

宇宙の未知物質 「暗黒物質」の正体にせまる

神戸大学 大学院理学研究科
准教授 身内賢太郎

2023年 5月20日
日本物理教育学会近畿支部総会講演会



素粒子と宇宙

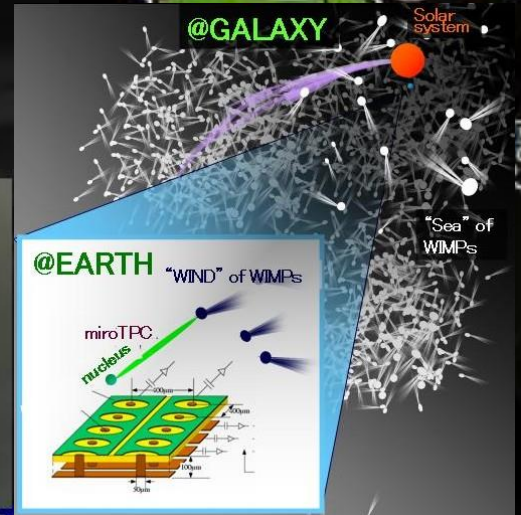
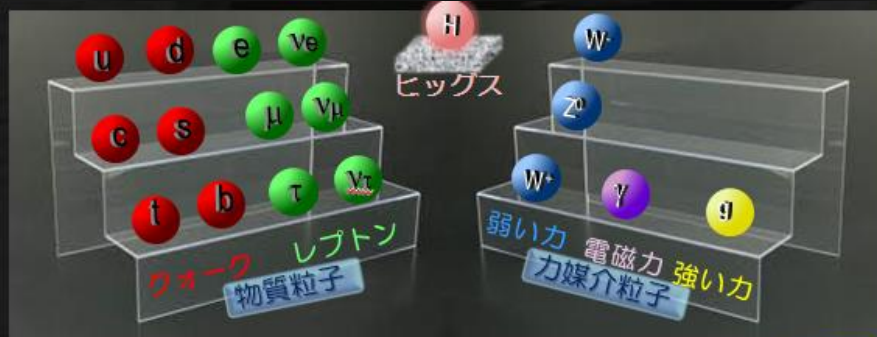
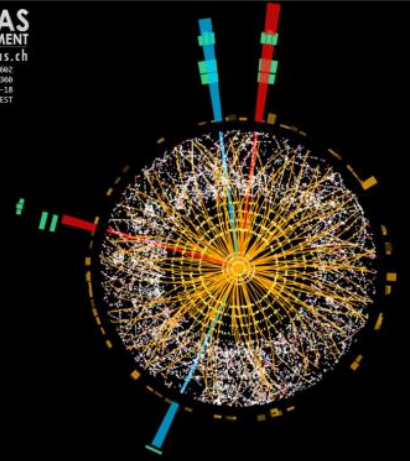
模擬授業 教材

神戸大学大学院理学研究科
物理学専攻
粒子物理研究室

准教授 身内賢太郎



ATLAS
EXPERIMENT
<http://atlas.ch>
Runs: 201602
Event: 83014500
Date: 2012-05-18
Time: 29:28:11 CEST



物理

守備範囲は50桁!

銀河団 $10^{24}m$

銀河 $10^{20}m$

太陽系 $10^{12}m$

暗黒物質
(未発見)
 $10^{-24}m$ 以下

物理

地球惑星科学

クォーク
 $10^{-18}m$ 以下



メダル $10^{-1}m$

陽子・中性子
(2種類) $10^{-16}m$

化学

生物



地球 10^7m



原子核 (112種類)
 $10^{-14}m$

原子 $10^{-10}m$

陽子79個+中性子120個

original idea:
powers of ten

守備範囲は50桁!

銀河団 $10^{24}m$

銀河 $10^{20}m$

太陽系 $10^{12}m$

暗黒物質
(未発見)
 $10^{-24}m$ 以下

物理

「物理」で分かったこと。
50桁!! にわたる現象を20個弱の粒子で説明

クォーク
 $10^{-18}m$ 以下



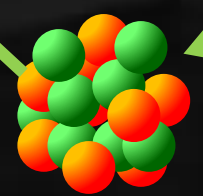
メダル $10^{-1}m$

陽子・中性子
(2種類)

一番大きな「銀河団」は
一番小さな「暗黒物質」がつなぎとめている



地球 10^7m



原子核 (112種類)
 $10^{-14}m$

原子 $10^{-10}m$



物理とウロボロスの蛇

ウロボロス

ファイル(F) 編集(E) 表示(V) お気に入り(A) ツール(T) ヘルプ(H)

他のキーワード: うろおぼえウロボロス ウロボロスの蛇



ection Sensitive
WIMP-search
WAGE

素粒子

現在の物理「標準理論」

- 陽子、中性子、電子、光子などは知られていた。
- 1970年代 コレクションのひな壇完成
- 2012年 コンプリート

2000

質量を与える粒子



「コンプ後」の物理：「標準理論」を超えて

- ニュートリノ質量
- 重力波
- ダークエネルギー
- **ダークマター** あり
- **ヒッグスの性質解明**



ダークマター
「XMASS」

粒子物理：最高感度の検出器で
新粒子を検出する
粒子の新しい性質を調べる

LHC

アトラス実験

ニュートリノ

◆ ニュートリノ

● 「ニュートリノ天文学」 以来、「お家芸」

● 現在の研究対象

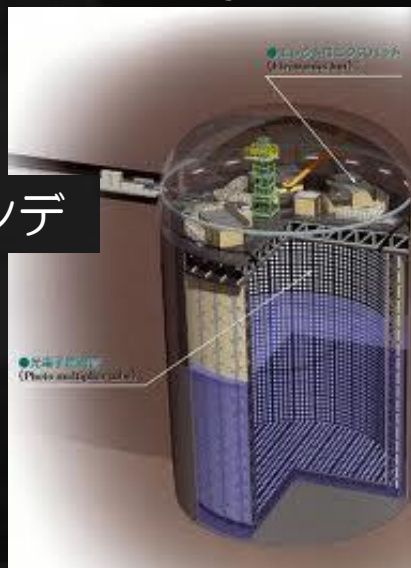
- ニュートリノ質量
- ニュートリノ振動



● スーパーカミオカンデ

● T2K

スーパーカミオカンデ



<http://legacy.kek.jp/ja/activity/ipns/T2K.html>

"For the greatest benefit to mankind"
Alfred Nobel

A Thesis for the Doctor's Degree of Science
Dark Matter Search Experiment in a Deep Underground
Laboratory with LiF Bolometer

Kentaro Miuchi
Department of Physics, School of Science,
University of Tokyo

March 2002

査査

梶岡隆章

平成27年12月18日

ir
reates

c

ger

nald

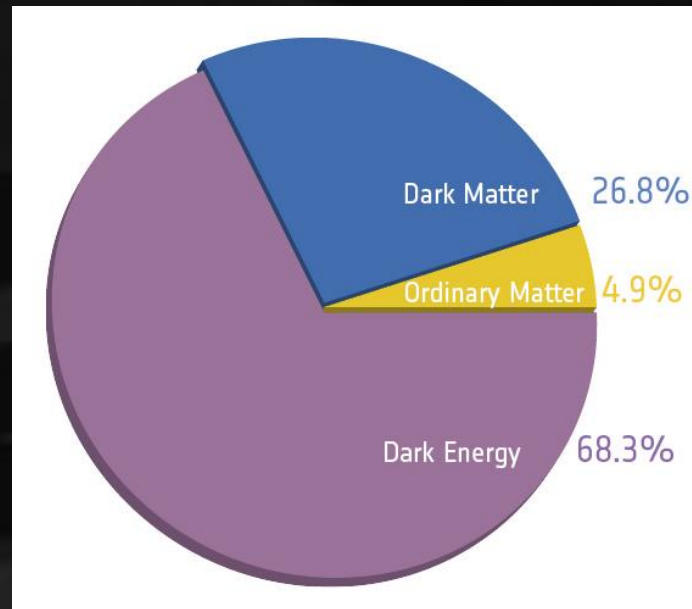
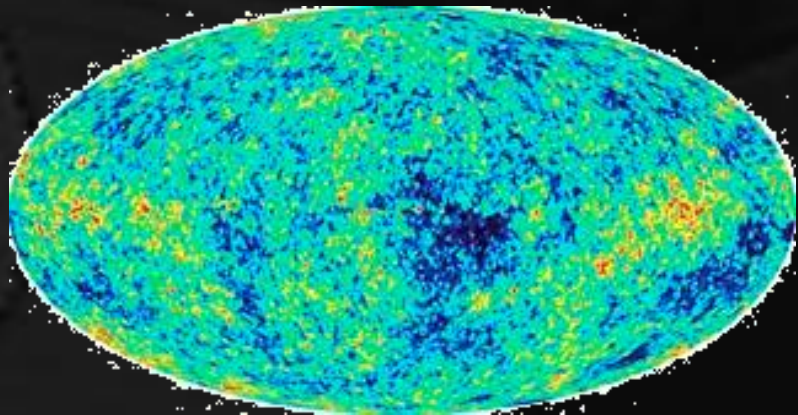
an

verg



ダークマター

宇宙の 95%はまだわからない



ダークマター

わかっていること

- 質量をもつ物質
- 宇宙の約1/4を占める
- 運動の速度

わからないこと

- 何だかわからん。
- 質量
- 「物」との反応の仕方

これをなんとか調べたい。

Direction Sensitive
WIMP-search

NASA WMAP TEAM

力学の問題

● 銀河の回転速度の r 依存性を求めよ



2018年2Q 理学部 試験 古典力学II(2S204)・力学I(9S253)

2018/8/7 試験時間 70分 担当 身内

以下の問題に解答せよ。導出も記すこと。必要な物理量があれば定義して使用すること。

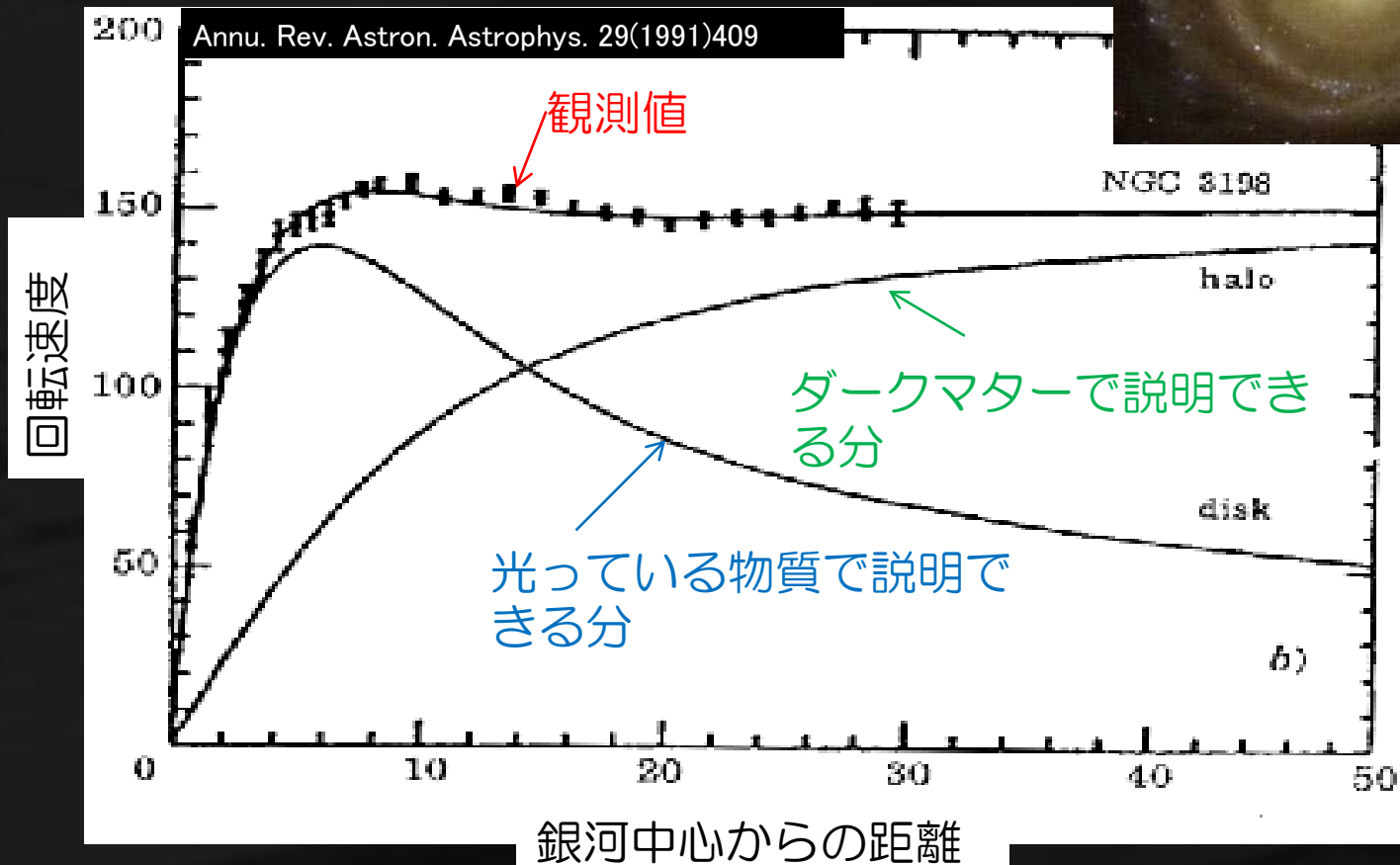
3. 極座標をもちいて以下の計算を行え。

(a) 球の体積

(b) 有限な大きさの一樣な球を考える。球の外にある質点が球からうける万有引力は、球の中心に全質量が集中している場合と等しいことを示せ。

ダークマター研究の歴史

● 銀河の回転曲線 (1970~)



光っている物質のみでは、外周部の速度が説明できない。 ⇒ ダークマター???

Direction Sensitive
WIMP-search

NEWAGE

◆ ダークマター

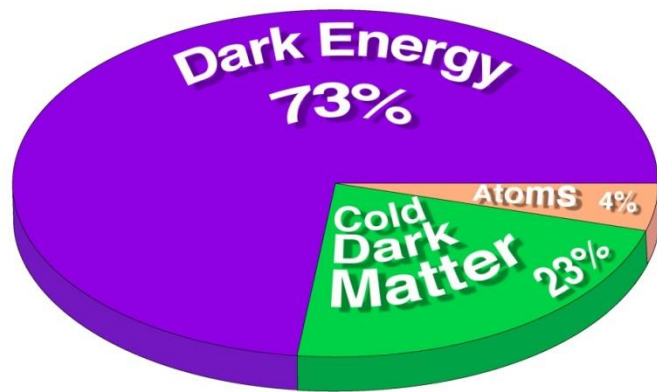
● 遠方銀河の重力レンズ効果 (1990~)



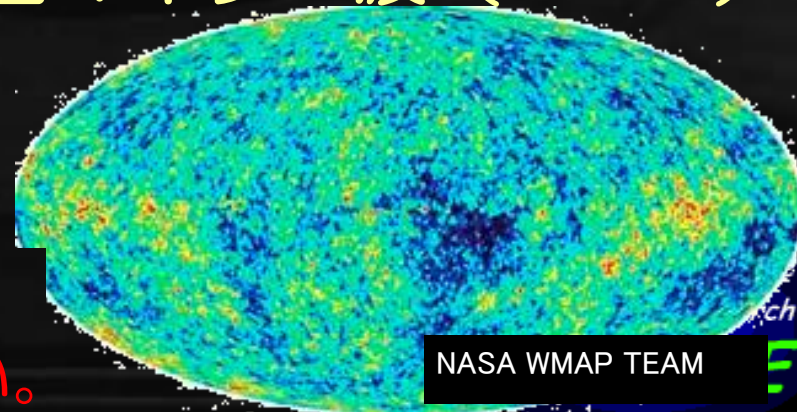
暗黒物質で空間
がゆがんでいる。

● 銀河団の衝突 (2007)

ピンク：通常物質
青：暗黒物質



● 宇宙マイクロ波 (2002~)



暗黒物質がないと
ムラムラが説明できない。

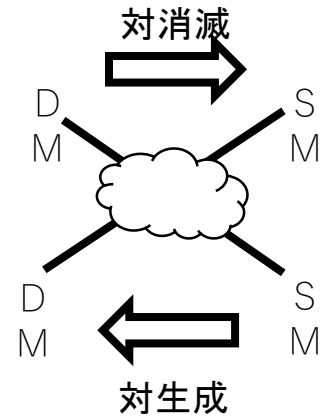
暗黒物質候補

- 他の動機で導入される粒子が「よい」候補
 - アクシオン (QCDのCP対称性)
 - 初期ブラックホール(重力波によるブラックホール合体観測)
 - WIMP (Weakly Interacting Massive Particles) ⇒ 本講演

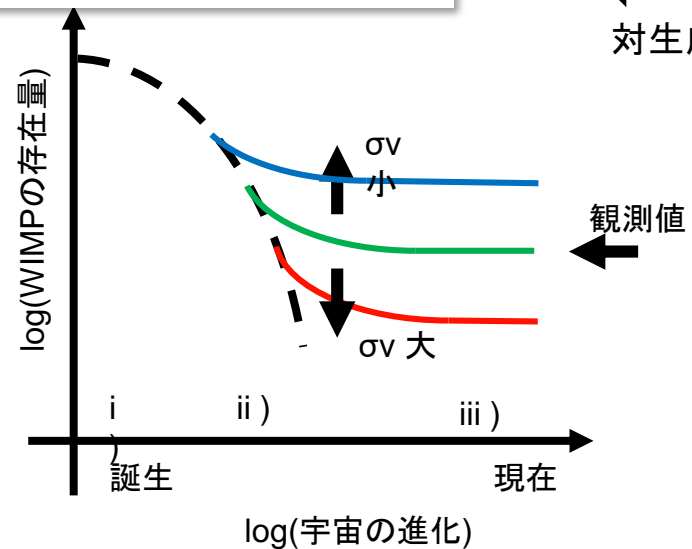
WIMPの特徴

- 初期宇宙で生成
- 対消滅で減少
- ある時点で存在量固定
- weak scaleで現在の存在量を説明
⇒WIMP ミラクル

WIMPの反応



WIMP存在量の時間変化



身近なふしぎから宇宙のぎもんまでよくわかる!

なぜ?ど~して?

科学の図鑑



魚をもった生き物がいるのはなぜ?

ど~してICカードで電車にのれるの?

火山はど~して火を出すの?

ど~して太陽の光が電気にかわるの?

好奇心が広がる
全55テーマ

電子レンジで食べ物があたたまるのはなぜ?

子供だって 「ダークマター」

宇宙空間のまっくらな部分にはなにもないの?



目に見えないけれど、たくさんの物質があるよ



うちゅうのギモン

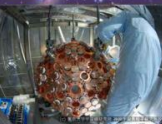
宇宙空間のまっくらな部分に、なにがあるか考えてみたことはありませんか? 宇宙空間には、空気がないことはわかっています。だから宇宙飛行士は宇宙での作業では、宇宙服をきて、酸素をほせようとしています。長い間、宇宙空間のまっくらな部分にはなにもないと考えられていました。ところが研究がすすみ、なぞの物質があることがわかってきたのです。

宇宙では、星や銀河など、みなさんの目で見えるものは、全体の4%くらいだといわれています。のこりは、「ダークマター」といわれる、目に見えない物質が全体の23%。正体不明のダークエネルギーが73%あると考えられています。ダークマターもダークエネルギーも、目には見えませんが、計算した結果、「ある」ということはわかっています。宇宙のなりたちにもかかわっているため、ダークマターとダークエネルギーの正体を解明するための研究がすすんでいます。

宇宙からとどく、ダークマターのわずかなしるしをとらえる!



KEK 東京大学が中心になってすすめるNEWAGE実験の装置。「ダークマター」をとらえようとしている。



KEK 東京大学宇宙線研究所が中心にすすめているX-MASS実験の装置。ダークマターを観測している。

もう少し有難がっていただくとすると

交流

宇宙のダークマター直接探索の現状



身内賢太朗

神戸大学大学院理学研究科
miuchi@phys.sci.kobe-u.ac.jp



濱口幸一

東京大学大学院理学系研究科
hamaguchi@phys.s.u-tokyo.ac.jp

(参考) 日本物理学会誌 第75巻 (2020年) 第2号 68-76頁 交流
https://www.jps.or.jp/books/gakkaishi/2020/02/75-02_068interdisciplinary.pdf

こういうことも。

BSフジ

タイトル・出演者で検索



番組表



オンデマンド



ショッピング

TOP

報道・情報

スポーツ

映画・ドラマ

時代劇

紀行

ドキュメンタリー

エンタメ

音楽

アニメ・キッズ

ミニ番組

イベント



2022年6月12日(日) 11:30~12:00

第268回「分からないから面白い宇宙の謎 アインシュタイン16歳の疑問と暗黒物質探索」

2022年6月19日(日) 11:30~12:00 (再)

毎週(日) 11:30~12:00 ※隔週新作

万有引力の法則、相対性理論、超弦理論…

聞き慣れない用語に、見るだけで頭が痛くなってきそうな数式の数々。しかし、そこに記されているのは私たちが暮らす世界の姿。16歳のアインシュタインが抱いた疑問から宇宙の理解は爆発的に進みました。そして、この宇宙には未だ正体の分からない物質が満ちていると言います。一体私たちの住む世界とは、宇宙とは、どんな姿をしているのか？日常の理解を超えた宇宙の謎を動画配信者、物理学者、研究者にわかりやすく語ってもらいました。

『ガリレオX』

ダークマター： 直接探索

素粒子実験：大学院集中講義スライドより

そもそも「暗黒物質」？

集中講義

銀河中心

銀河の暗黒物質

はくちょう座

$v_0=230\text{km/s}$

12月

$v_0=220\text{km/s}$

6月

太陽系

実験立案

から

検出器校正

calした？

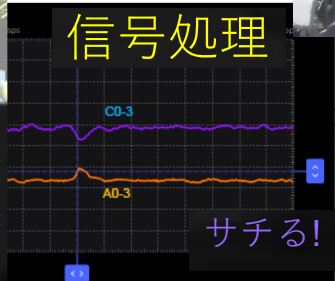
データ処理

みたいなものへの話

物理風味を加えて、、、

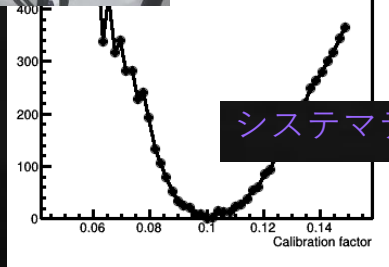
検出器

信号処理



HVカット
しよっか？

サチる!



システムティックは?



暗黒物質探索

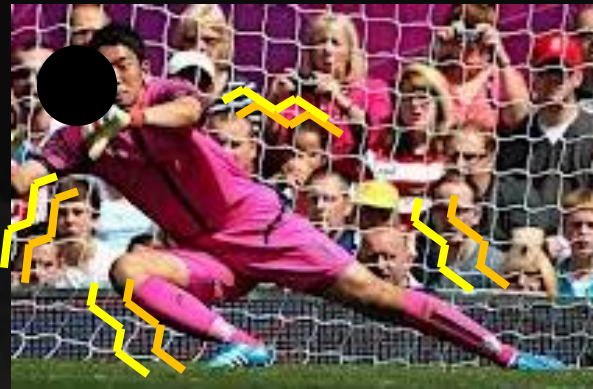
「物」に暗黒物質が「当たる」

捉え方：

①温度が上がる

②電気が生じる

③光が生じる



「検出器」



暗黒物質探索

- 宇宙から降り注ぐ「余計なもの」避ける。
⇒ 地下で実験する。

A world-wide effort to search for WIMPs

世界の地下活動



talks in the afternoon sessions
some basics + brief review of the field

神岡は、実験数、
規模で世界1, 2位

NEWAGE

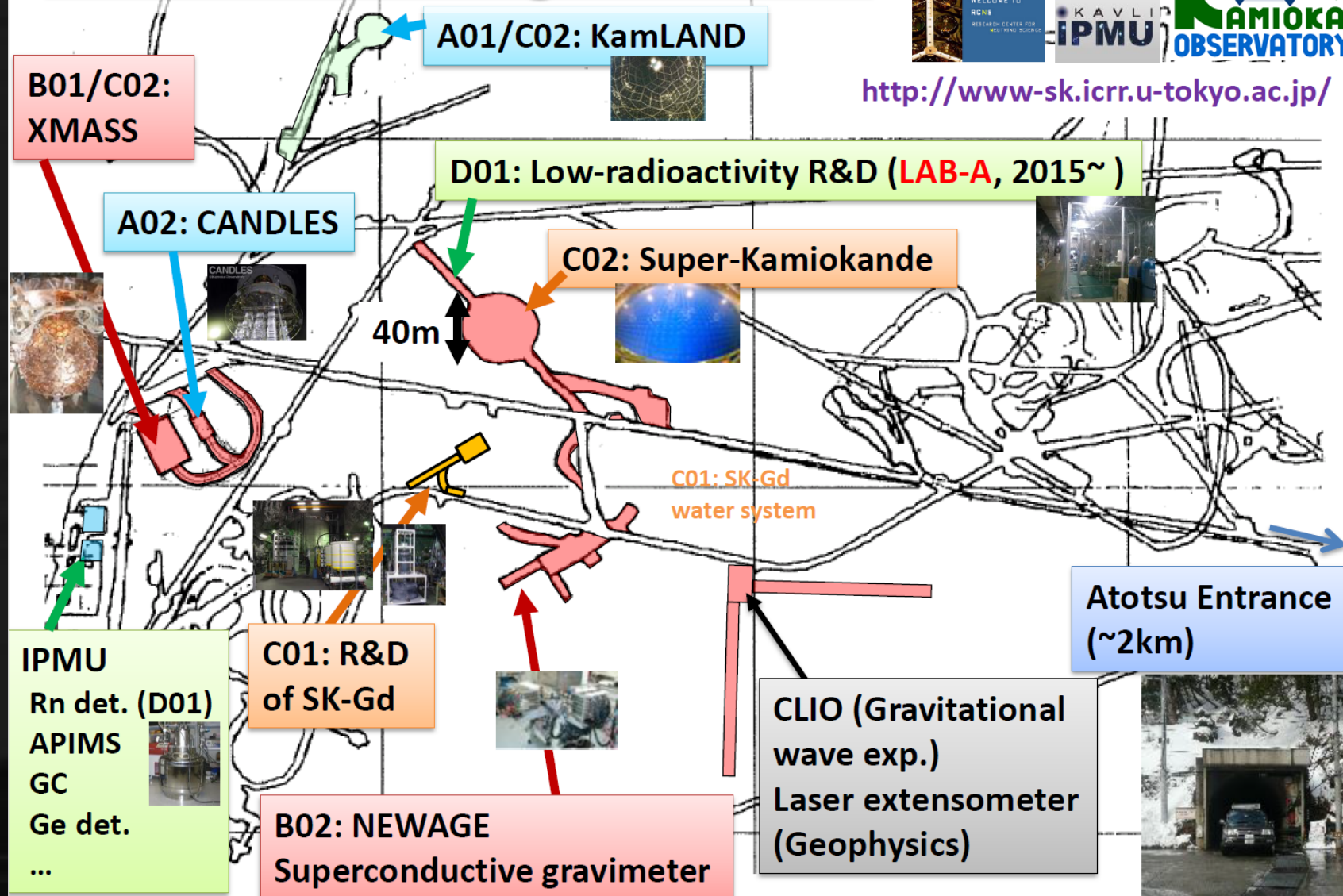
◀ 神岡 その②

Kamioka Underground site

2700 m.w.e.



<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/>



itive
arch
GE



宇宙暗黒物質の直接探索

XENON・DARWIN

NEWAGE・MIRACLUE

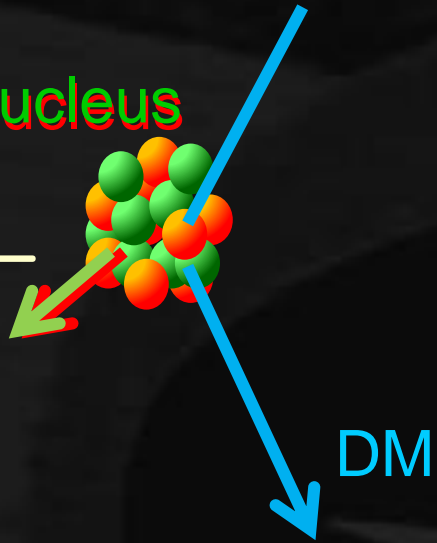
地下の実験サイトで行う、
極低バックグラウンドの検出器を用いた
多目的な宇宙・素粒子実験

@ 神岡地下実験室B

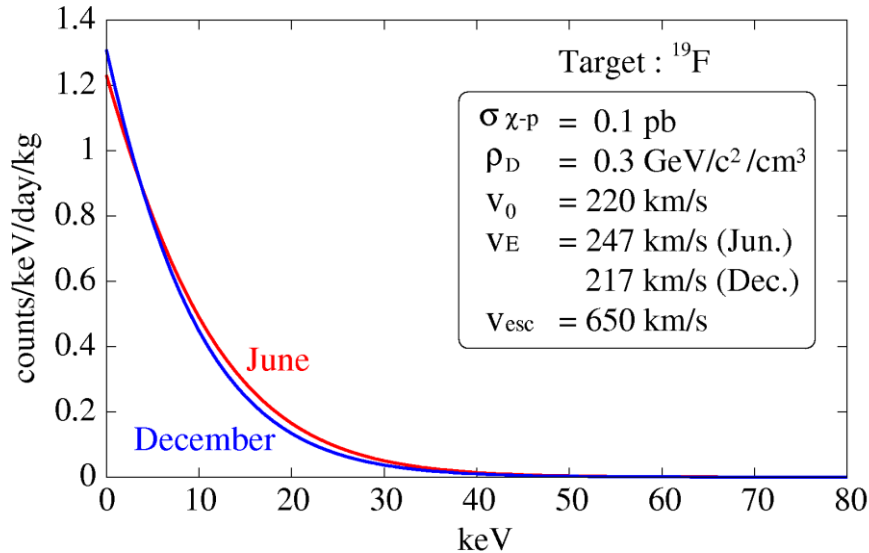
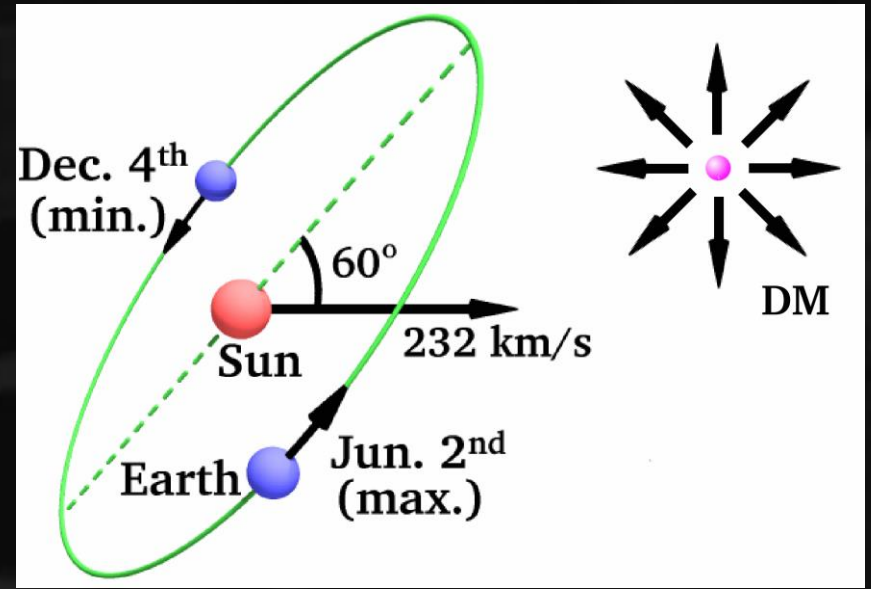
@ グランサツソHALL-B

暗黒物質の「証拠」

nucleus



このエネルギーを検出する



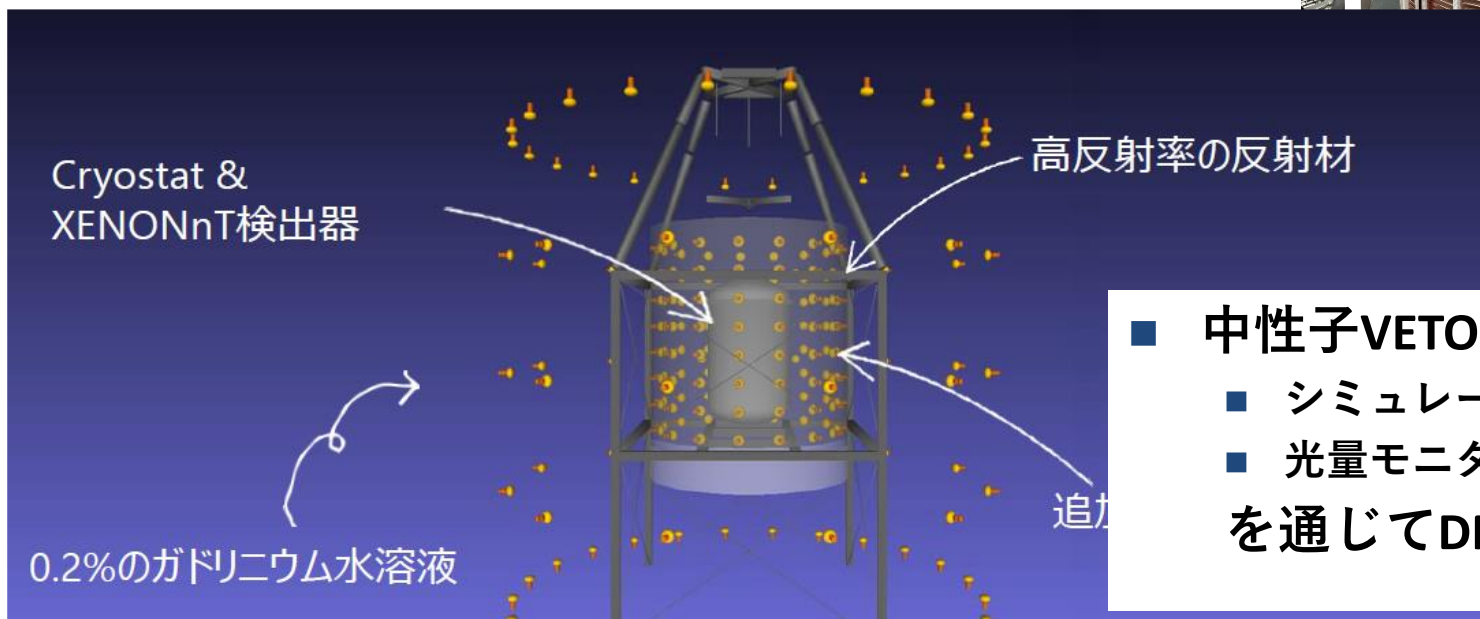
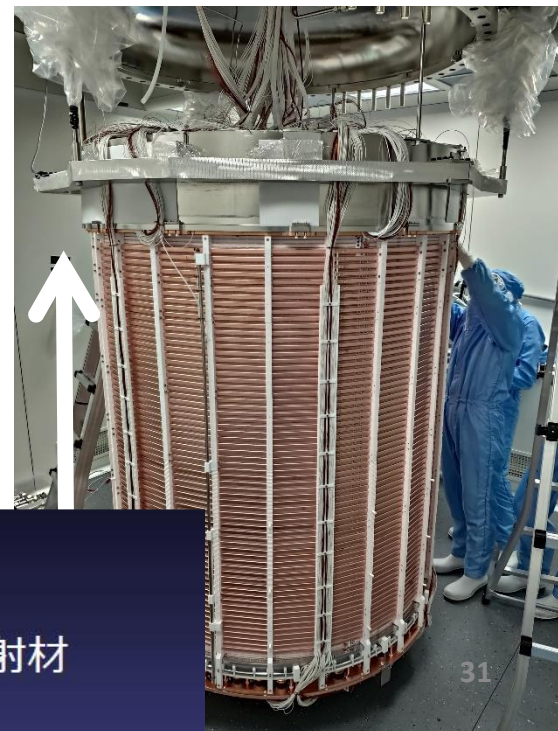
証拠力

弱

- ① * 回反応した
- ② エネルギースペクトル
- ③ 季節変動
- ④ 物依存
- ⑤ 到来方向

強

- 大型液体キセノン検出器で**宇宙暗黒物質の発見を目指す。**
- XENON実験@グランサッソ（イタリア）
 - XENONnT：液体キセノン約4トン（有効質量）
 - 2021年より観測中
 - 神戸大（2017年12月～）：
中性子BGの反同時計測検出器 (VETO)
シミュレーション → 博士論文 (2022年1月)



- 中性子VETOテーマ
 - シミュレーション
 - 光量モニタ装置
 を通じてDM発見へ



XENON実験

XENON

- 世界中から20以上の機関が参加
- 最高感度で暗黒物質を探索
- 神戸大 in XENON:「中性子VETO」
 - キセノンと反応したものは?
 - 周りに中性子カウンターを置いて反同時計測



Cryostat & XENONnT検出器

高反射率の反射材

- 中性子VETOテーマ
 - シミュレーション
 - 光量モニタ装置を通じてDM発見

追加の120×8' PMTs

0.2%のガドリニウム水溶液

Research at Kobe

XENONnT実験による最初のWIMP暗黒物質探索の結果

▶ 2023/03/30 ▶ 理学研究科

研究ニュース

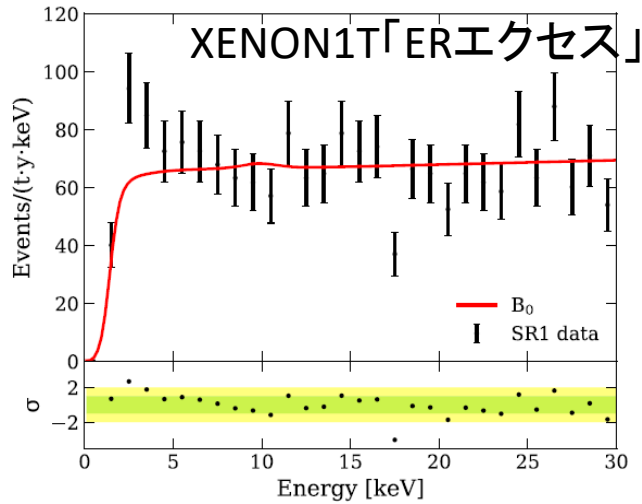
神戸大学はじめ、東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構 (Kavli IPMU)、東京大学宇宙線研究所、名古屋大学素粒子宇宙起源研究所 (KMI)、名古屋大学宇宙地球環境研究所、が参加する、米国・欧州・日本を中心とした国際共同実験XENONコラボレーション (*注1) は、現在稼働している暗黒物質探索実験であるXENONnT実験において、暗黒物質 Weakly Interacting Massive Particle (WIMP)(*注2) 探索の最初の結果を発表し、2018年に前身実験のXENON1T実験が報告した制限を大きく更新する結果を得た、という報告を行いました。

本結果は、XENONコラボレーションが、日本時間3月22日22時30分に、イタリア国立物理学研究所グラン・サッソ研究所で開催した特別セミナーで報告されました。

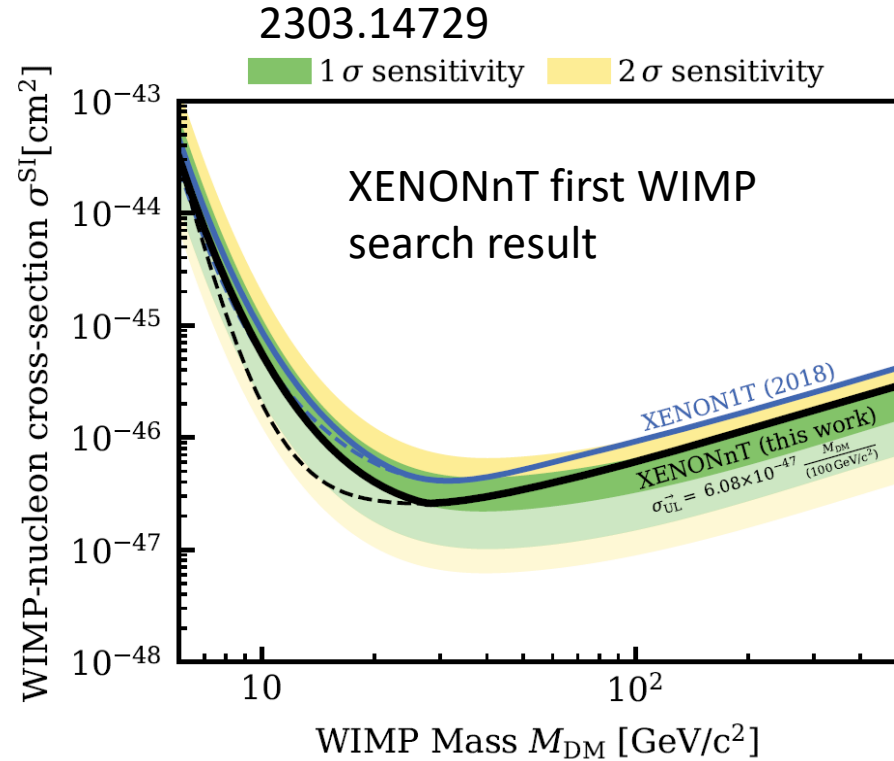
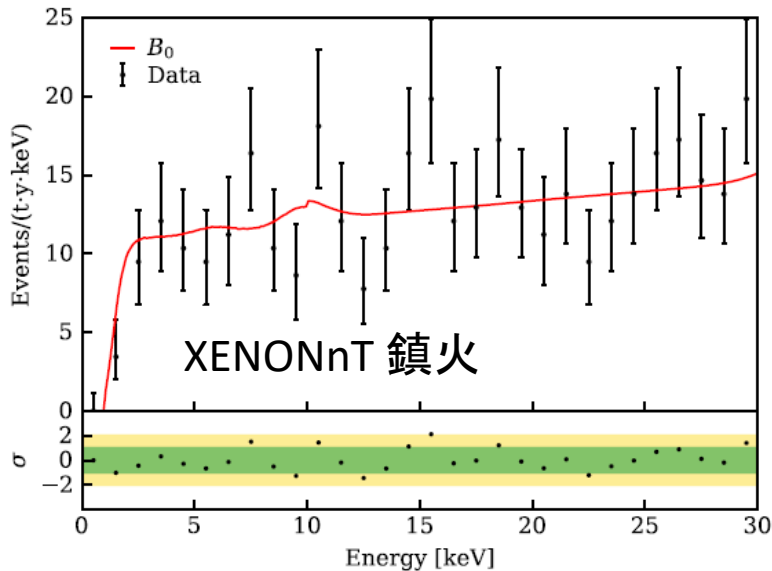
本研究には、神戸大学からは身内賢太郎准教授 (大学院理学研究科)を代表として、竹内康雄教授 (大学院理学研究科)、金崎奎氏 (大学院理学研究科 博士課程前期課程)、濱田悠斗氏 (大学院理学研究科 博士課程前期課程) が参加しています。特に中性子反同時検出器の性能評価・保持を行い、今回のWIMP探索での背景事象低減に貢献しました。今後、中性子反同時検出器の性能向上によってWIMPの発見を目指した研究を進めていきます。

XENONnT結果とこれから

PHYS. REV. D 102, 072004 (2020)

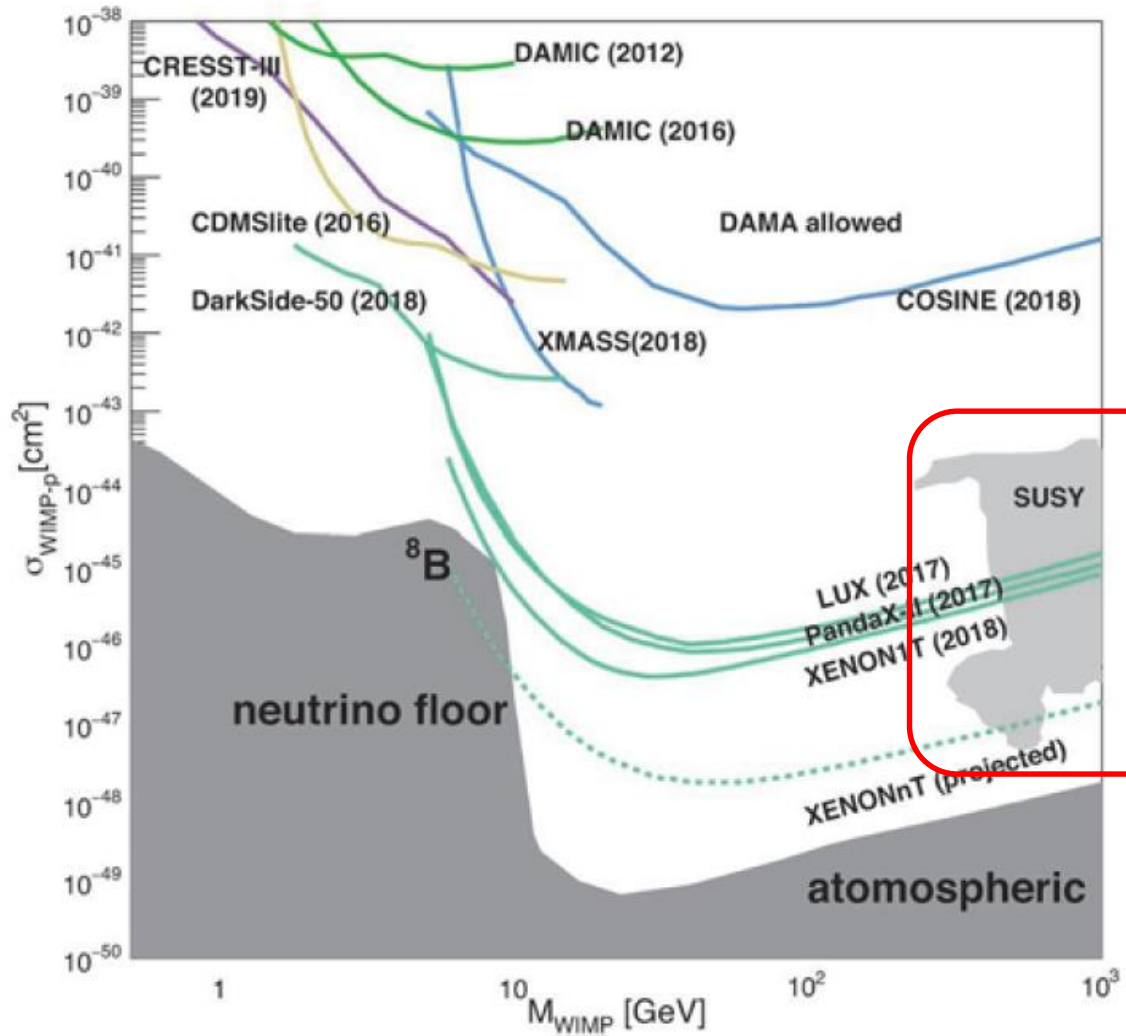


[Phys. Rev. Lett. 129, 161805 \(2022\)](#),

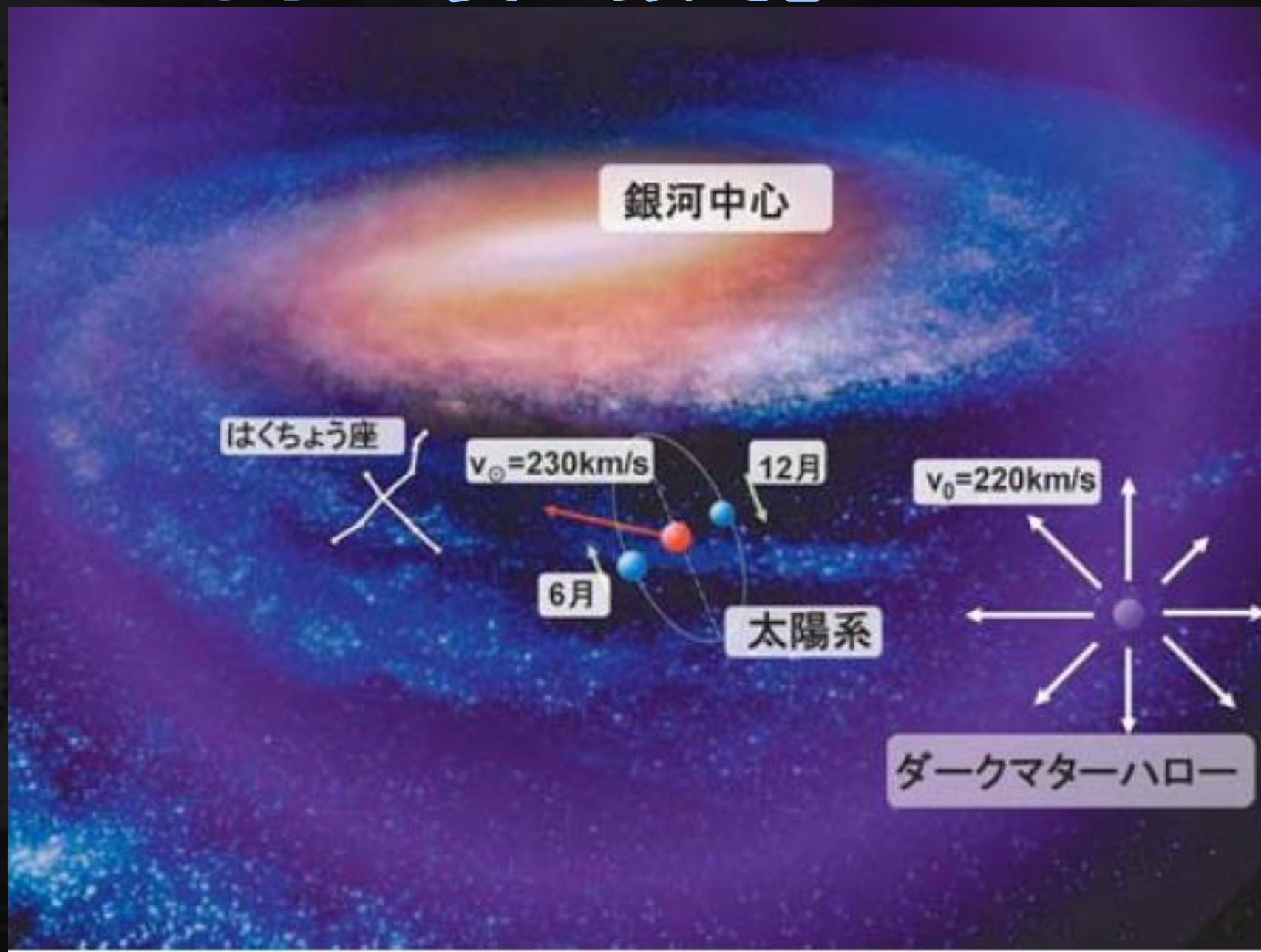


思ったより中性子BG多い。
→Gd投入へ

■ 今後



もう一度「銀河」



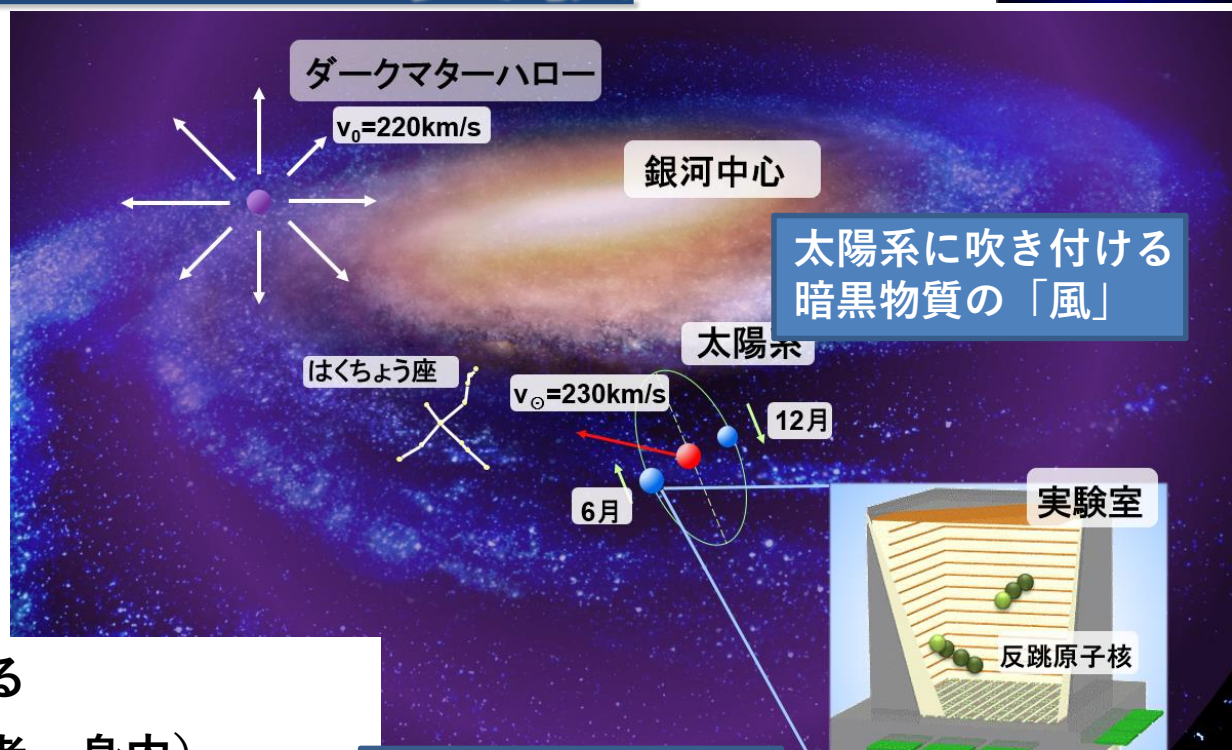
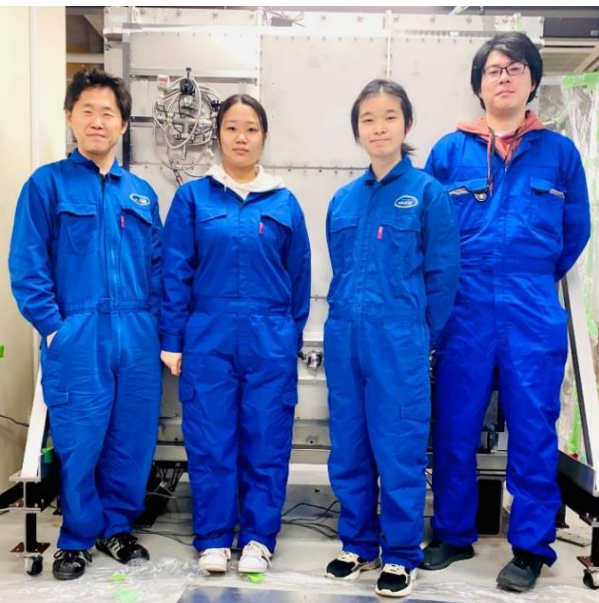
「方向性」の重要性



S
li

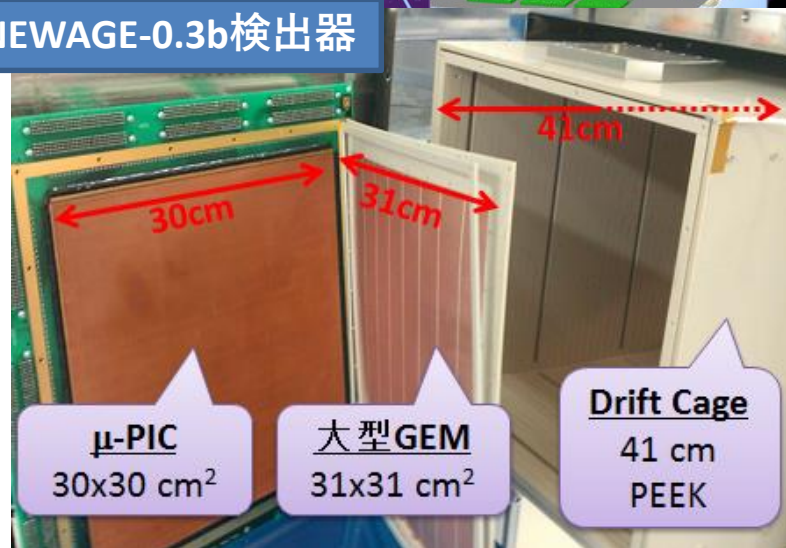
som
fys
i
m
R
för
fy
.
f

NEWAGE実験



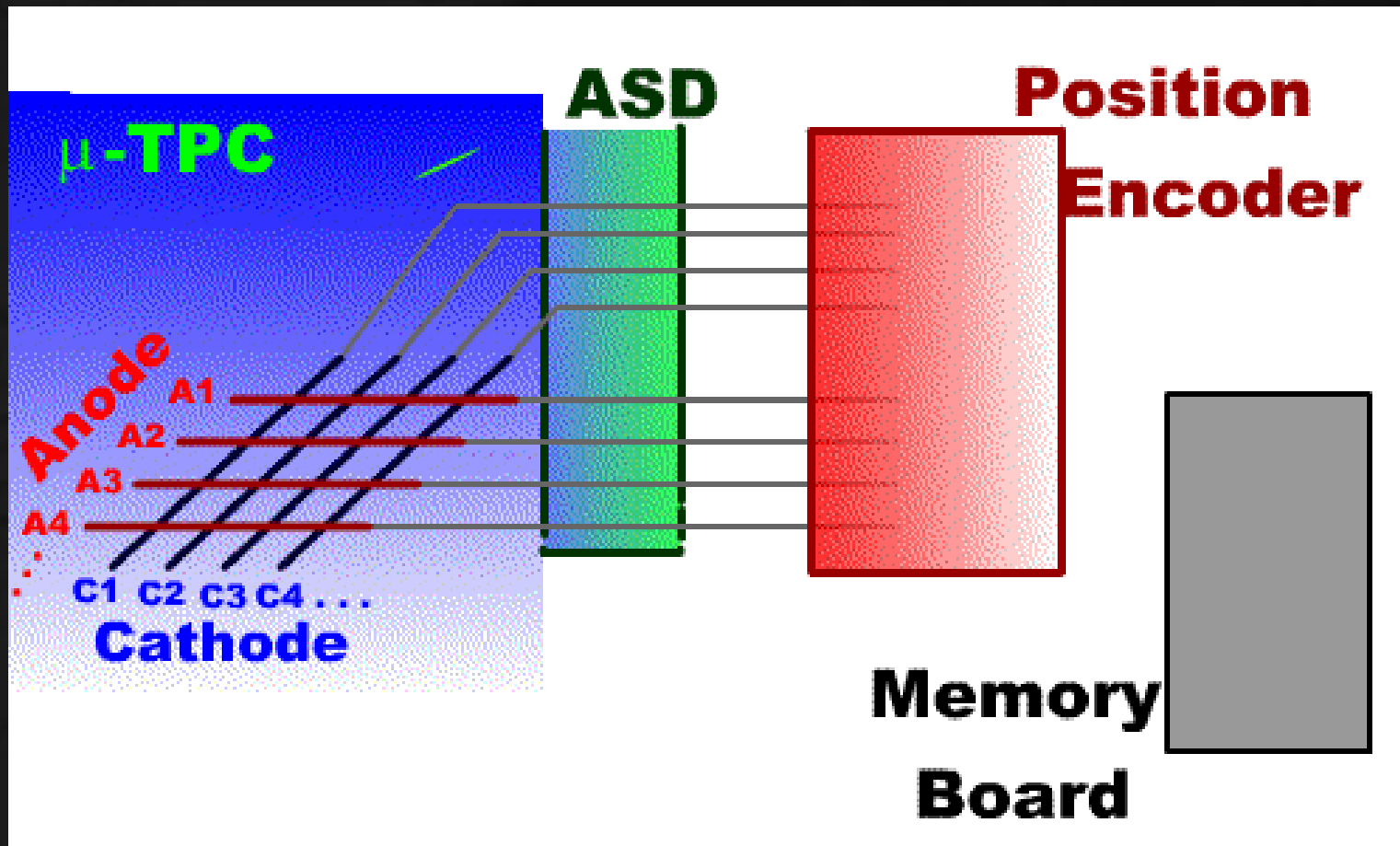
- 暗黒物質の「風」を捉える
- 神戸大学主導（研究代表者 身内）
- 立案，検出器製作，測定，解析，論文執筆，実験プロセスをすべて行う
→ オールマイティーな人材の育成
- 暗黒物質検出の決定的証拠 + 性質解明へ
- 小型器で観測中@神岡地下
 - 次世代検出器の開発 @神戸
→ 今年地下に持ってゆきます。

NEWAGE-0.3b検出器



NEWAGE

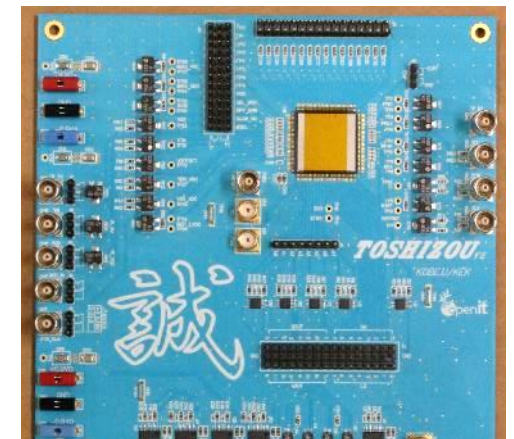
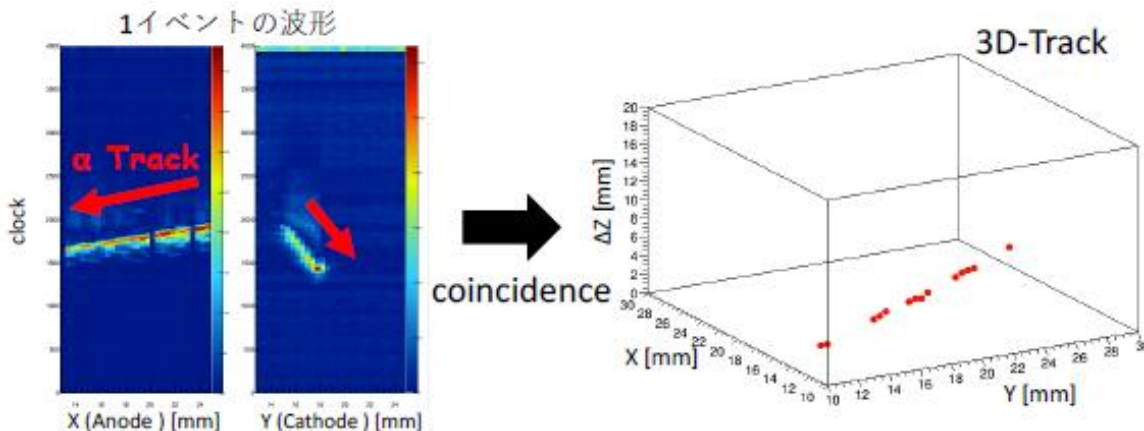
検出原理 (Time Projection Chamber)



NEWAGEでのテーマ

■ 世界でオンリーワンのテーマをやりたい放題

- 地下実験主導 (→ 博士論文 (2018年1月,2020年1月))
- 地下装置の高感度装置開発(→学振DC1, 博士論文 (2019年1月,2022年1月))
- 地下での中性子測定 (→修士論文(2017年修論発表賞))
- 陰イオンガスTPC開発 (学振DC1)
- 回路開発 (→修士論文(2018年修論発表賞、2020年))
- 陰イオンガス増幅機構解明(→修士論文(2019年))
- 機械学習による飛跡解析など(→修士論文(2021年修論発表賞・理学研究科総代))



神戸大の粒子物理研究

◆ ニュートリノ

- ニュートリノ振動

◆ HIGGS

- 発見、性質解明に

◆ 暗黒物質

- 挑戦中

次世代の物理を
ともに切り拓きましょう。

という夢あふれる学生を
教育いただければと思います。