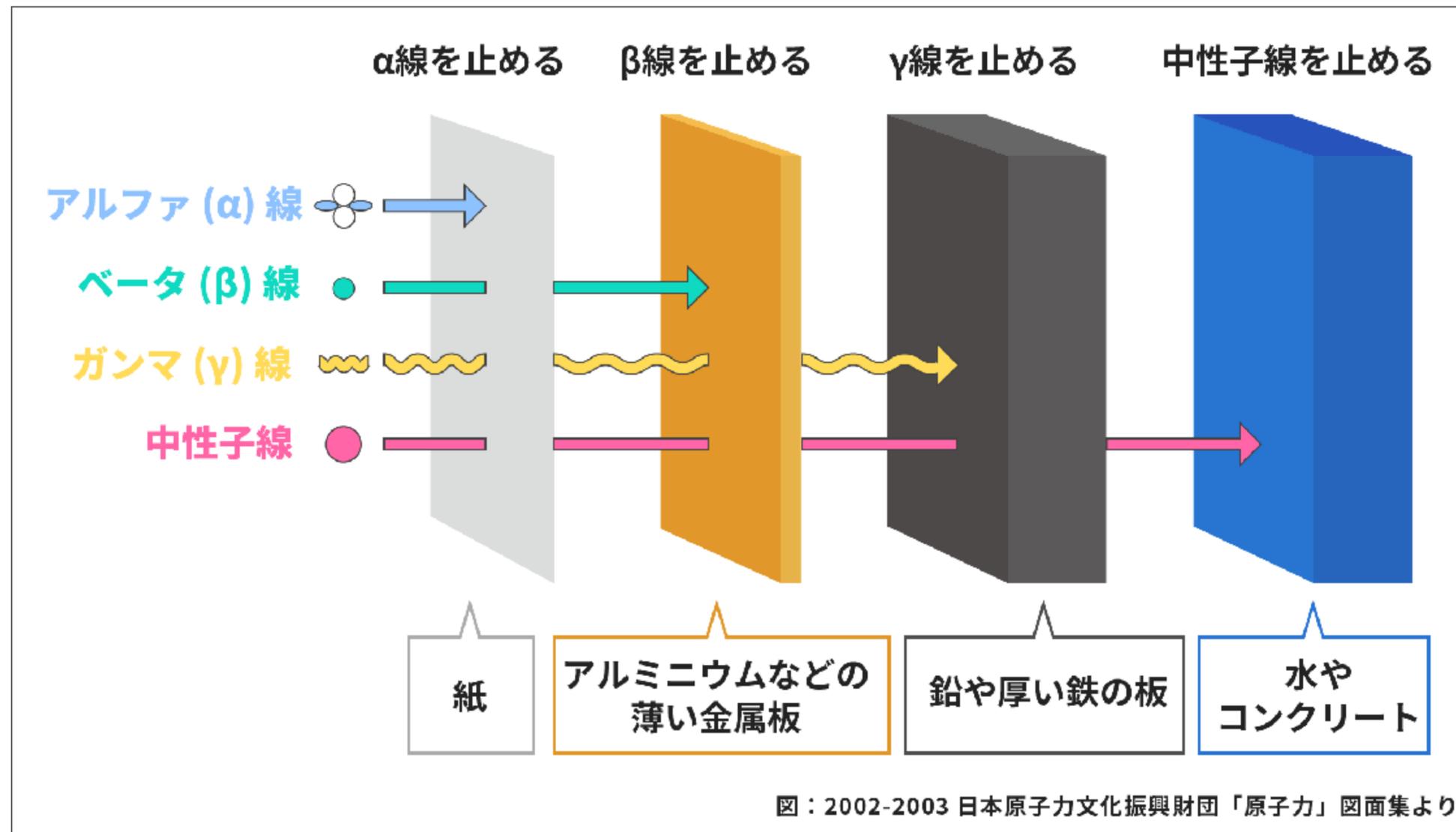
- ノイズを減らす。特に自然にある放射線が大きな問題。
 - 地下，遮蔽隊でブロック
 - 高純度の材料

放射線とは？

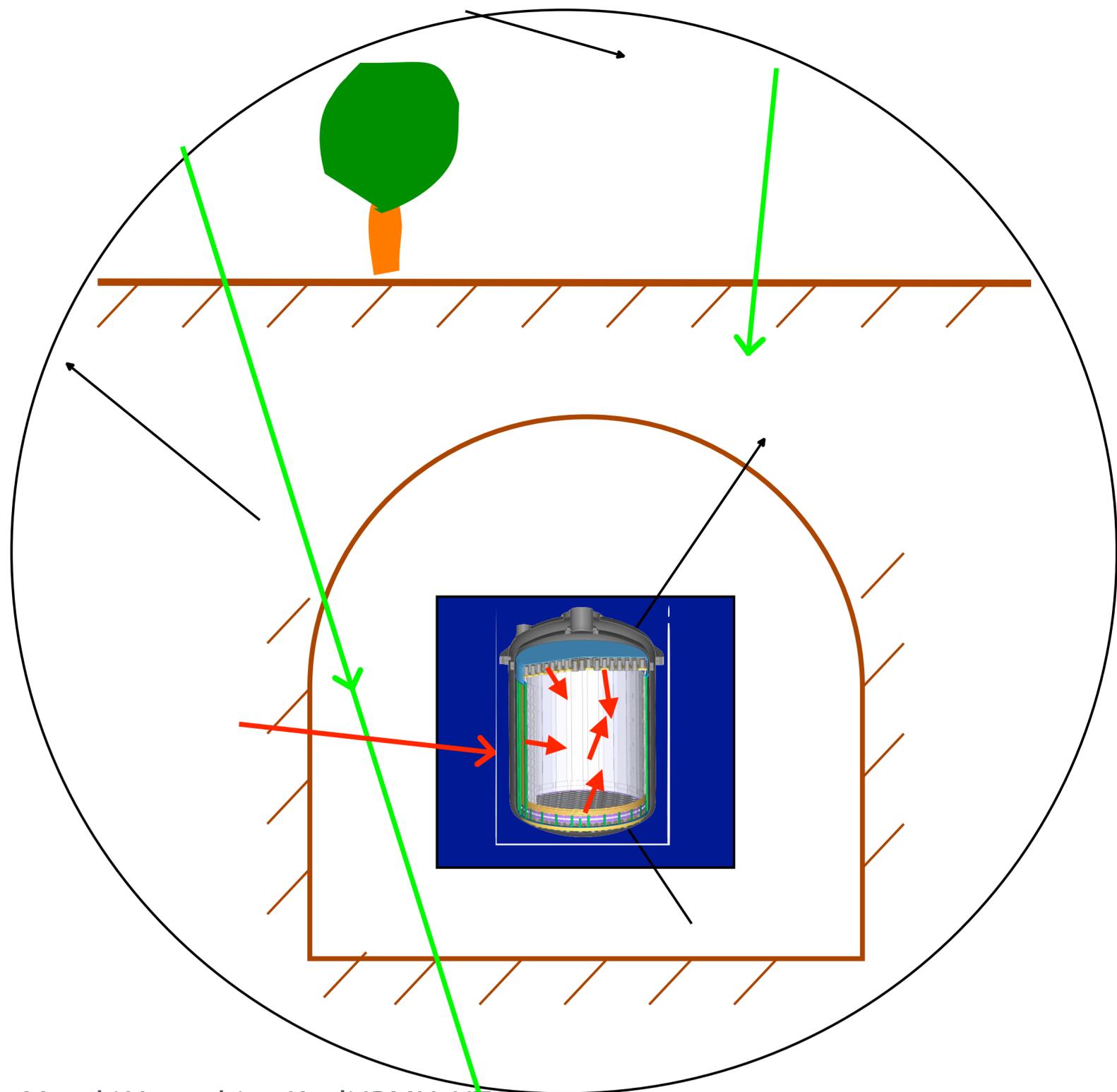
エネルギーの高い粒子または電磁波。

物質を透過し、電離作用（イオン化）をもたらすものを指す。

自然界では不安定な原子核が崩壊すると出る



稀にしか反応しないので



- 標的を大きく。
- 検出の大型が必要。(トンスケール)

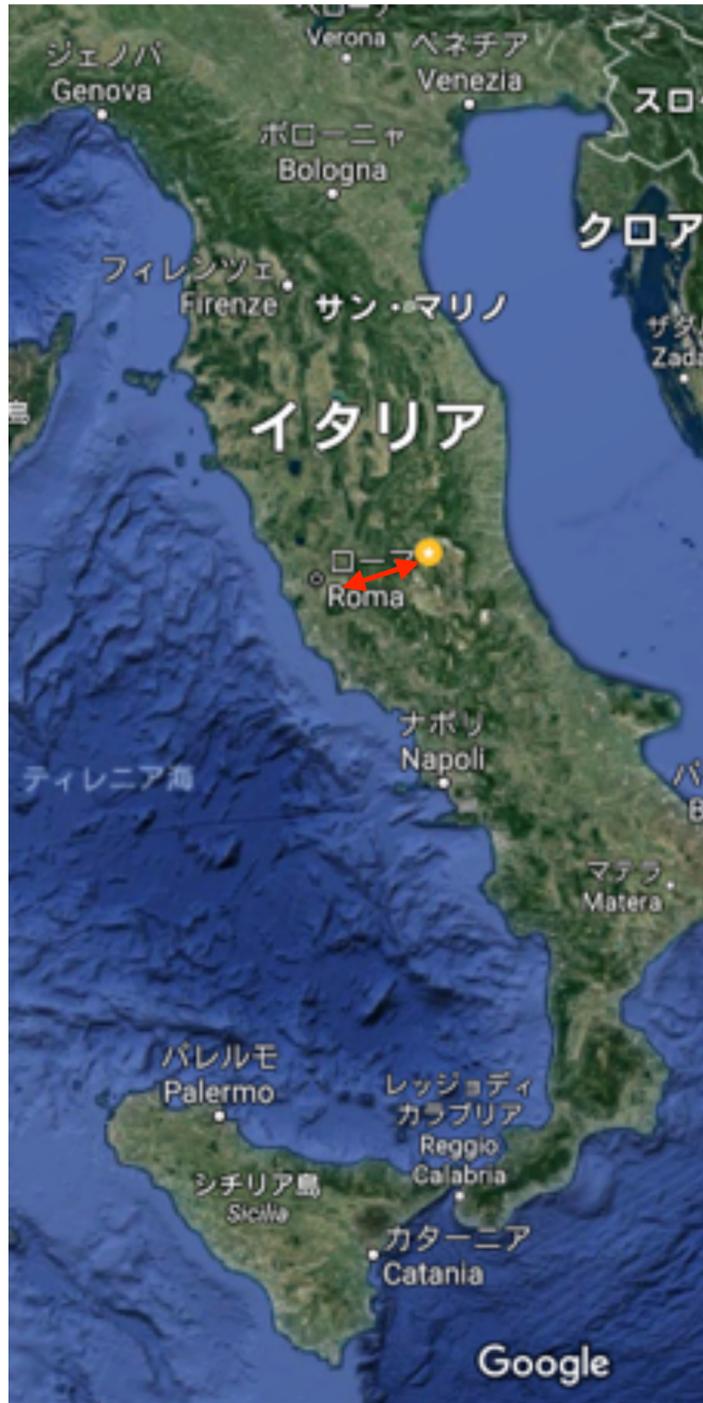
- ノイズを減らす。特に自然にある放射線が大きな問題。
 - 遮蔽隊でブロック. 高純度の材料
 - 地下に設置



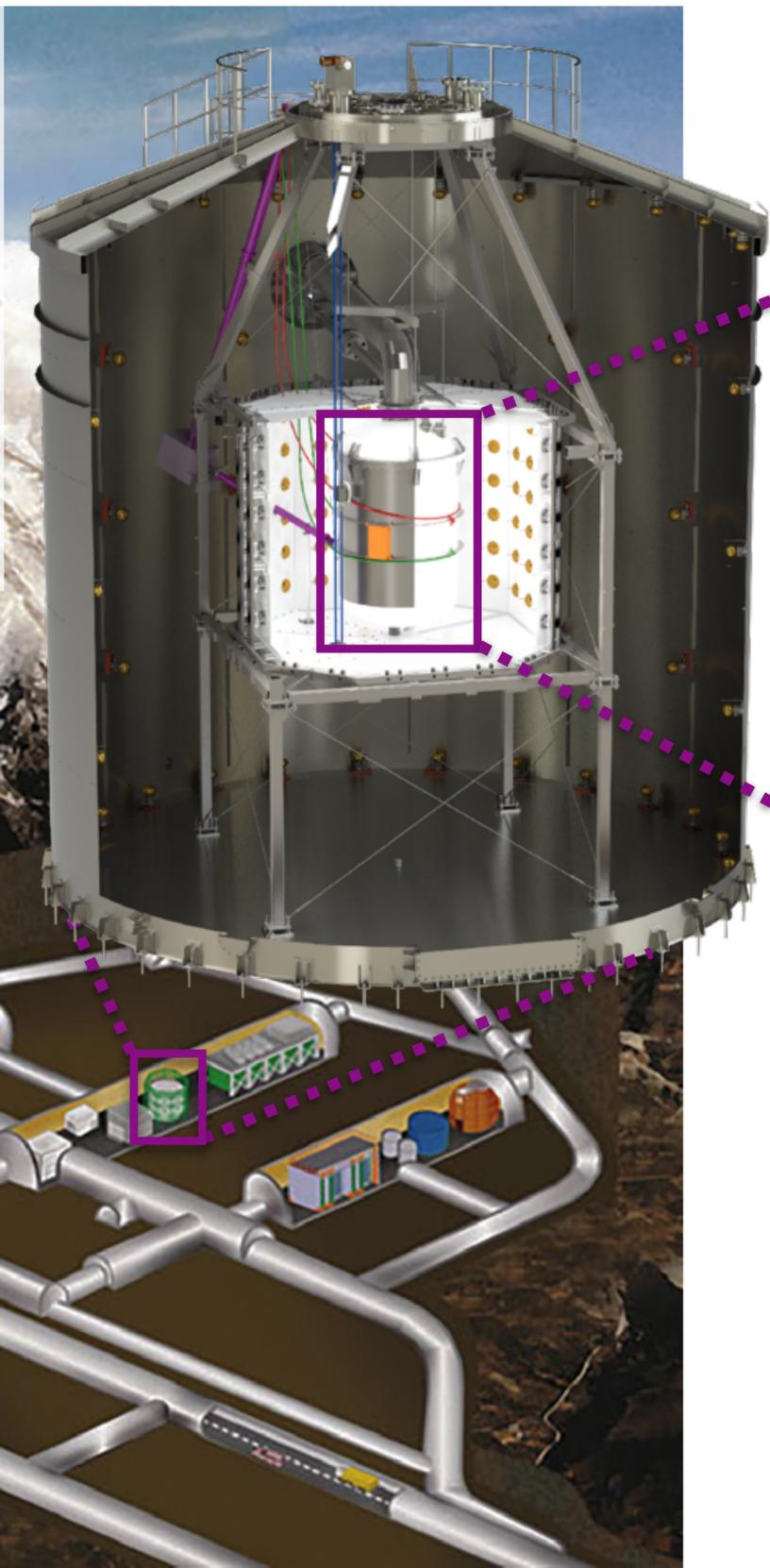
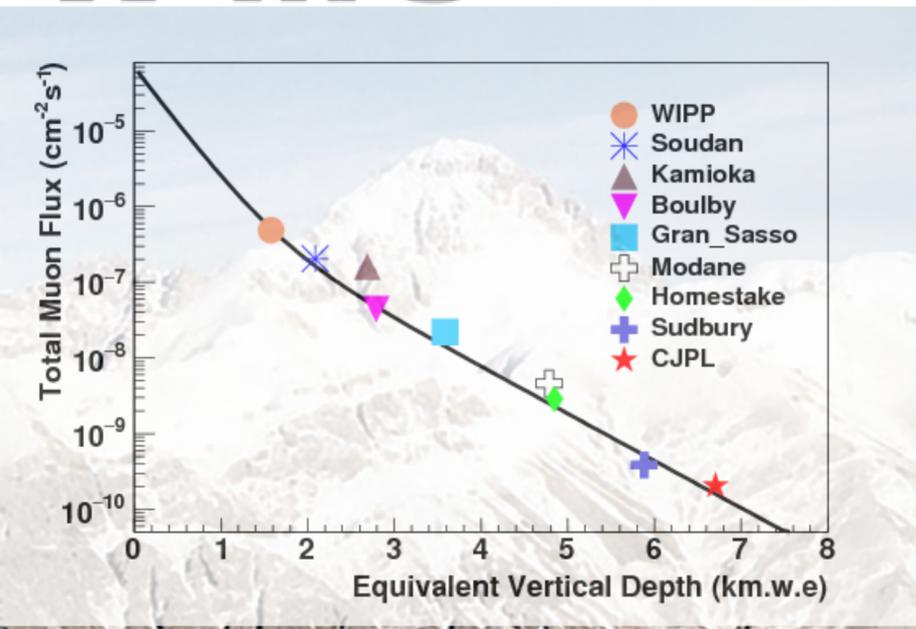
- ローマから120 km (アブルツォ州)
- グランサツソ (2,914 m)
- 実験施設 地下1400 m
 - 宇宙線が地上にくらべ**100万分の1**
- 10 km の高速道路の真ん中にある

LNGS, about 3600 m water equivalent

Passo in Italy



XENONnT Under the Gran Sasso Shield



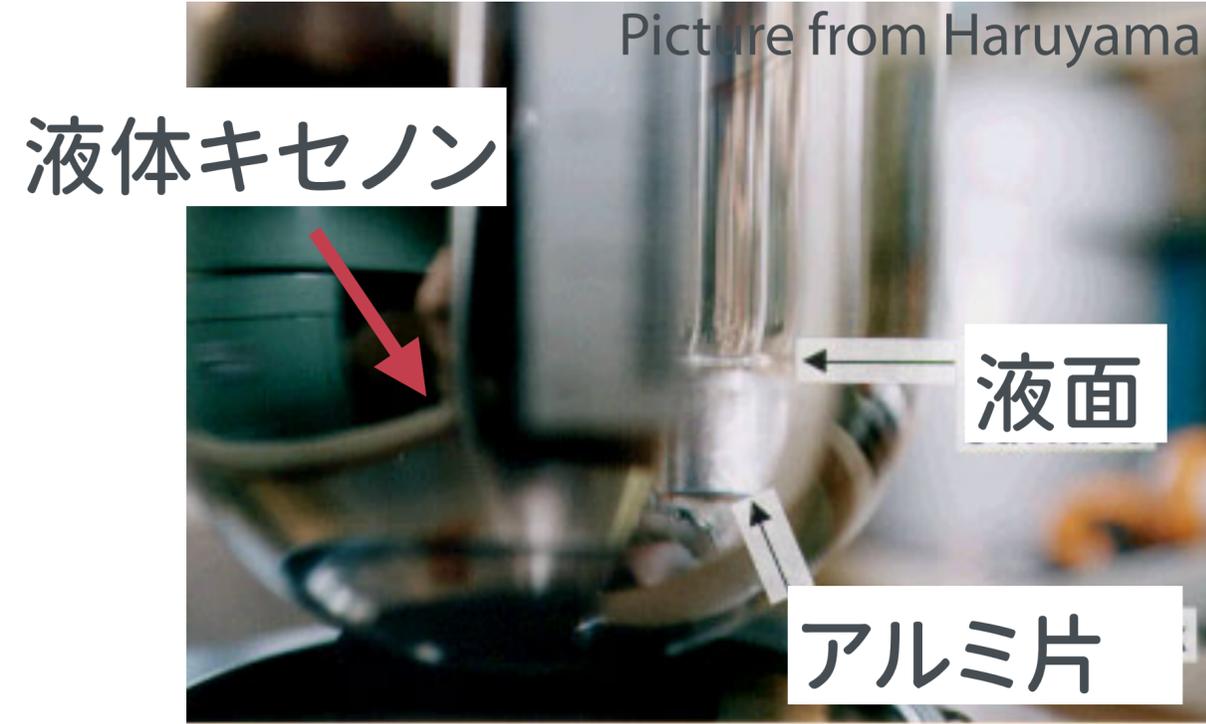
+4.9 kV
+0.3 kV
-2.75 kV

どうして液体キセノンがつかわれるのか？

Aluminum block floating in liquid xenon (picture)

1 H Hydrogen 1.008																	2 He Helium 4.002602
3 Li Lithium 6.94	4 Be Beryllium 9.0121831											5 B Boron 10.81	6 C Carbon 12.011	7 N Nitrogen 14.007	8 O Oxygen 15.999	9 F Fluorine 18.99840323	10 Ne Neon 20.1797
11 Na Sodium 22.98976928	12 Mg Magnesium 24.305											13 Al Aluminium 26.9815385	14 Si Silicon 28.085	15 P Phosphorus 30.973761998	16 S Sulfur 32.06	17 Cl Chlorine 35.45	18 Ar Argon 39.948
19 K Potassium 39.0983	20 Ca Calcium 40.078	21 Sc Scandium 44.955908	22 Ti Titanium 47.887	23 V Vanadium 50.9419	24 Cr Chromium 51.9961	25 Mn Manganese 54.938044	26 Fe Iron 55.845	27 Co Cobalt 58.933194	28 Ni Nickel 58.6934	29 Cu Copper 63.546	30 Zn Zinc 65.38	31 Ga Gallium 69.723	32 Ge Germanium 72.630	33 As Arsenic 74.921595	34 Se Selenium 78.971	35 Br Bromine 79.904	36 Kr Krypton 83.798
37 Rb Rubidium 85.4678	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.90584	40 Zr Zirconium 91.224	41 Nb Niobium 92.90637	42 Mo Molybdenum 95.95	43 Tc Technetium (98)	44 Ru Ruthenium 101.07	45 Rh Rhodium 102.90550	46 Pd Palladium 106.42	47 Ag Silver 107.8682	48 Cd Cadmium 112.404	49 In Indium 114.818	50 Sn Tin 118.710	51 Sb Antimony 121.757	52 Te Tellurium 127.60	53 I Iodine 126.90447	54 Xe Xenon 131.29
55 Cs Cesium 132.90545196	56 Ba Barium 137.327	57-71 Lanthanoids	72 Hf Hafnium 178.49	73 Ta Tantalum 180.94788	74 W Tungsten 183.84	75 Re Rhenium 186.207	76 Os Osmium 190.23	77 Ir Iridium 192.222	78 Pt Platinum 195.084	79 Au Gold 196.966569	80 Hg Mercury 200.59	81 Tl Thallium 204.38	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 208.98040	84 Po Polonium (209)	85 At Astatine (210)	86 Rn Radon (222)
87 Fr Francium (223)	88 Ra Radium (226)	89-103 Actinoids	104 Rf Rutherfordium (261)	105 Db Dubnium (262)	106 Sg Seaborgium (266)	107 Bh Bohrium (264)	108 Hs Hassium (277)	109 Mt Meitnerium (268)	110 Ds Darmstadtium (285)	111 Rg Roentgenium (281)	112 Cn Copernicium (285)	113 Nh Nihonium (284)	114 Fl Flerovium (289)	115 Mc Moscovium (288)	116 Lv Livermorium (293)	117 Ts Tennessine (289)	118 Og Oganesson (294)

57 La Lanthanum 138.90547	58 Ce Cerium 140.12	59 Pr Praseodymium 140.90766	60 Nd Neodymium 144.242	61 Pm Promethium (145)	62 Sm Samarium 150.36	63 Eu Europium 151.964	64 Gd Gadolinium 157.25	65 Tb Terbium 158.92535	66 Dy Dysprosium 162.50	67 Ho Holmium 164.93033	68 Er Erbium 167.259	69 Tm Thulium 168.93422	70 Yb Ytterbium 173.045	71 Lu Lutetium 174.9648
89 Ac Actinium (227)	90 Th Thorium 232.0377	91 Pa Protactinium 231.03688	92 U Uranium 238.02891	93 Np Neptunium (237)	94 Pu Plutonium (244)	95 Am Americium (243)	96 Cm Curium (247)	97 Bk Berkelium (247)	98 Cf Californium (251)	99 Es Einsteinium (252)	100 Fm Fermium (257)	101 Md Mendelevium (258)	102 No Nobelium (259)	103 Lr Lawrencium (260)



重たい透明の液体。

アルミ(2.7g/cc)などは浮いてしまう

キセノン

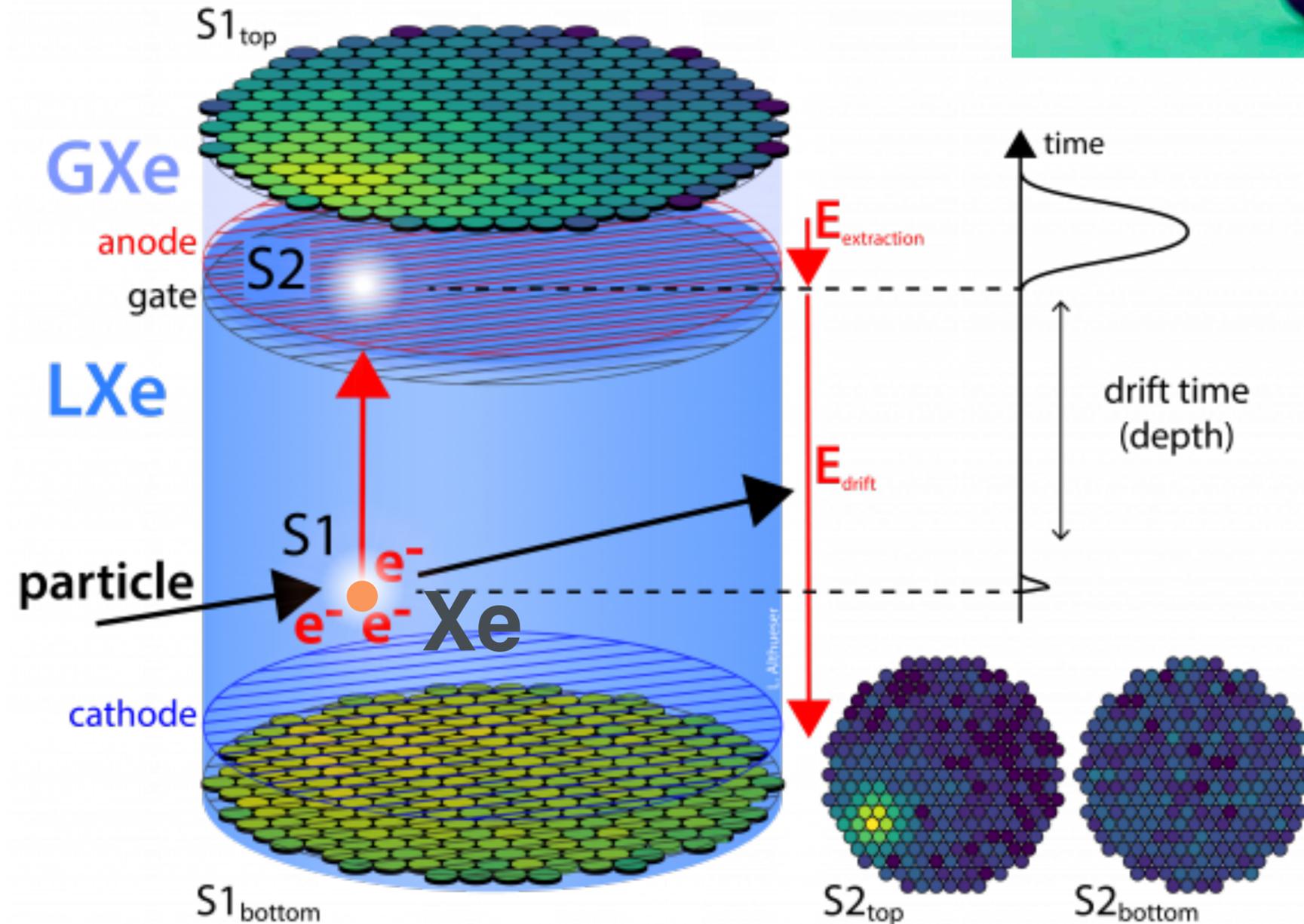
原子番号 54

質量数 131

大きい原子は
暗黒物質と反応しやすい

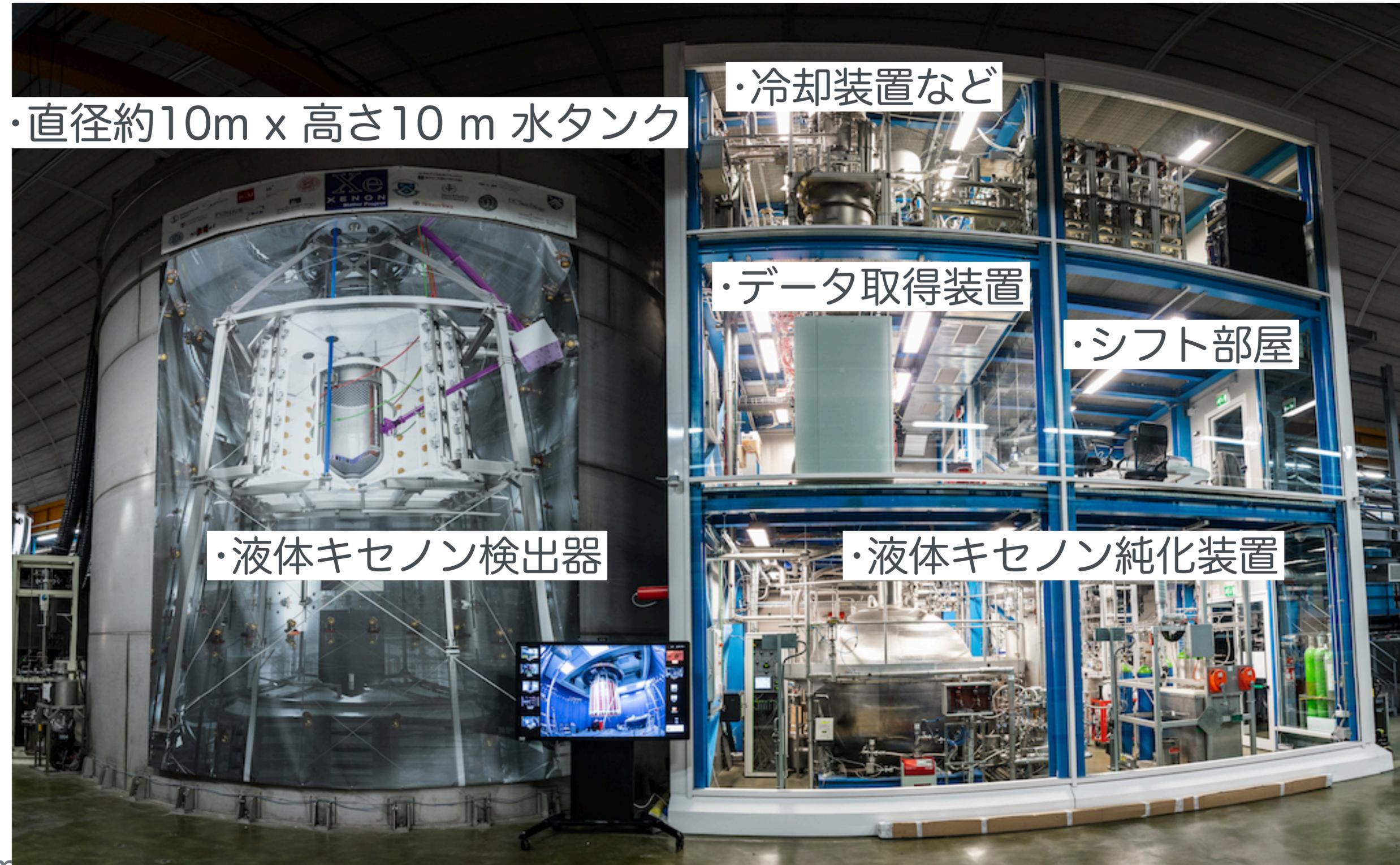
液体温度	-100°C	形状が自由
密度	3g/cc	大質量検出器

暗黒物質とXe原子核が衝突



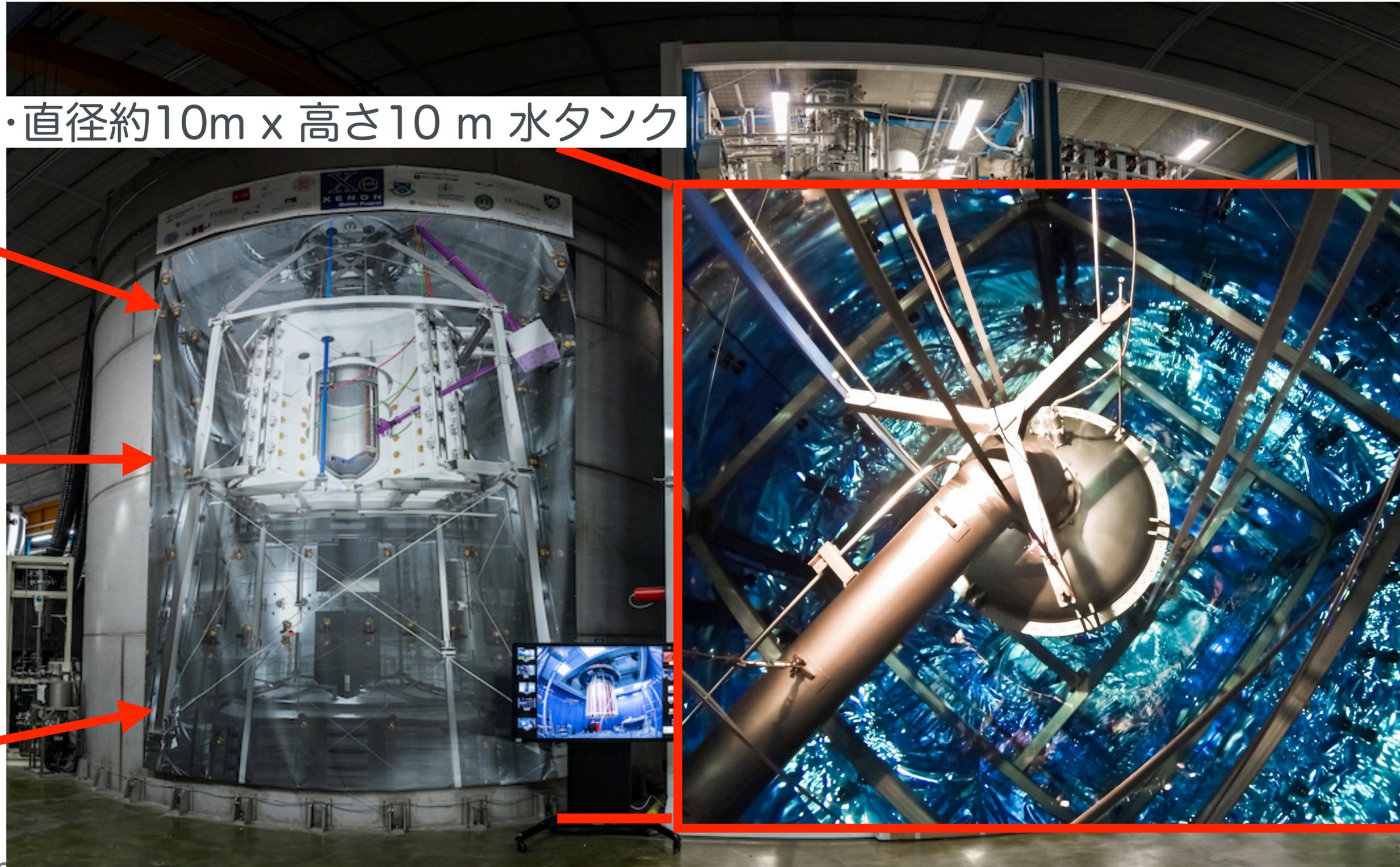
暗黒物質粒子
ガンマ線やベータ線
などの放射線

XENONnT検出器

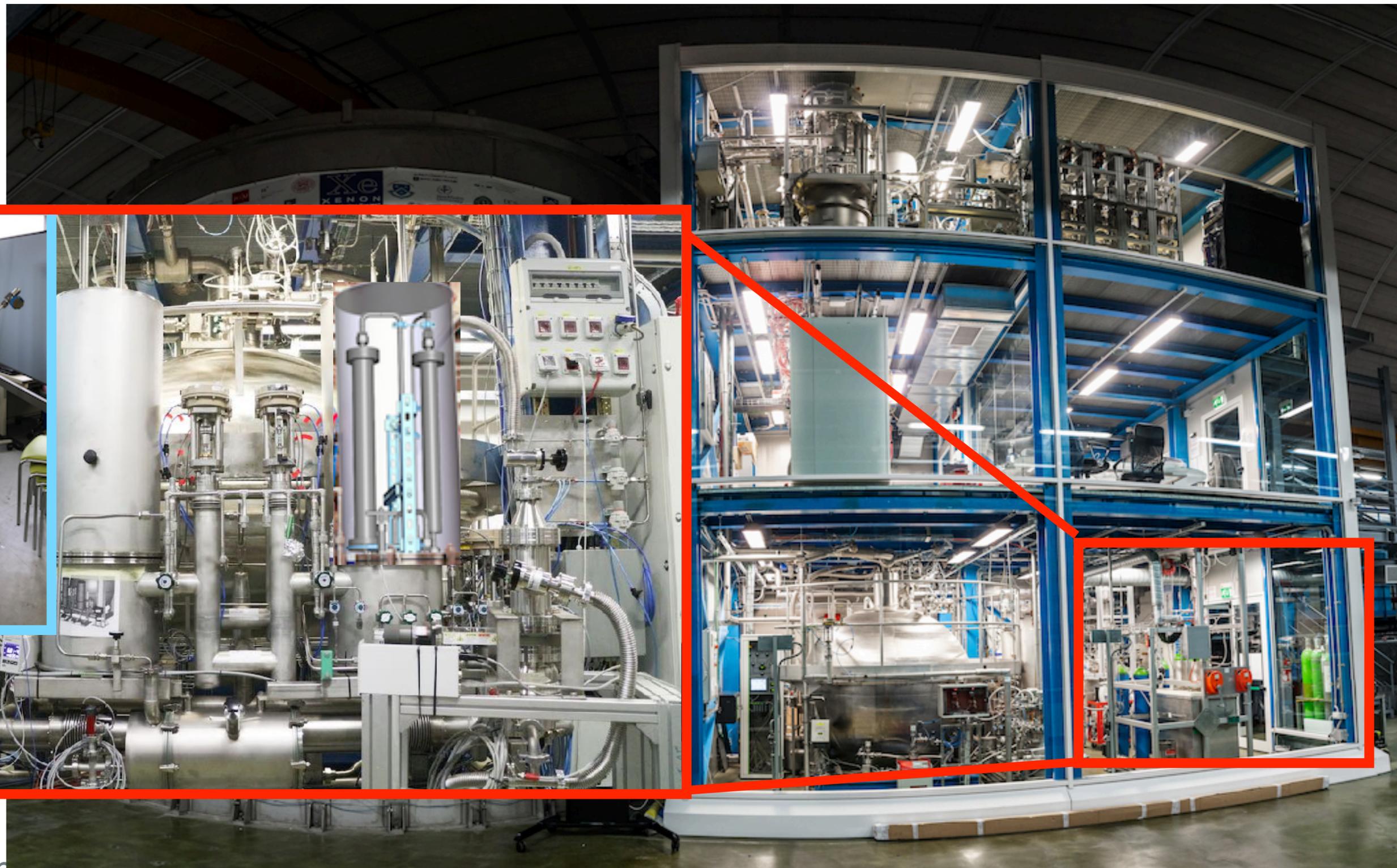


XENONnT検出器

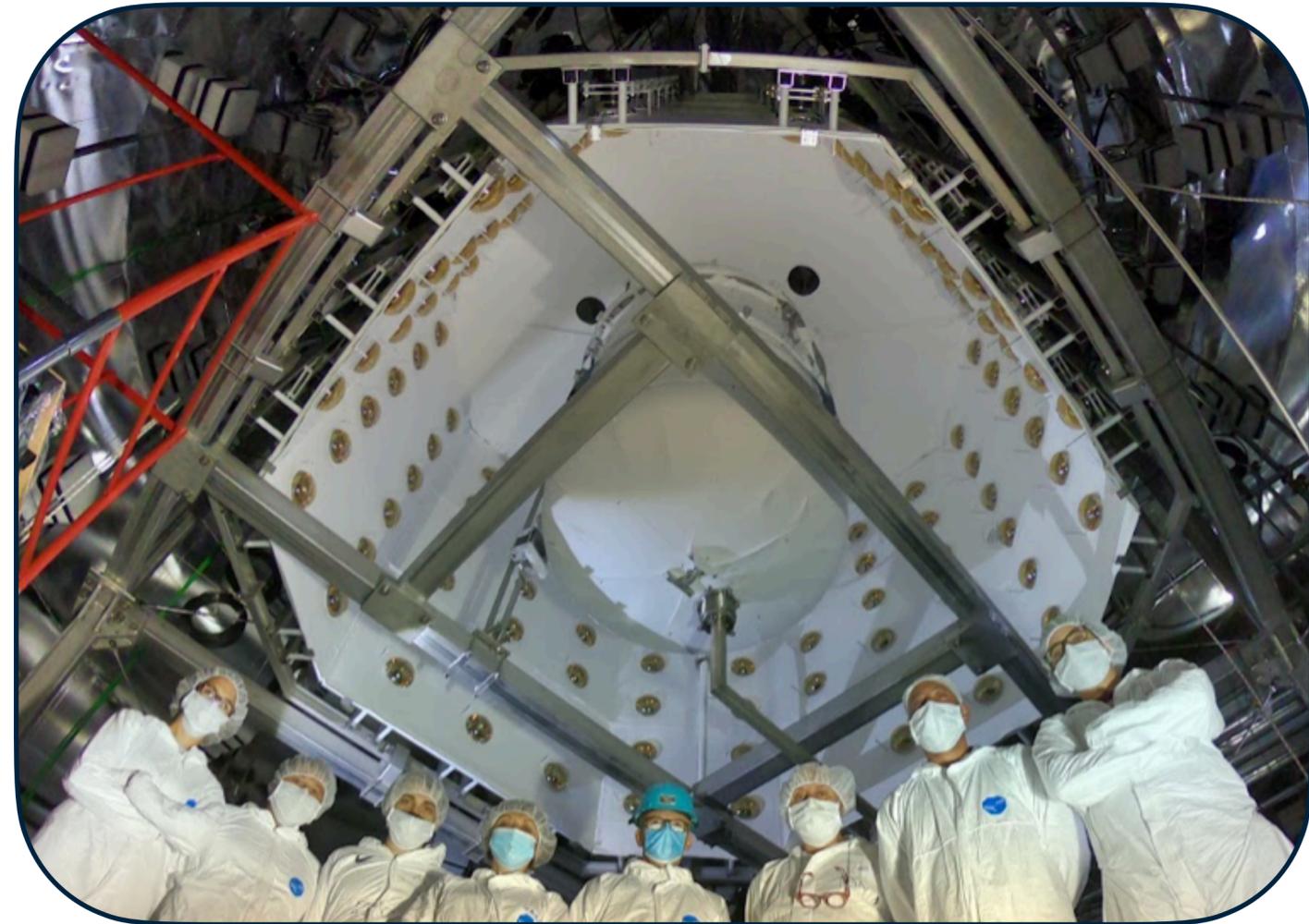
・直径約10m x 高さ10 m 水タンク



液体キセノン純化システム



ガドリニウム入り水チェレンコフ中性子カウンター



- ・中性子は電化を持たないため暗黒物質と似た信号を出すので、極めて危険なノイズ
- ・ガドリニウム入り水を用いることで中性子を捕獲し、信号を得ることで排除する。
- ・スーパーカミオカンデの技術が応用されている

XENONnTでは500本ほどの光センサーが使用されています。

どのくらい低放射能なのか？

1 ベクレル：原子核が1秒間に1個崩壊



4000 ベクレル/人
40カリウム

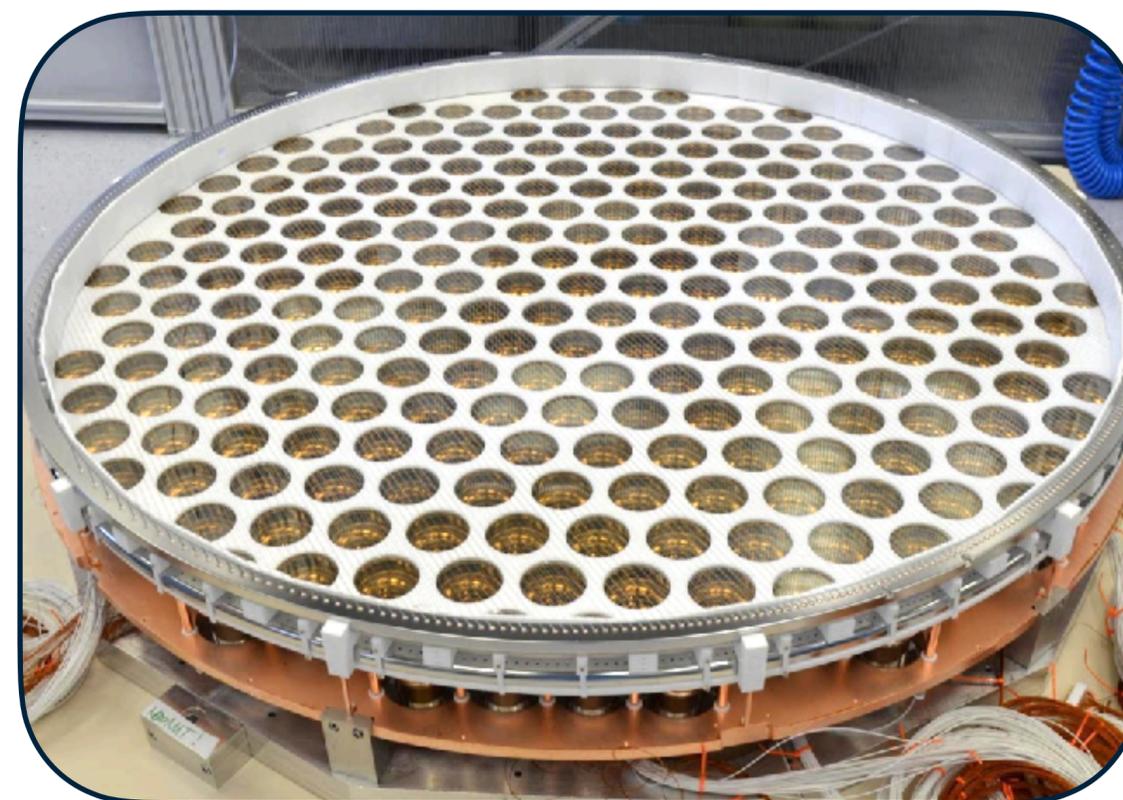


15 ベクレル/バナナ



0.01 ベクレル/本

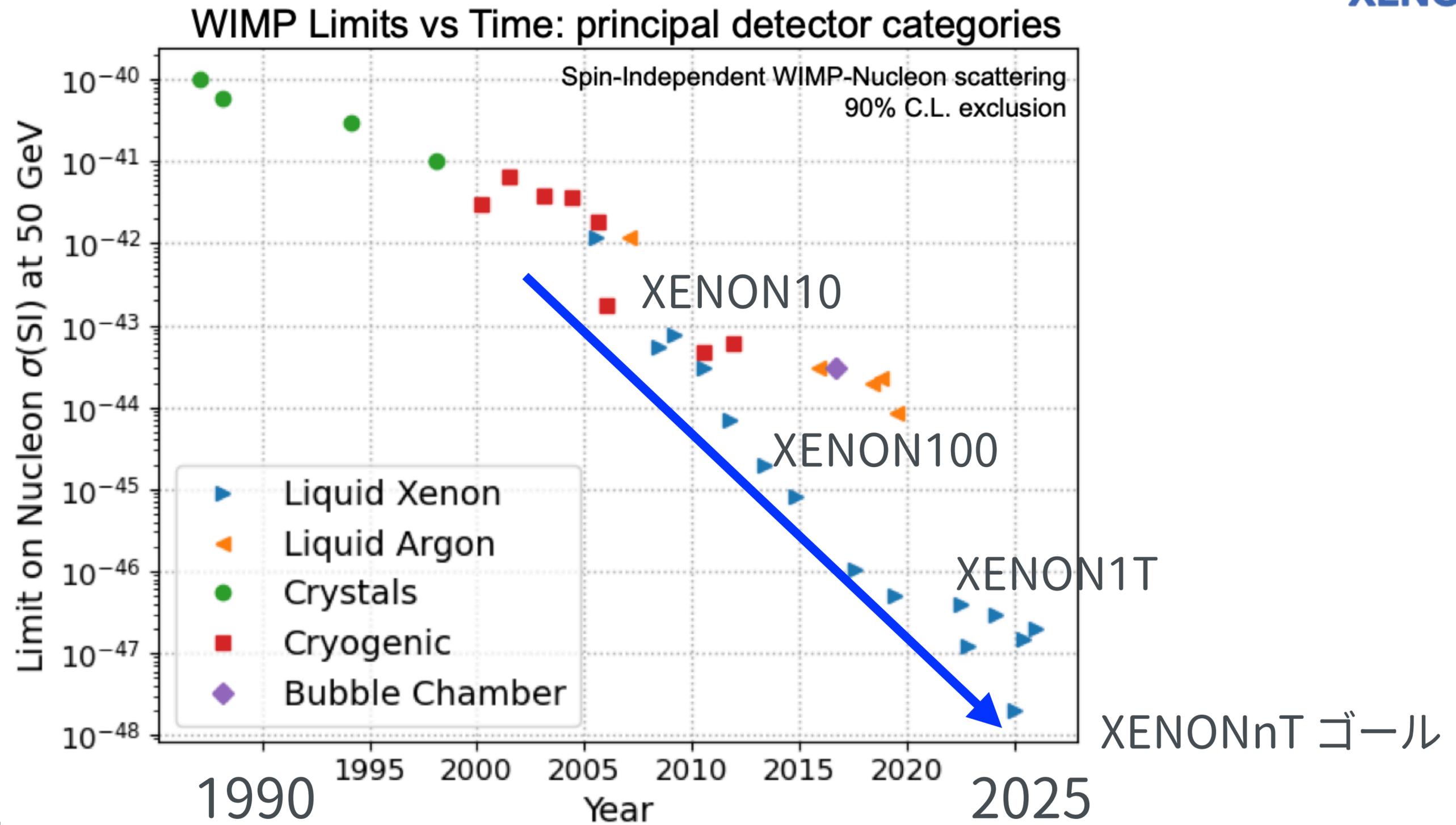
5 ベクレル/500本 (全体)



通常の光センサーの1/1000

暗黒物質直接探索の歴史

暗黒物質の反応のしやすさ



次世代XLZD実験 展望と世界の動き

XENON実験は現在のところまだ発見に至っていないが、後数年観測を続ける予定
 また、同時に次世代の実験に向けて世界で一つの究極のキセノン検出器をXENONnTの10倍のを用いたXLZD (XENON-LZ-DARWIN)コラボレーションが2024年に発足

2030年代の観測を目指す

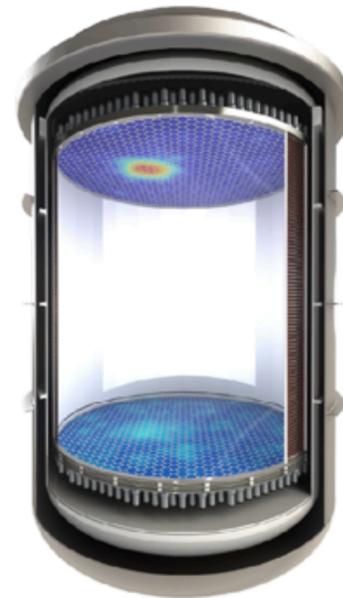
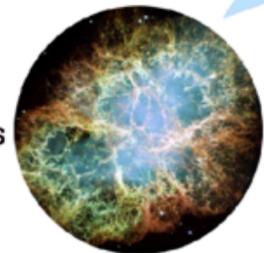
暗黒物質

Dark Matter
 WIMPs
 Sub-GeV
 Inelastic
 Axion-like particles
 Planck mass
 Dark photons



超新星ニュートリノ

Supernovae
 Early alert
 Supernova neutrinos
 Multi-messenger
 astrophysics



Neutrino nature
 Neutrinoless double
 beta decay
 Neutrino magnetic
 moment
 Double electron
 capture



太陽ニュートリノ

Sun
 pp neutrinos
 Solar metallicity
 ^7Be , ^8B , hep

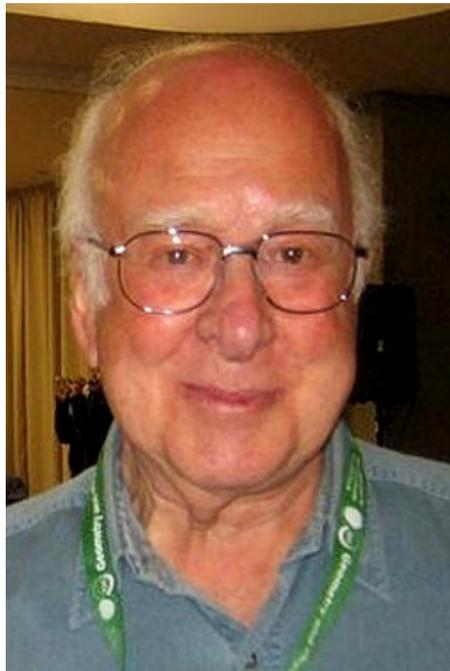


二重ベータ崩壊 (ニュートリノの質量)

最後に

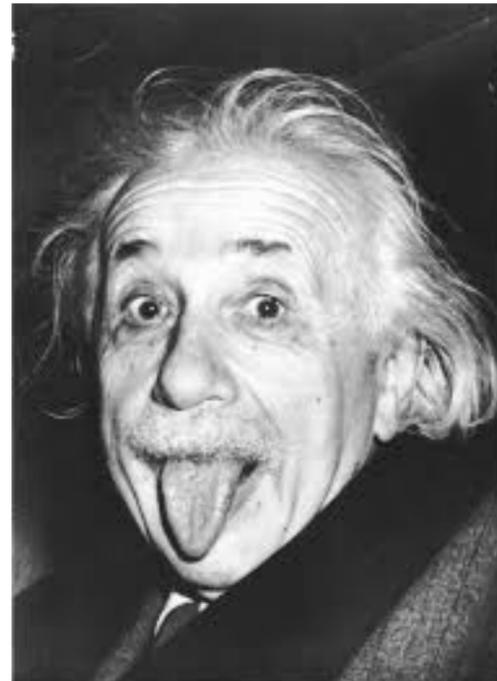
- 暗黒物質にはまだ謎が多いが宇宙の歴史において、星や銀河が誕生するなど重要な役割をになっている。
- 我々が存在しているのは暗黒物質のおかげ。
- 暗黒物質探索は宇宙物理、素粒子物にとって重要な実験。
- XENON実験は順調に感度を上げ探索を行なって来たが今のところまだ発見はされていない。
- 世界で結集して究極の検出器XLZD計画が進み始めた。
- 暗黒物質だけでなくニュートリノの質量の測定など多目的に展開され、2030年代の観測をめざしている。

ヒッグス



50年

重力波



100年

暗黒物質



90年



50年