新学術領域(研究領域提案型)

『宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核研究』

地下素核研究

領域の説明

東北大学　井上邦雄　領域代表

平成26年8月23日　第1回「地下素核研究」研究会

高エネルギー将来計画検討小委員会答申

2012年2月11日

http://www.jahep.org/office/doc/201202_hecsubc_toushin.pdf

5.1　地下素粒子実験

はじめに

地下では、宇宙線の少ない低放射能環境と年間を通じた安定な観測環境を利用して、様々な稀な現象の探索が行われている。特に、暗黒物質の直接探索とニュートリノを伴わない二重β崩壊（0νββ）の探索が活発に行われており、世界的な競争状態にある。国内ではニュートリノ観測での発展から神岡地下にプロジェクトが集中しており、神岡を中心とした地下素粒子実験コミュニティが形成されつつある。諸外国に比べて若干浅いという不利な環境にもかかわらず、それぞれが連携し既存の研究環境や資産を生かすことで、世界と比肩しさらにリードする探索感度を、低コストで迅速に実現するプロジェクトが提案されている。今後も地下素粒子実験の世界的研究拠点として継続的支援が必要である。

現状では個々のプロジェクトは大規模というほどではなく、個性に富んだ複数の手法が共存している。現在は多様性を重視しつつ、新たな発見を契機に大きなプロジェクトに集約できるよう分野の方向性を共有することが重要である。地下素粒子実験研究者は、高エネルギー分野のみならず宇宙線や原子核コミュニティにもまたがっている。これらのコミュニティと密接に協力・連携して、重要な研究が手薄にならないよう適切な評価をしつつ推進していく必要がある。

二重ベータ崩壊研究懇談会

http://www.awa.tohoku.ac.jp/DBKK/

2010年12月17，18日　岩沼市「モンタナリゾート岩沼」

目的

ニュートリノレス二重ベータ崩壊の研究は、唯一ニュートリノのマヨラナ性を検証できる実験であり、その重要性はますます鮮明になってきている。特にニュートリノ振動研究の大きな進展により、ニュートリノの有効質量に対する具体的な目標を設定できたことで、装置の大型化の必要性が明確になった。原子核物理研究者に素粒子物理研究者が加わり、コミュニティーの規模はしだいに成長しているが、双方の分野を中心とした複数の大型プロジェクトが始まりつつあるなかで、相互のより深い連携が望まれる。本研究会は、気軽な雰囲気で分野間の交流を深めつつ、現在の最前線の確認とともにコミュニティーの持つ技術・今後の課題をサーベイすることで、コミュニティーの熟成を促進し将来展望を形成することを目的とする。

参加者65名

極低バックグラウンド素粒子原子核研究懇談会

2013年4月23，24日　富山市「富山商工会議所」　http://www.lowbg.org/

開催主旨

今もなお実現していない原子核・素粒子物理の大きな課題として、ニュートリノ レス２重ベータ崩壊の発見と暗黒物質の直接検出があり、現在、世界中で激しい 競争が繰り広げられています。 これらの検出感度を上げるためには、新しい工夫が必要であることはいうまでも ありませんが、すでに、数100kgからtonスケールのターゲット質量が必要な段階 に入ってきています。

神岡の地下においても、ニュートリノレス２重ベータ崩壊の発見を目指す KamLAND-Zen、CANDLESが行われており、また、DMに関してはXMASS、NEWAGEが進展 しています。また、国内各研究機関においても、関連した様々な開発研究が進んで います。これらの実験は、低エネルギーのニュートリノ検出実験と同様に極低バッ ックグラウンドを必須とするという共通点をもっており、技術的要件を共有するこれ らの分野の研究者が有効な協力をしなければ、大規模化が必須となる今後の国際競 争に対応することはできません。

この為，これらの分野で研究を進める国内研究者が、

1）国際競争の中での各プロジェクト（R&Dを含む）の現状と将来の展望、必要なリソースの理解
2）関連する実験技術に対する情報共有
3）分野全体での効率的かつ競争力のあるロードマップの構築
4）予算要求を含むプロジェクト実現への共同歩調
5）長期的な競争力を維持するための多様性を担保したR&Dの積極的推進と支援
6）'コミュニティー'の拡大を含む人材交流の活性化と人材育成
7）国際共同実験の進め方

など、を共通の認識として、議論、推進して行く必要があるのではないでしょうか。

今回、極低バックグラウンド素粒子原子核実験談話会では、単なる研究会ではなく、 以上のような観点のもと、目的を共有する、ある種のコンソーシアム形成を見据えた 議論をおこない、今後も、研究会を継続したいと思います。

技術的要件を共有するこれ らの分野の研究者が有効な協力

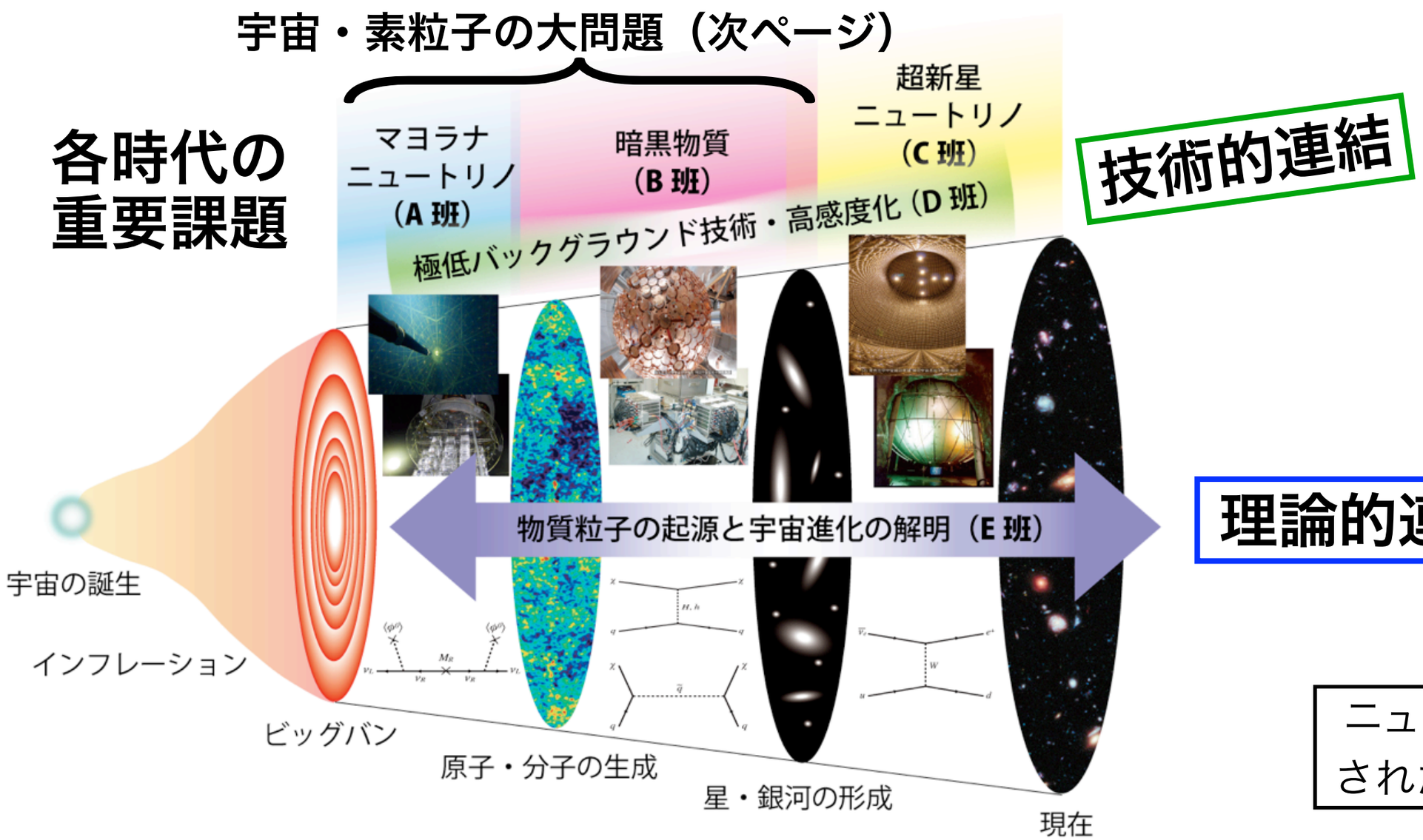
ある種のコンソーシアム形成を見据えた 議論

参加者80名

機は熟した！

地下素核研究の目標と重要性

地下の極低放射能研究を結集して、系統的に**宇宙の歴史をひもとく**



ニュートリノに残された80年来の謎

ニュートリノ：宇宙に最も多い『何でもすり抜ける』中性の物質素粒子

粒子・反粒子(次ページ)の区別が無いかも ⇒ **マヨラナニュートリノ**

暗　黒　物　質：物質を重力でひきよせる**光で見えない**未発見の素粒子

宇宙・素粒子の大問題(重要課題)

1. 宇宙初期の物質粒子生成

粒子・反粒子の区別の無いマヨラナニュートリノなら物質粒子を多く生成できる

2. 軽いニュートリノの謎

マヨラナニュートリノなら軽くできる

3. 暗黒物質の謎

複数の発見の示唆と反証

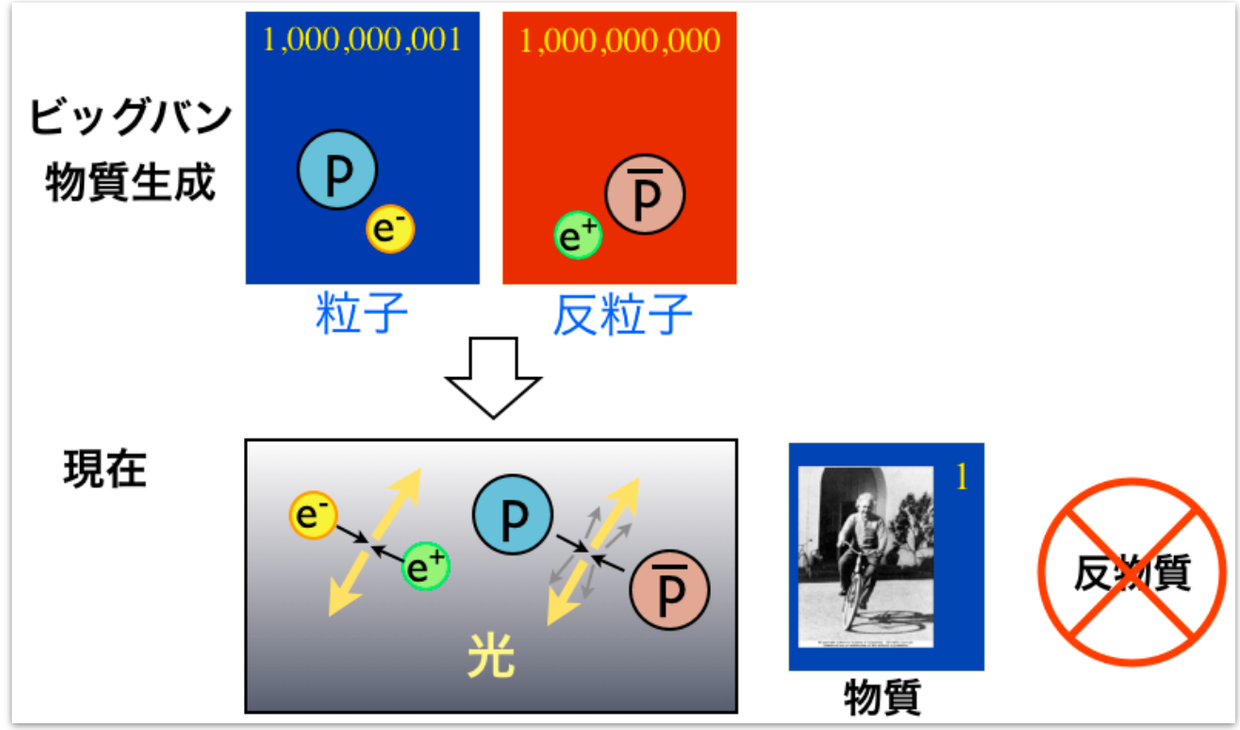
4. 暗黒エネルギーの謎（対象外）

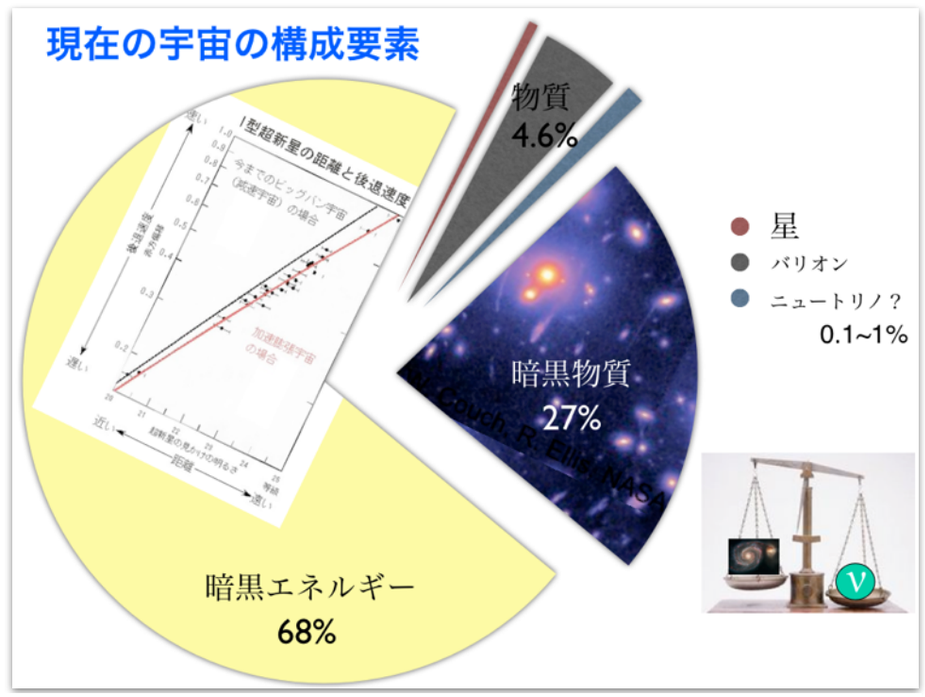
理論？？、実験手法？？？？

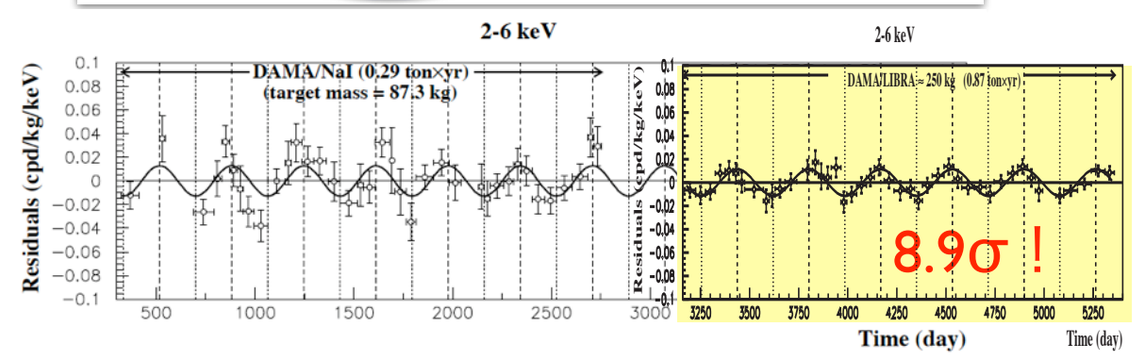
マヨラナνの検証 ⇒ A班	暗黒物質の検証 ⇒ B班

いずれも希な現象の探索

⇒ 極低バックグラウンドが必須

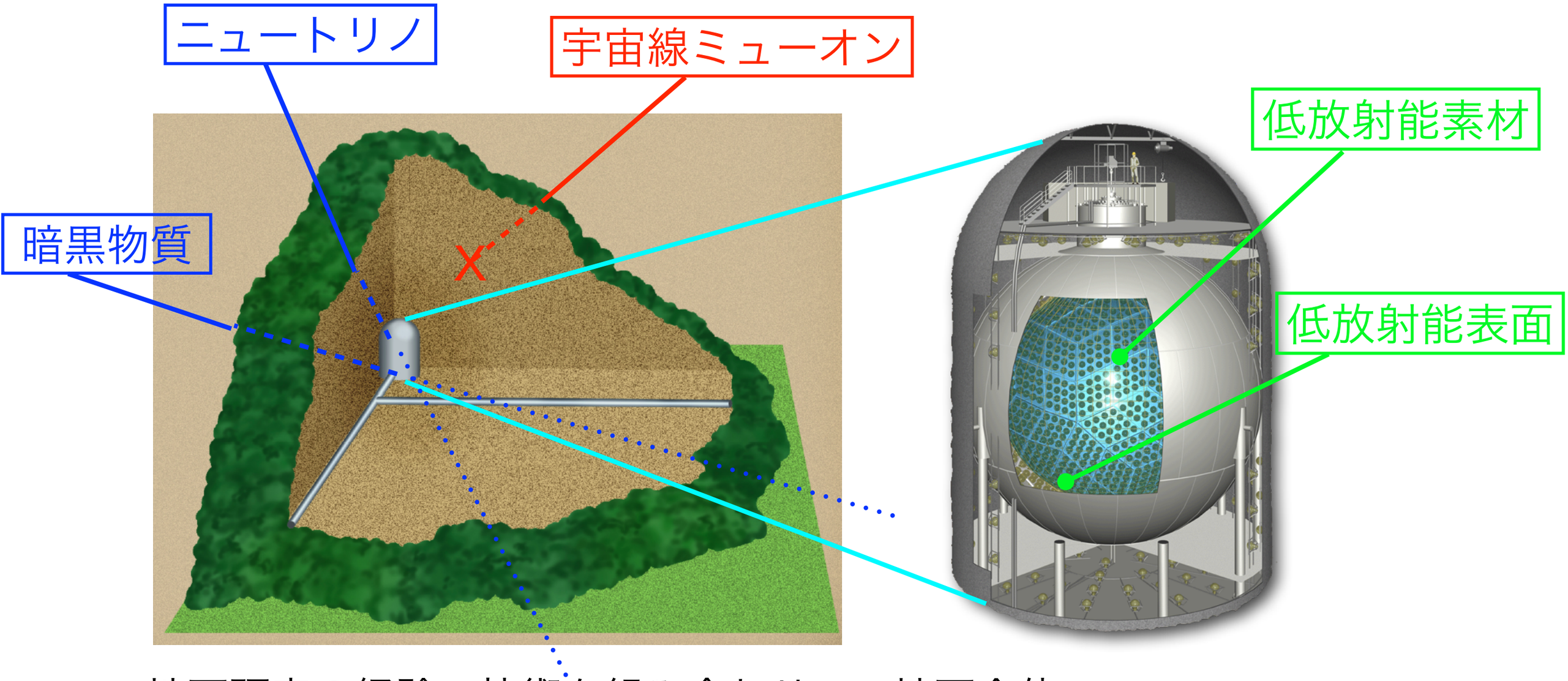






地下素核研究領域の構成

「地下」？　低バックグラウンド　＝　地下　＋　低放射能



地下研究の経験・技術を組み合わせて、地下全体で

低　⇒　極低　を実現する！

神岡「地下」の実績

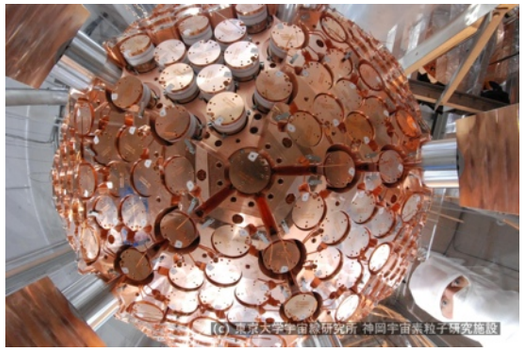
ノーベル賞リソグラフは、超新星・太陽ニュートリノ観測を表現

- 2002年　小柴昌俊先生ノーベル賞
  「ニュートリノ天文学の創出」
- 素粒子原子核実験で引用数2000＋
  ヒッグス粒子（2編）、トップクォーク（2編）、**ニュートリノ振動（3編）**
  KamLAND（原子炉ν）、Super-Kamiokande（大気ν）
- 天体（超新星、太陽、地球）ニュートリノ観測でも世界をリード
  「ニュートリノ地球物理も創出」

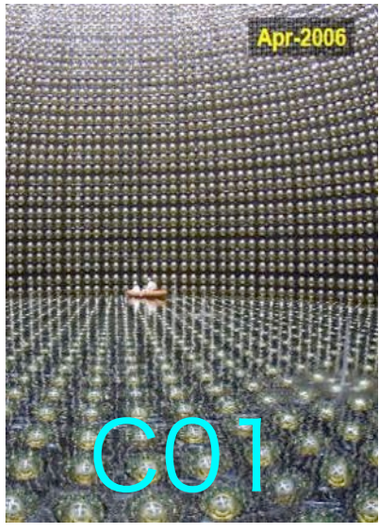
神岡「地下」での極低放射能の経験

- 世界最大サイズ　極低放射能油　極低放射能キセノン　極低放射能水

A01

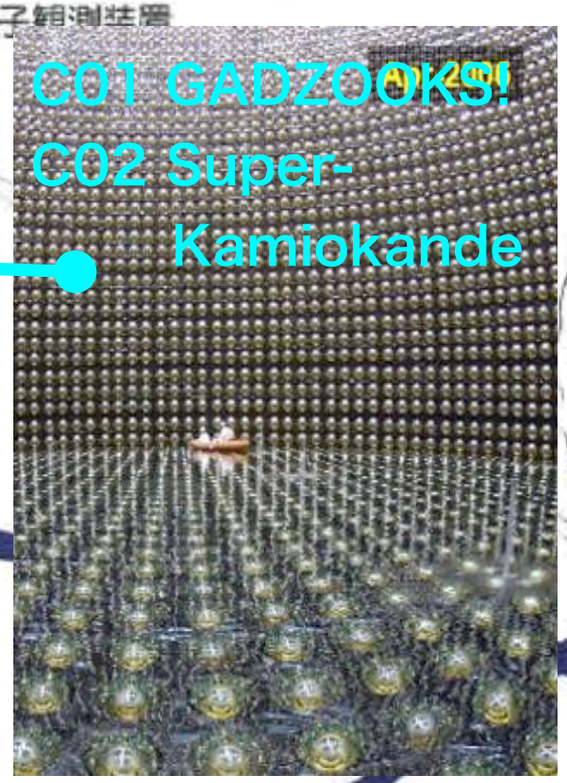


B01



C01

地下素核研究領域の構成-3



液体シンチレーター反ニュートリノ観測施設
カムランド

東北大区域
東大区域
共用区域

大型水チェレンコフ宇宙素粒子観測装置

LAB-E
LAB-C,D
LAB-B

D01 極低放射能測定

B02 NEWAGE

総括班の構成

統括・評価

井上 邦雄 KamLAND, KamLAND-Zen実験代表者
東北大地下施設責任者 **領域統括**

岸本 忠史 CANDLES実験代表者

鈴木 洋一郎 Super-Kamiokande, XMASS実験代表者

中畑 雅行 GADZOOKS! 実験代表者，東大地下施設責任者

柳田 勉 素粒子的宇宙像の世界的権威 宇宙物質生成・軽いν理論の発案者

データベース

竹内 康雄 極低放射能測定のトップランナー

成果発信

吉田 斉 若
地下原子核実験の次世代のリーダー

岸本 康宏 若
地下素粒子実験の次世代のリーダー

石徹白 晃治 若
ニュートリノ物理と天体物理の懸け橋

研究会

身内 賢太朗 若
NEWAGE実験代表者

作田 誠
ν原子核反応の世界的権威

濱口 幸一 若
素粒子的宇宙像の次世代のリーダー

主要地下実験代表者・地下施設責任者，世界的権威が結集
迅速かつ大胆な協力の推進

主要地下実験・素粒子的宇宙論次世代リーダーが参画
長期的な人材を確保

領域内交流促進

研究会で波及効果促進
データベースで情報蓄積

研究推進と成果公表

地下素核研究領域の必要性

複数領域にまたがる地下素核研究

● **5分野！！合同セッション**@物理学会

27aTE　実験核物理領域，理論核物理領域，素粒子実験領域，素粒子論領域，宇宙線・宇宙物理領域合同　9:00 ～ 12:00

二重ベータ崩壊（I）（合同）

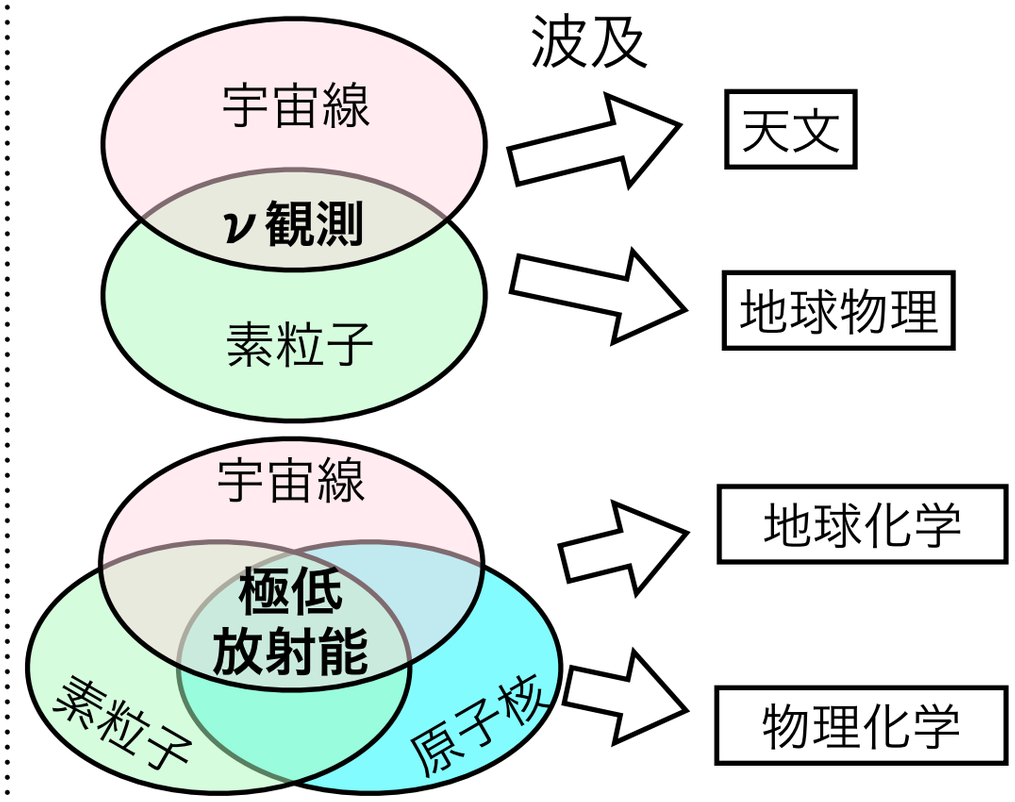
29pTE　実験核物理領域，理論核物理領域，素粒子実験領域，素粒子論領域，宇宙線・宇宙物理領域合同　13:30 ～ 17:00

暗黒物質探索（I）（合同）

（詳細は実験核物理領域に掲載）

● A01,B01将来計画は宇宙線で最高評価、
高エネルギーから学術会議マスタープランに。

● 他分野への波及も活発に



課題

● 長期的な人材確保（わかりやすい分野設定が必要）
● 各実験単独では、世界的な大型化の流れに打ち勝てない

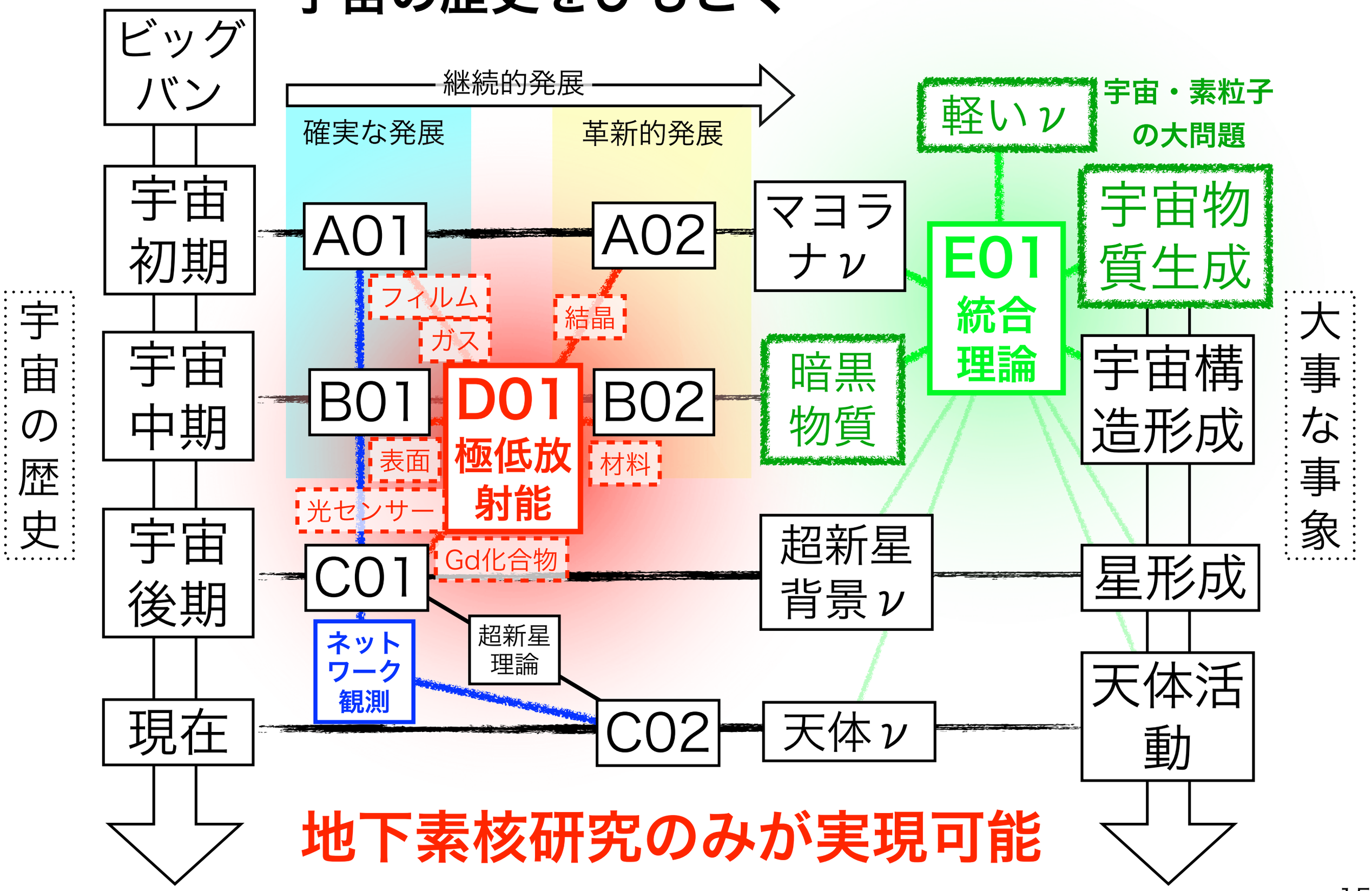
⇩ (地下コンソーシアム構築を意識した領域形成の機運)

新領域

● **極低放射能技術**をもちより、個別の連携から大連合へ
● 相補的・相乗的な技術交流、人材交流、装置共有の効率化
● 長期的な視野で、戦略的技術開発、人材育成
● 抜群の競争力を長期にわたって（高いコストパフォーマンスで）継続

まとめ

極低放射能と統合理論で地下の総力を連結して宇宙の歴史をひもとく



第1回 「地下素核研究」研究会

2014年8月23，24日　大阪大学シグマホール　http://www.lowbg.org/ugnd/

参加登録者数　125名！！

新領域

- **極低放射能技術**をもちより、個別の連携から大連合へ
- 相補的・相乗的な技術交流、人材交流、装置共有の効率化
- 長期的な視野で、戦略的技術開発、人材育成
- 抜群の競争力を長期にわたって（高いコストパフォーマンスで）継続

研究会の構成

○計画班発表

○関連研究発表

○全体会議

コミュニティーの育成と

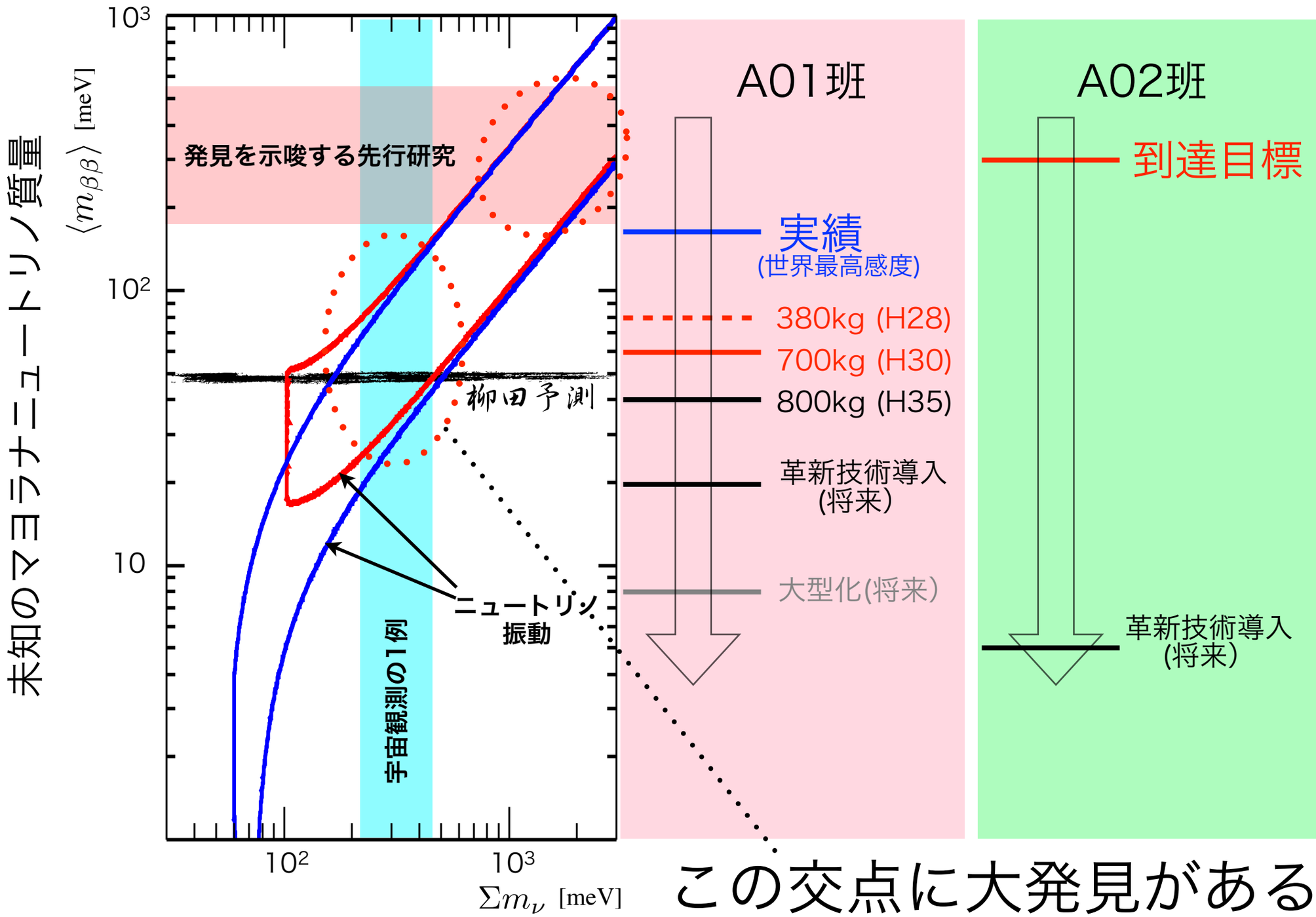
地下コンソーシアム構築を一緒に模索しましょう！！

計画研究の目標とシナジー効果

マヨラナνの検証

A班
戦略

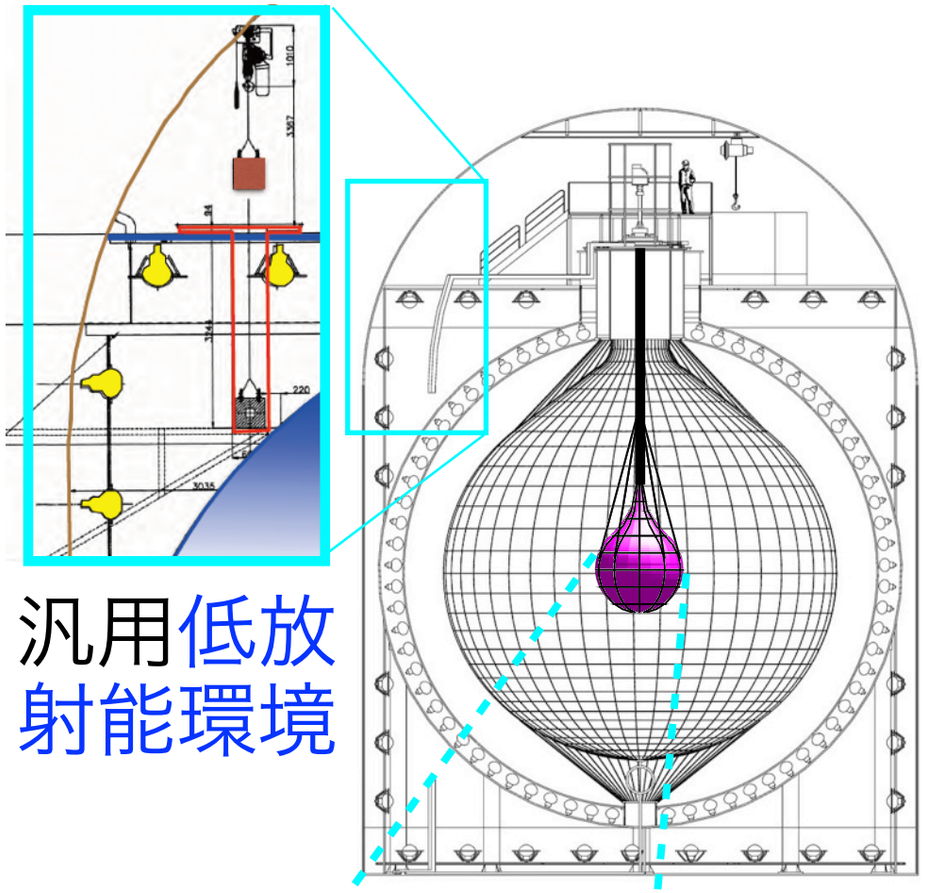
世界をリードする性能を発展させつつ、次世代の革新技術を育成する。
最初の発見を目指し、複数原子核、複数技術も担保する。



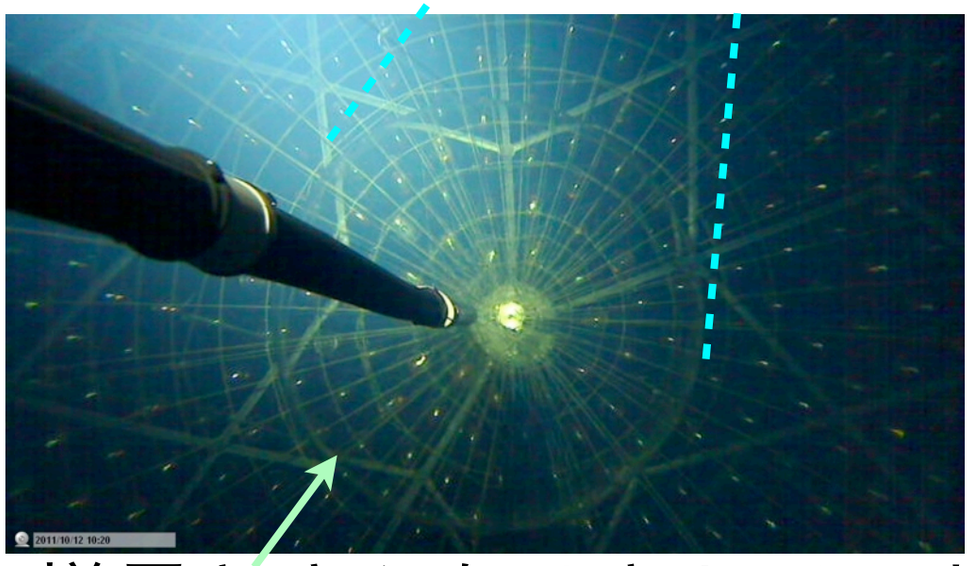
この交点に大発見があるかも！

計画研究の目標とシナジー効果-2

A01 ^{136}Xe含有液体シンチレータ



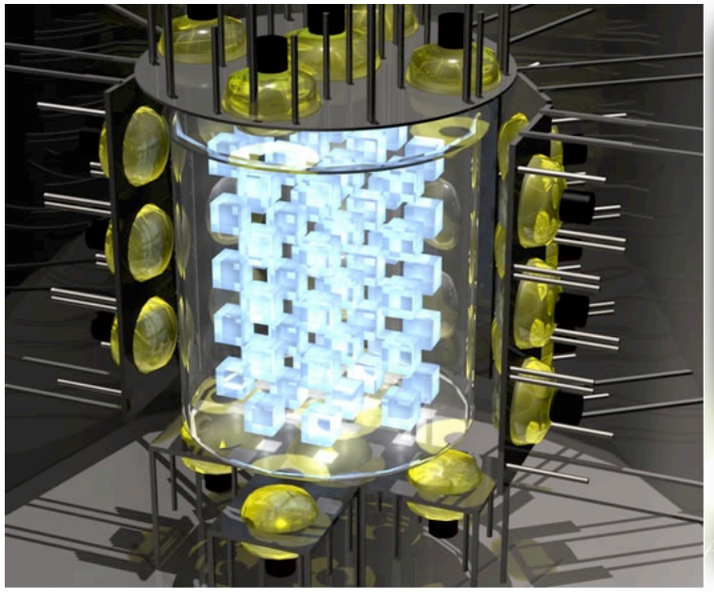
汎用低放射能環境

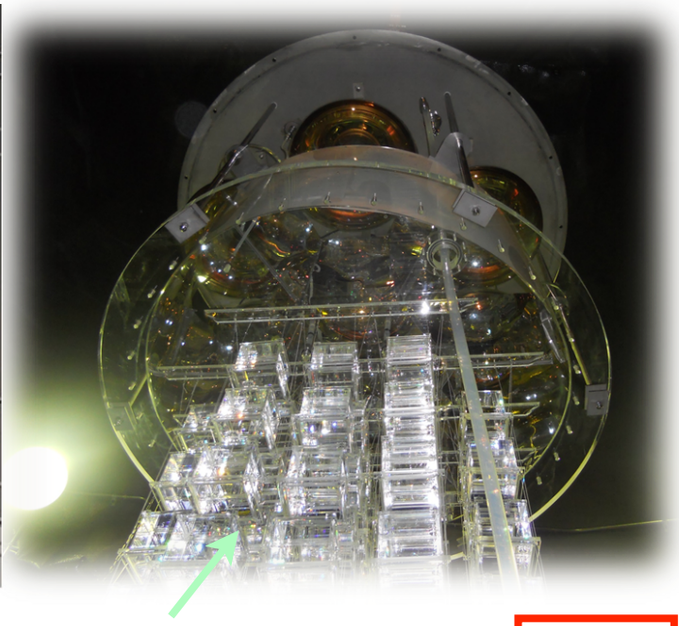


増量とさらなるキセノンガス・
フィルム表面極低放射能化 課題

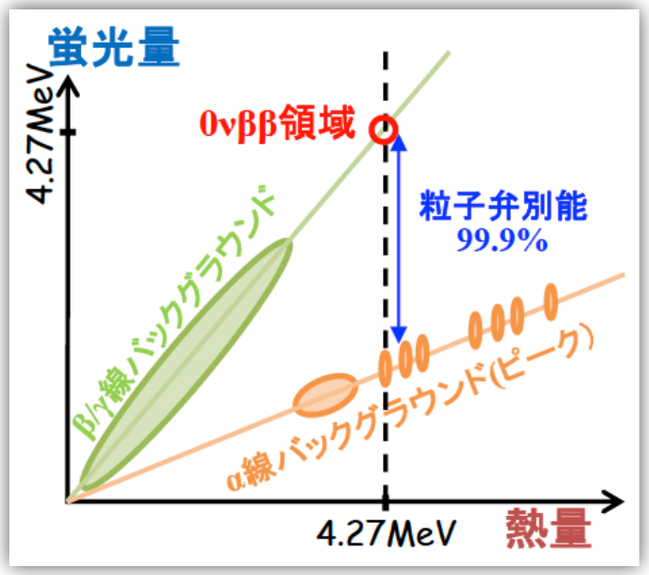
A02 ^{48}Ca含有結晶シンチレータ

^{48}Ca含有極低温蛍光熱量計





同位体濃縮と極低放射能結晶成長 課題



暗黒物質の検証

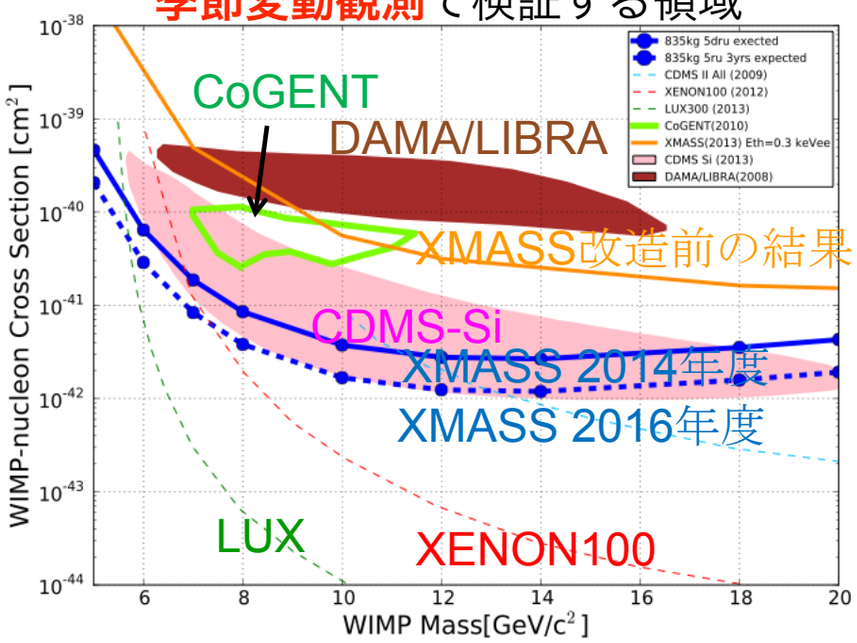
B班 戦略

発見の主張を検証しつつ、世界最高感度を目指す。
方向感度を中心に、次世代の革新技術を育成する。

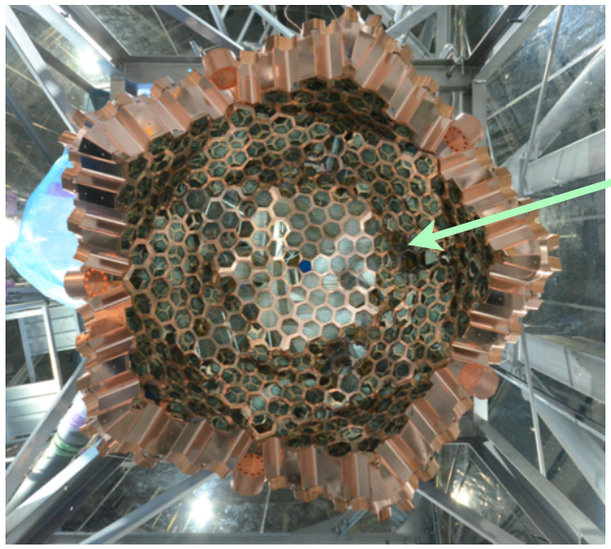
大発見を期待！

B01 液体キセノンシンチレータ

季節変動観測で検証する領域



XMASS装置内部



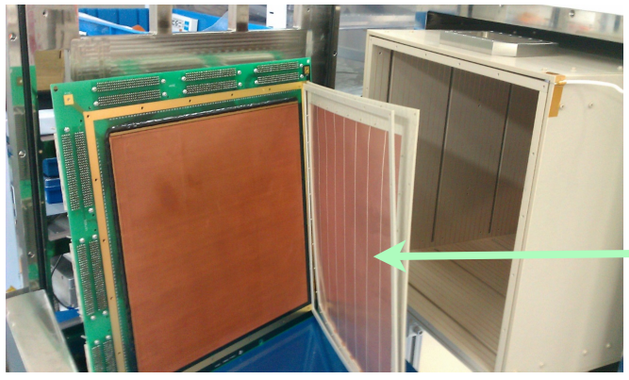
素材表面・光センサー極低放射能化と素材中高感度放射能測定

課題

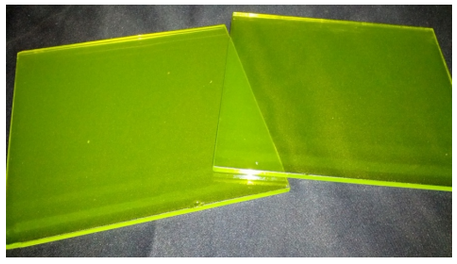
低閾値、多様な暗黒物質に感度

B02 **方向有感**ガスチェンバー、写真乾板

ピクセル検出器、ガス電子増幅を使った時間射影チェンバー



写真乾板



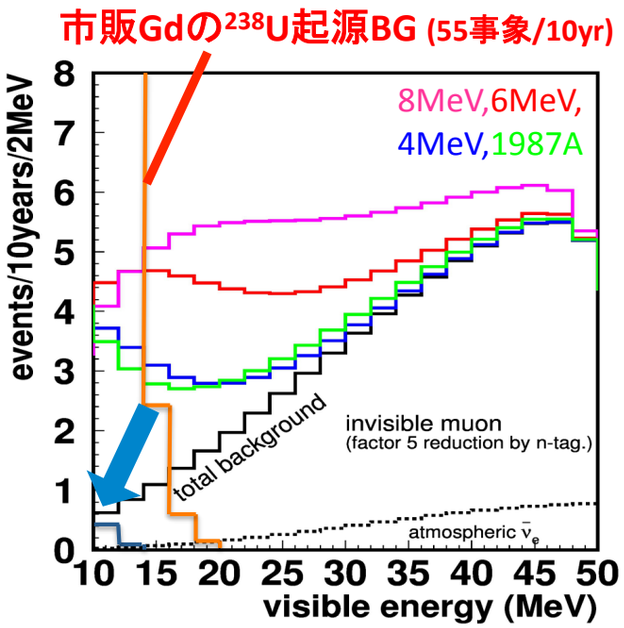
材料の低放射能化 **課題**

星形成・天体活動の究明

C班 戦略

超新星の詳細観測を逃さない。
波及効果を高める。

C01 低閾値超新星背景ニュートリノ観測



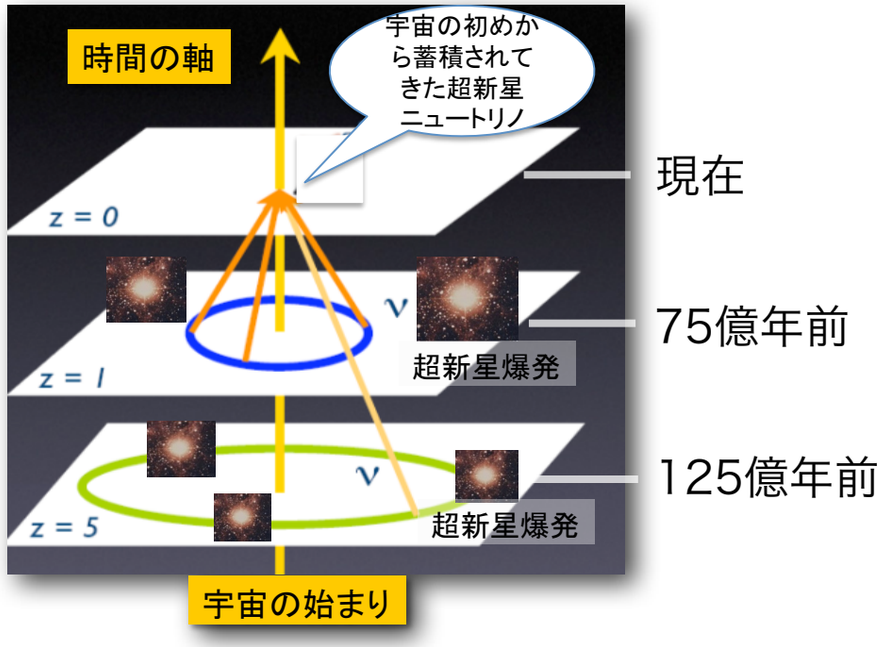
ガドリニウムの
低放射能化 **課題**

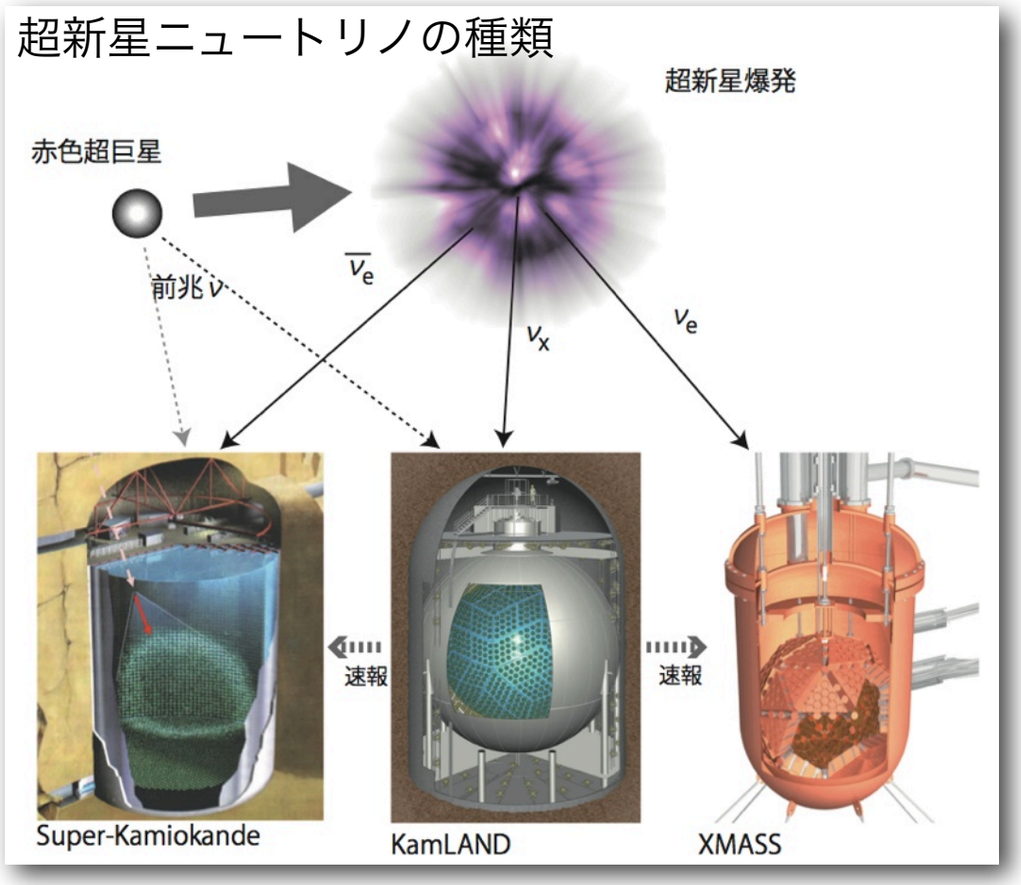
C02 天体ニュートリノネットワーク観測

課題

- 超新星ニュートリノ
  - ⇒ 光学観測への速報（数時間前）
- 極近傍超新星前兆ニュートリノ
  - ⇒ ν・重力波・光学観測へ速報（数日前）
- 3装置連携で全種類ニュートリノ観測

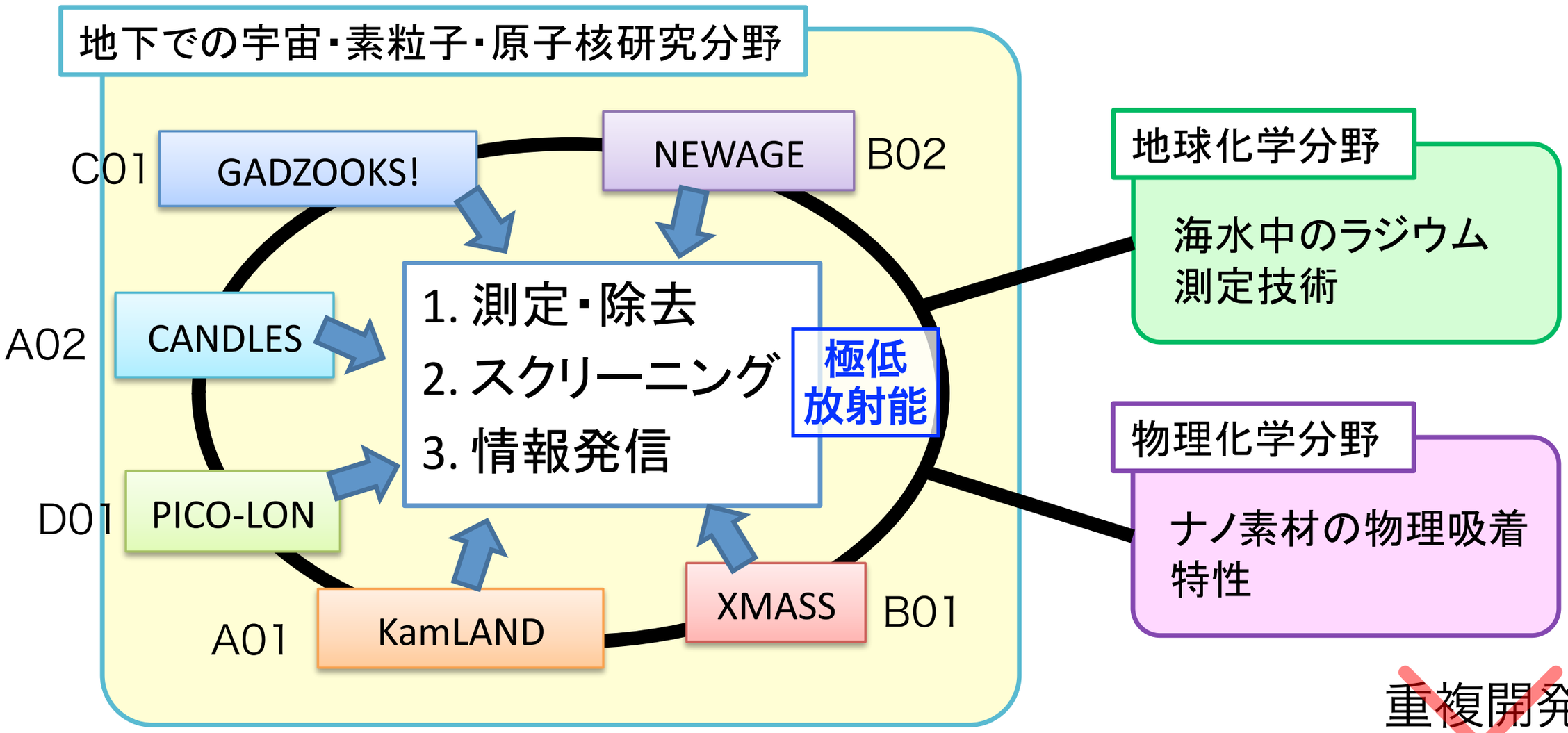
超新星背景ニュートリノ





技術的連結

D01 極低放射能技術・高感度化



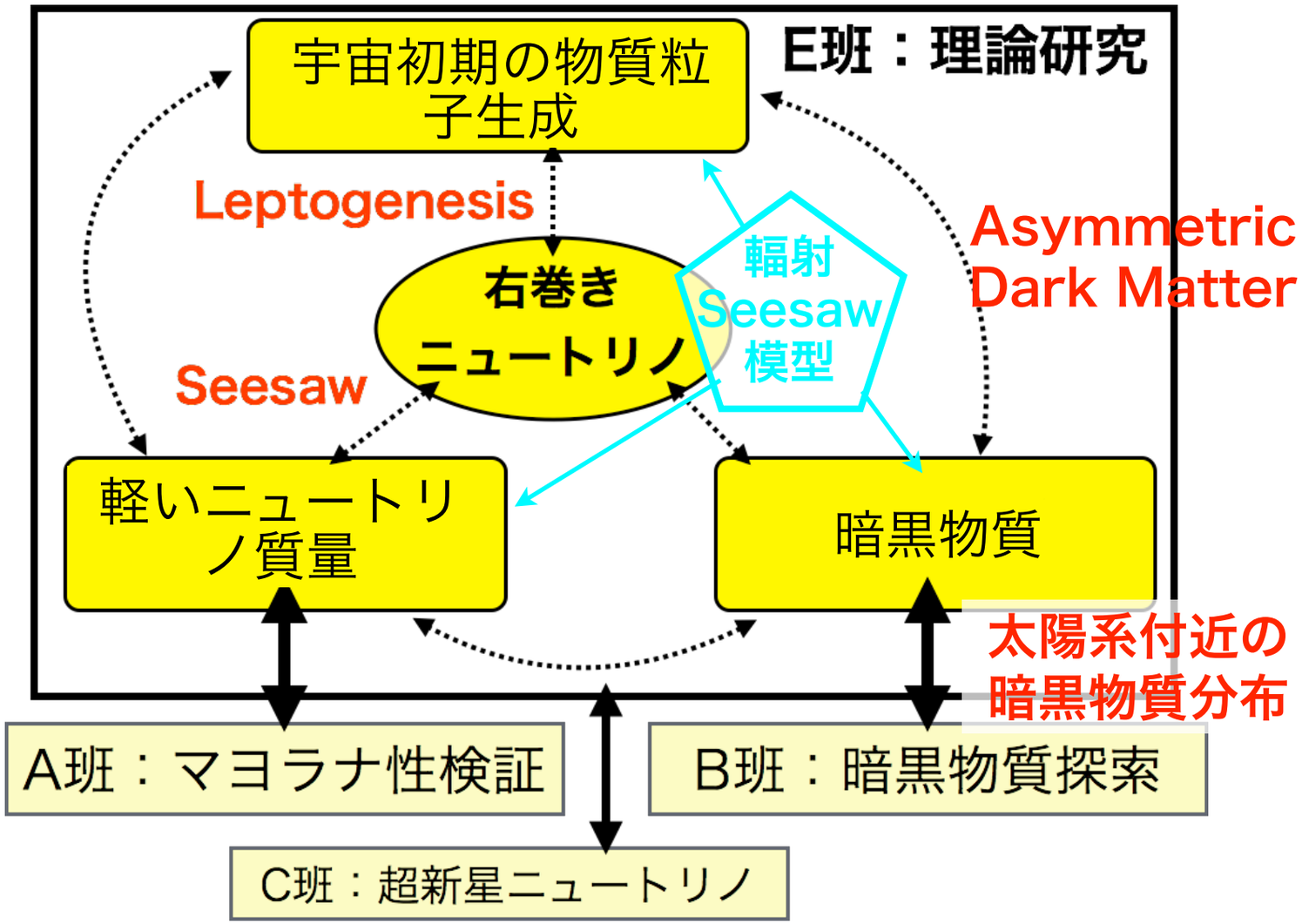
- 共通課題（極低放射能技術）を共有化し、発展させる。
- 低放射能素材・技術をデータベース化し世界にも発信する。

A, B, C 班共通の 課題 を効率的に解決！！

~~重複開発~~
~~装置重複~~
迅速発展
人材交流

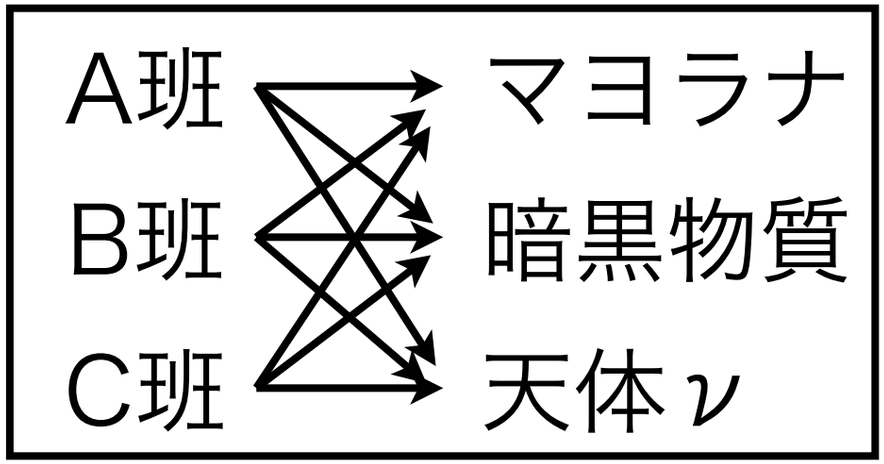
理論的連結

E01 物質粒子の起源と宇宙進化の解明



A班 ⟶ マヨラナ
B班 ⟶ 暗黒物質
C班 ⟶ 天体ν

⇩



● マヨラナニュートリノから派生する右巻きニュートリノを中心に、
「宇宙・素粒子の大問題」を個々につなぎ、最終的に全体を統合する。

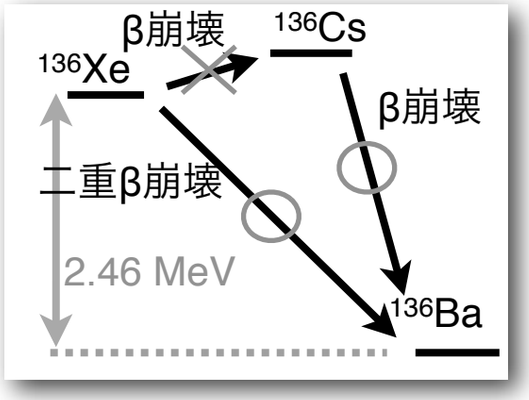
宇宙の歴史を記述する新しいパラダイムを期待！

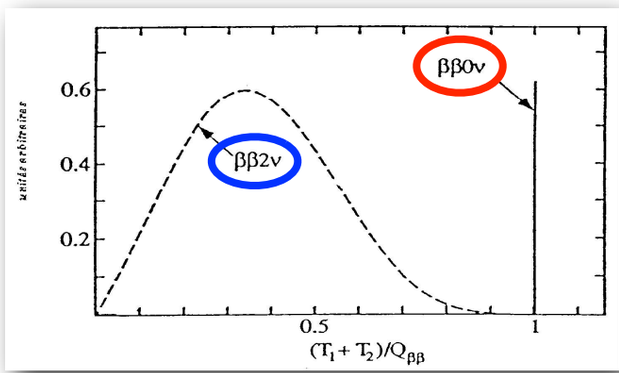
参考資料

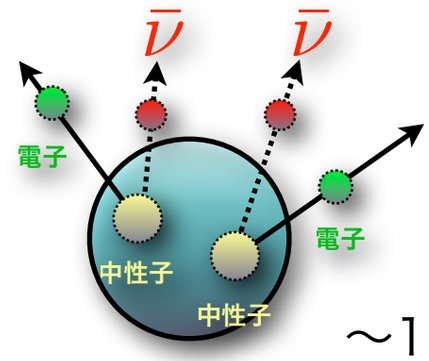
各計画研究

A01	p17-18
A02	p19-20
B01	p21-22
B02	p23-24
C01	p25-26
C02	p27-28
D01	p29-30
E01	p31-32
年次計画	p33
他領域との関係	p34
実験名の意味	p35

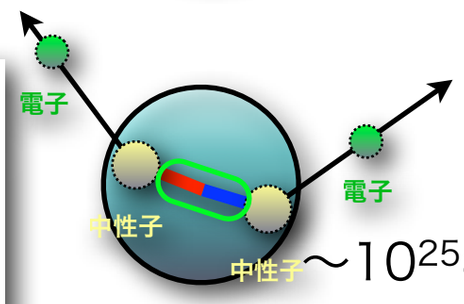
A01: 大型液体シンチレータ検出器でのニュートリノのマヨラナ性と世代数の研究





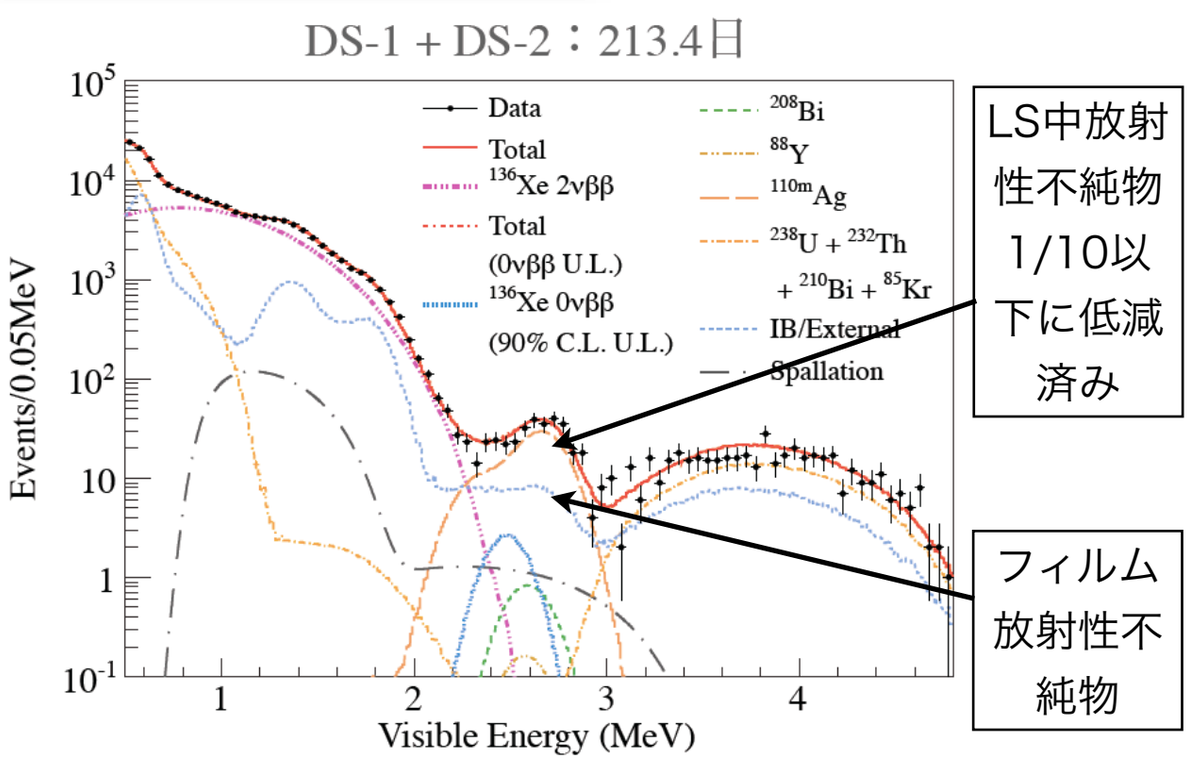


～10^{21}年



～10^{25}年以上

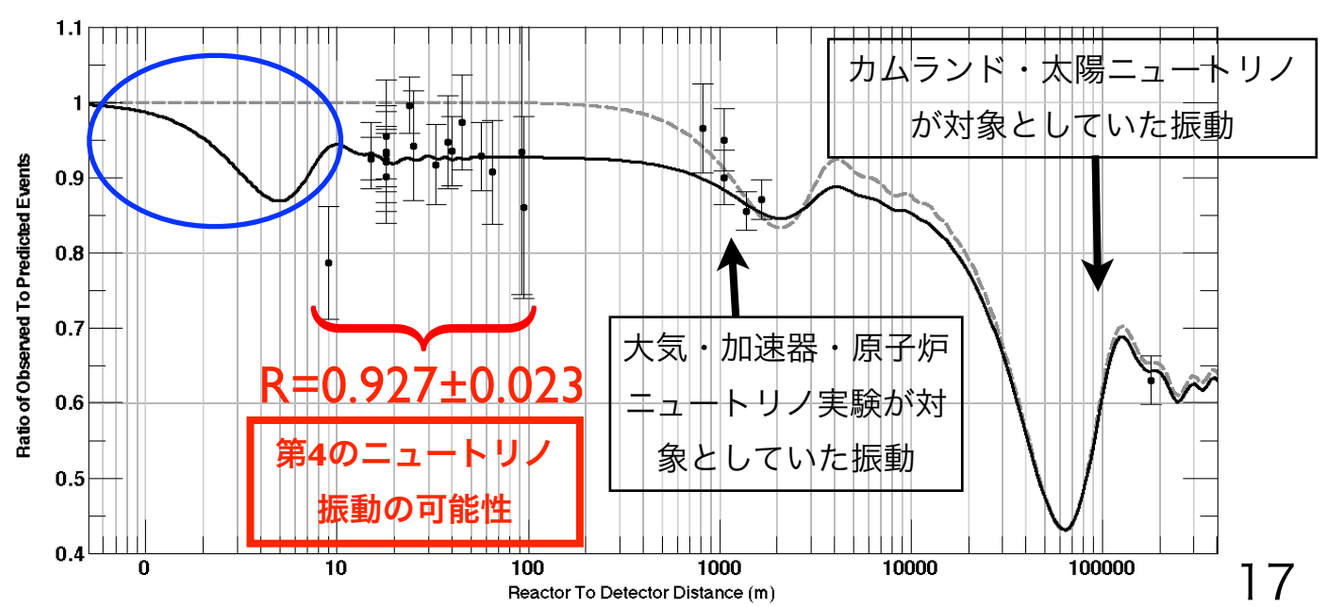
ニュートリノがマヨラナ性を持つときに起きる



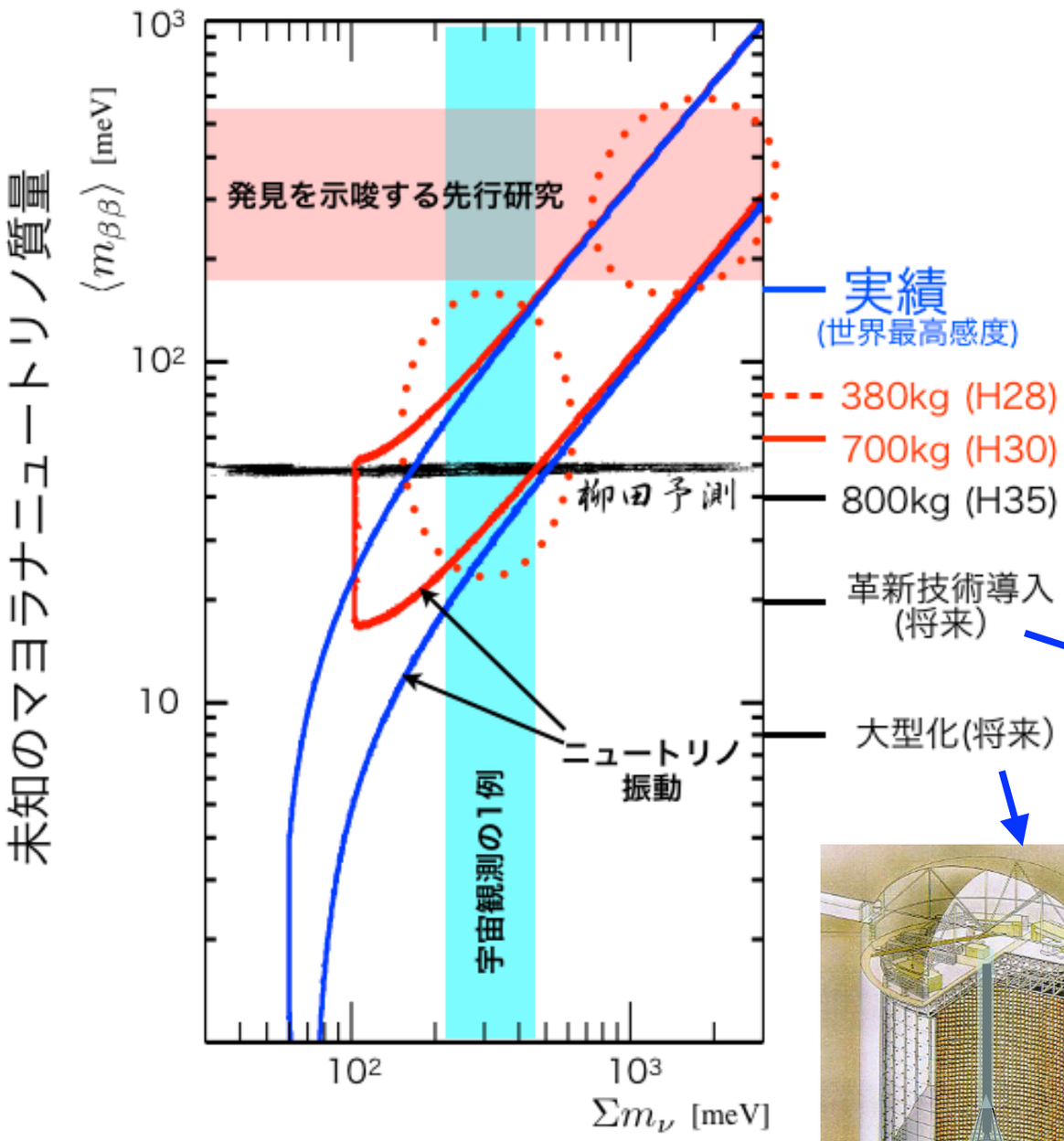
第4世代ステライルニュートリノのヒント

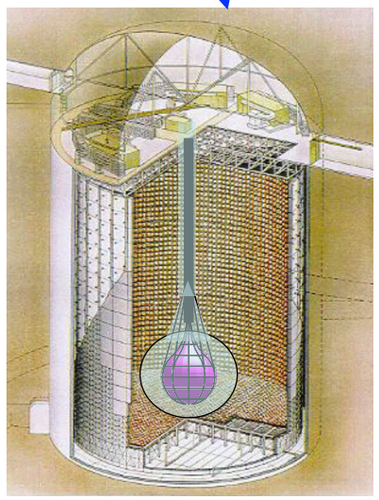
	ニュートリノ源	対象	有意さ
原子炉	β崩壊	$\bar{\nu}_e$ 欠損	3.0σ
ガリウム	電子捕獲	ν_e 欠損	2.7σ
LSND	静止状態での崩壊	$\bar{\nu}_\mu \to \bar{\nu}_e$	3.8σ
MiniBoone	短基線加速器	$\nu_\mu \to \nu_e$ $\bar{\nu}_\mu \to \bar{\nu}_e$	3.8σ
宇宙論	ビッグバン	有効世代数	~2σ

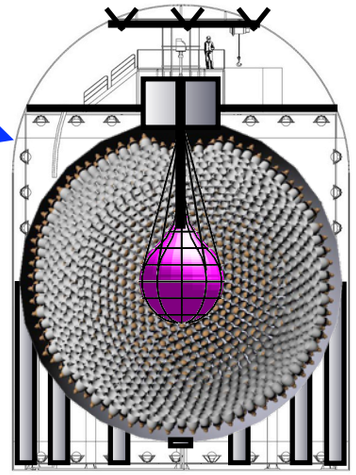
過去の原子炉反ニュートリノ測定結果



A01: 大型液体シンチレータ検出器でのニュートリノのマヨラナ性と世代数の研究

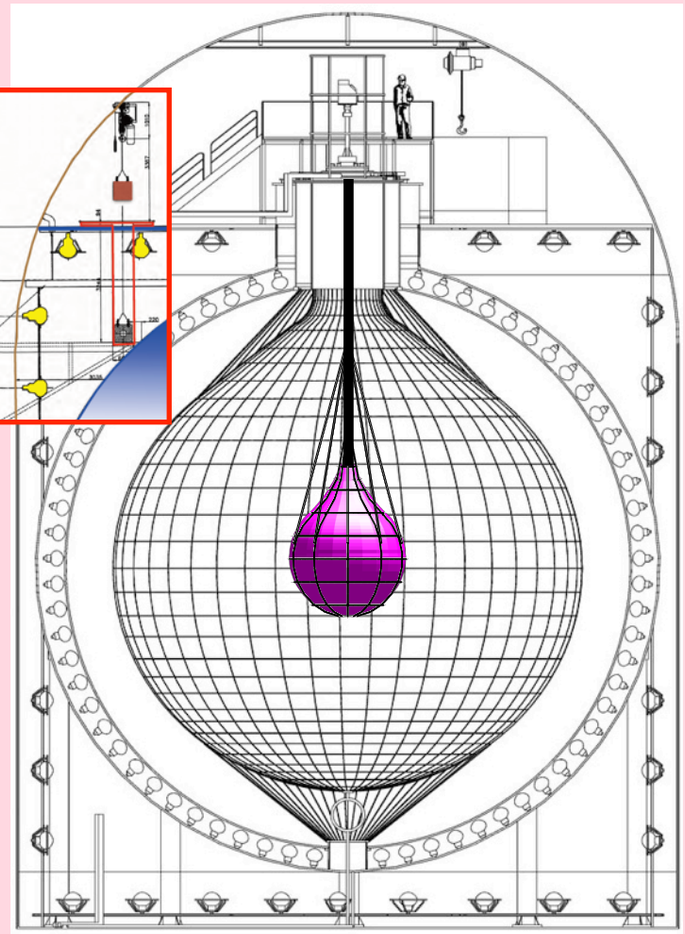






BG識別能大幅向上

高分解能
発光フィルム
高感度撮像



マヨラナ性

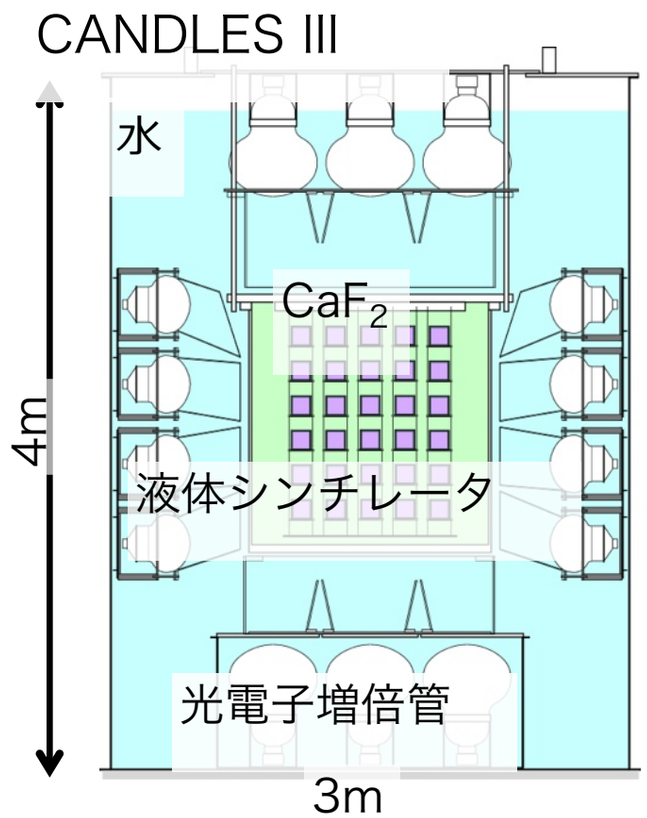
極低放射能フィルム
キセノン増量

世代数

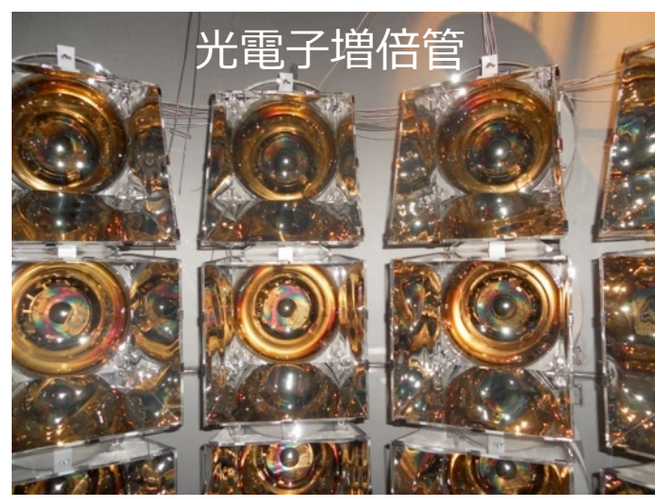
超短距離ニュートリノ振動
を同時観測

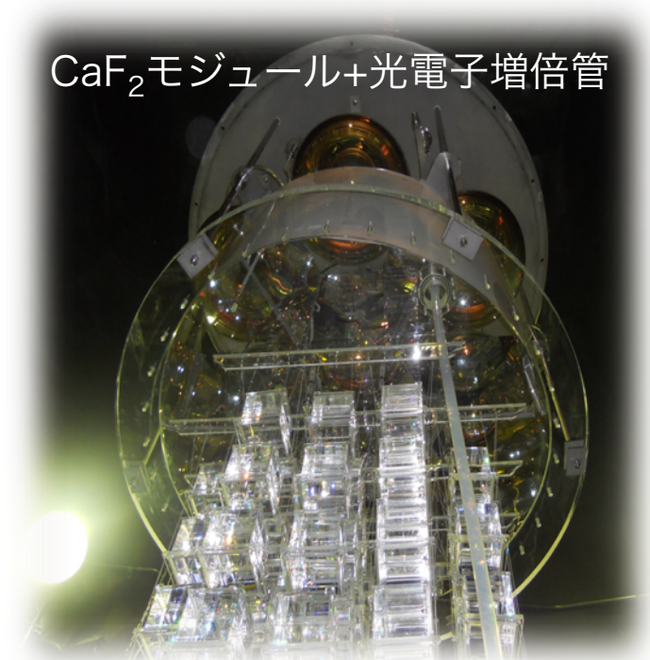
A02: ^{48}Caを用いたニュートリノのマヨラナ性の研究と超高分解能技術の開発

^{48}Ca　大きな$Q_{\beta\beta}$値→少ないBG、大きな崩壊率
自然存在比0.19%



CaF_2結晶(305kg,0.19%^{48}Ca)



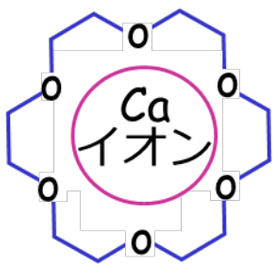


高感度化１：同位体濃縮、極低放射能結晶成長
高感度化２：蛍光熱量検出器

A02: ^{48}Caを用いたニュートリノのマヨラナ性の研究と超高分解能技術の開発

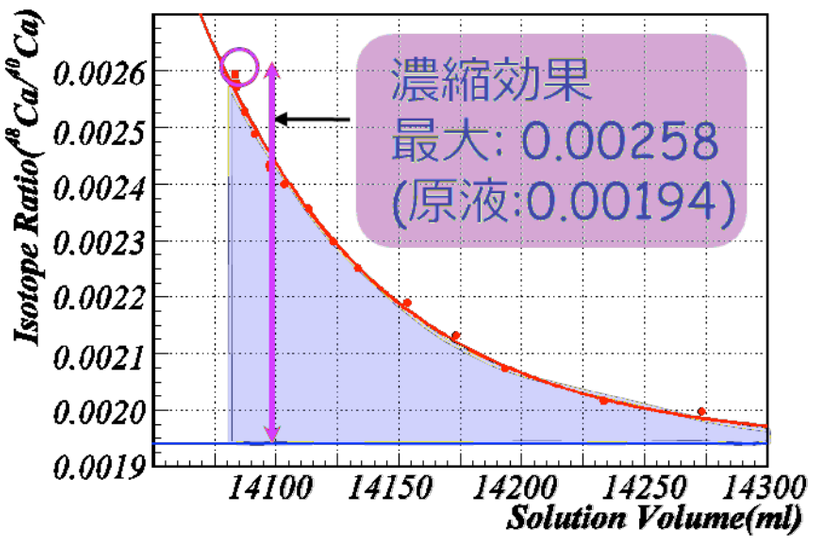
高感度化１：同位体濃縮

化学法



クラウンエーテル

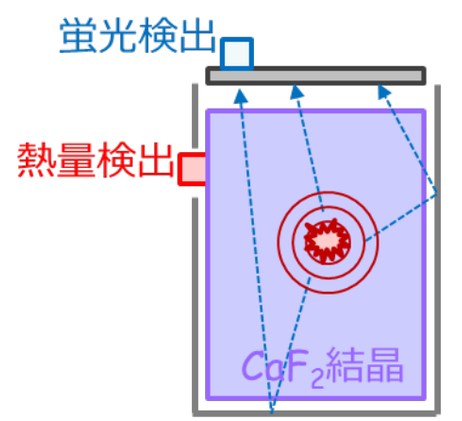
濃縮実験~250時間泳動の結果



- 大量濃縮システム開発
  大量濃縮＋純化：10倍濃縮(2%)、~100kg
- 結晶製造（極低放射能結晶成長：D班と共同）
- さらなる高濃縮手法開発（例：レーザー濃縮）

高感度化２：蛍光熱量検出器開発

蛍光熱量検出器

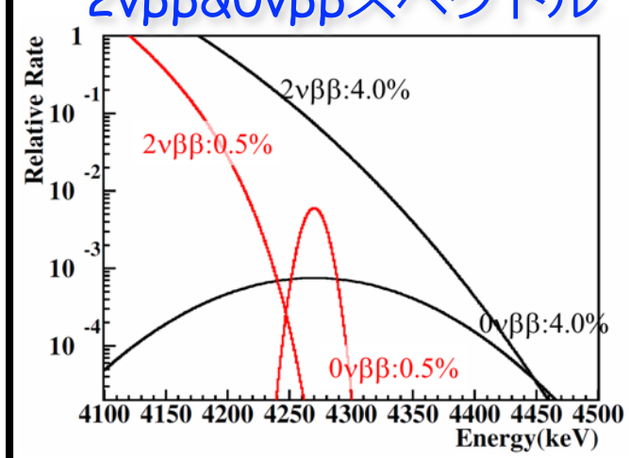


$$C_V \propto (T/\Theta_D)^3$$

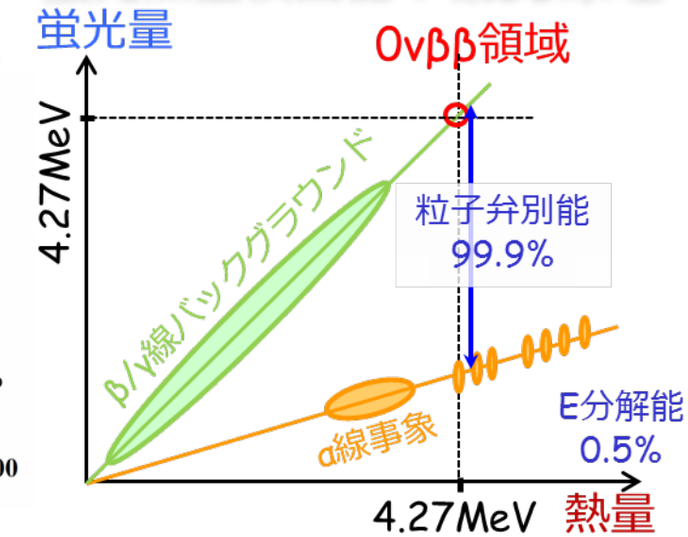
測定	温度上昇@~10mK シンチレーション

- 超高分解能
- BG識別能

エネルギー分解能と
2νββ&0νββスペクトル



蛍光熱量検出器：低BG原理

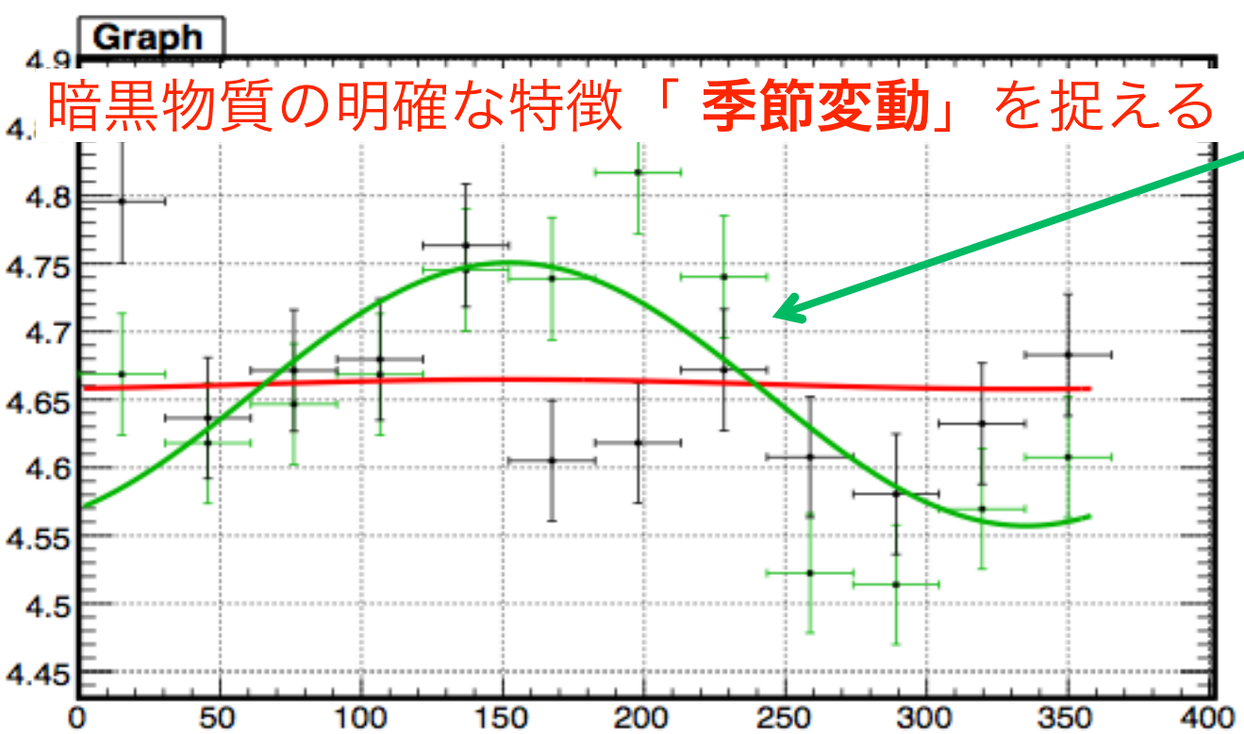


B01: 大型実験装置による暗黒物質の直接探索

低閾値，世界最大の検出器XMASSで，従来の枠を超えた多様な暗黒物質に迫る

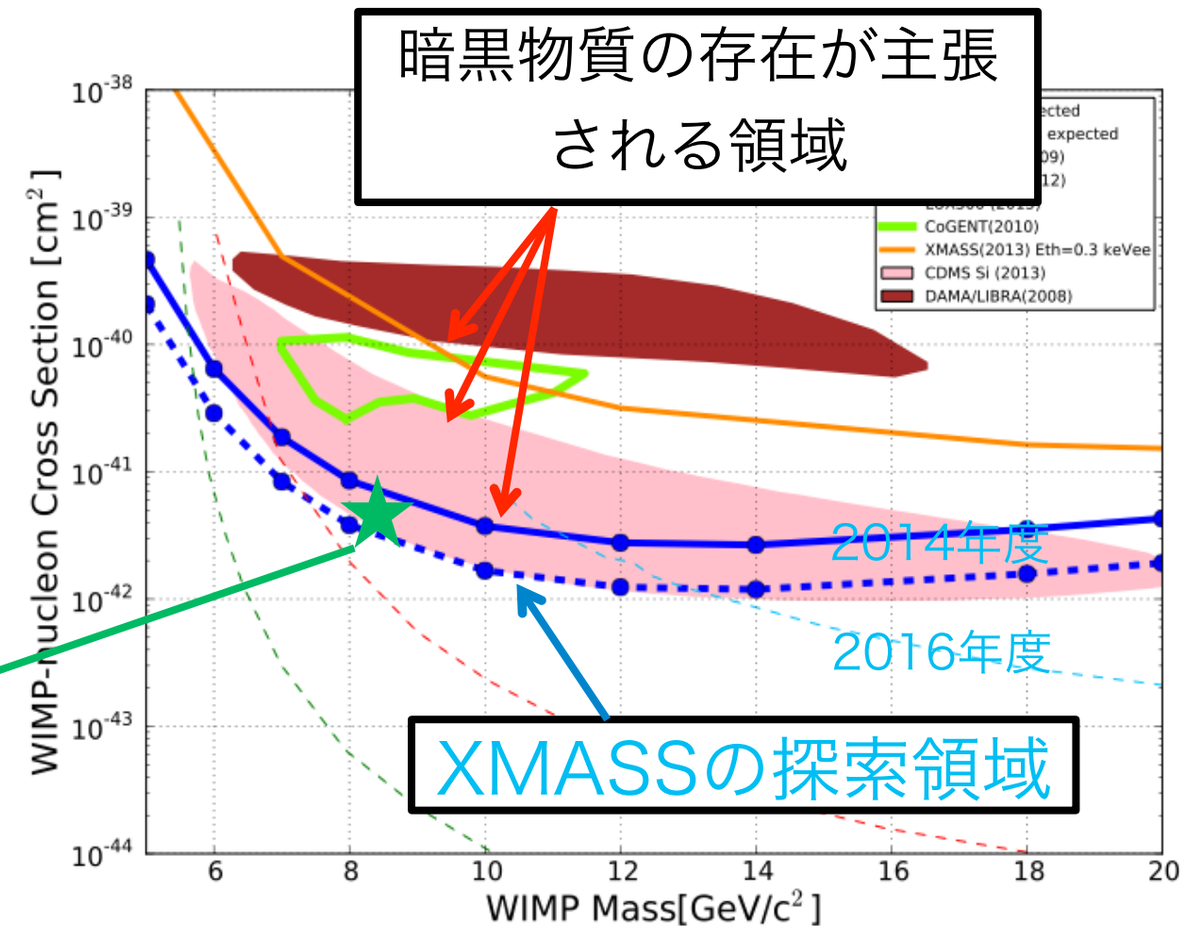
暗黒物質をめぐる論争

- 発見の主張⇔否定の主張
- **大統計測定**で論争に決着



世界最高レベルの低バックグラウンド

O(10^{-4})/kg/keV_{ee}/day @40keV



XMASSは電子/γ線事象にも感度有

通常の原子核弾性散乱に加え，

我々の予期せぬ暗黒物質等も探索可能

例：非弾性散乱事象，太陽アクシオン

B01: 大型実験装置による暗黒物質の直接探索

世界最高感度で暗黒物質に迫る

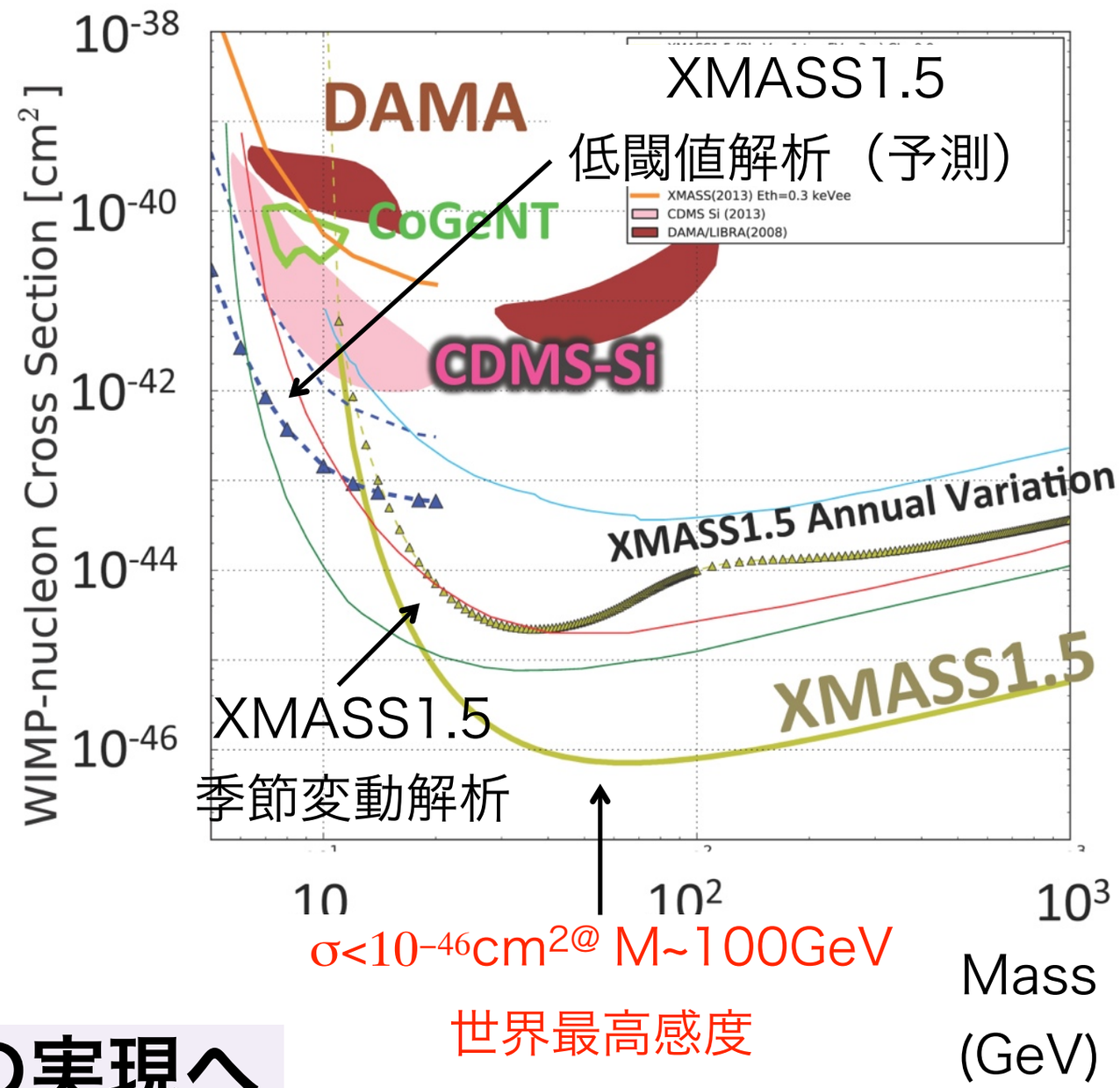
ハード・ソフト両面から
低バックグラウンド化を推進

- 新開発凸型光電子増倍管
- 表面放射線除去技術の開発
- 精密なシミュレーション

XMASS の経験 ＋ 領域内シナジー (低バックグランド)

次世代大型暗黒物質検出装置の実現へ

将来のXMASS（XMASS1.5)



世界最高感度の検出器で暗黒物質の発見から超精密測定の時代へ移行

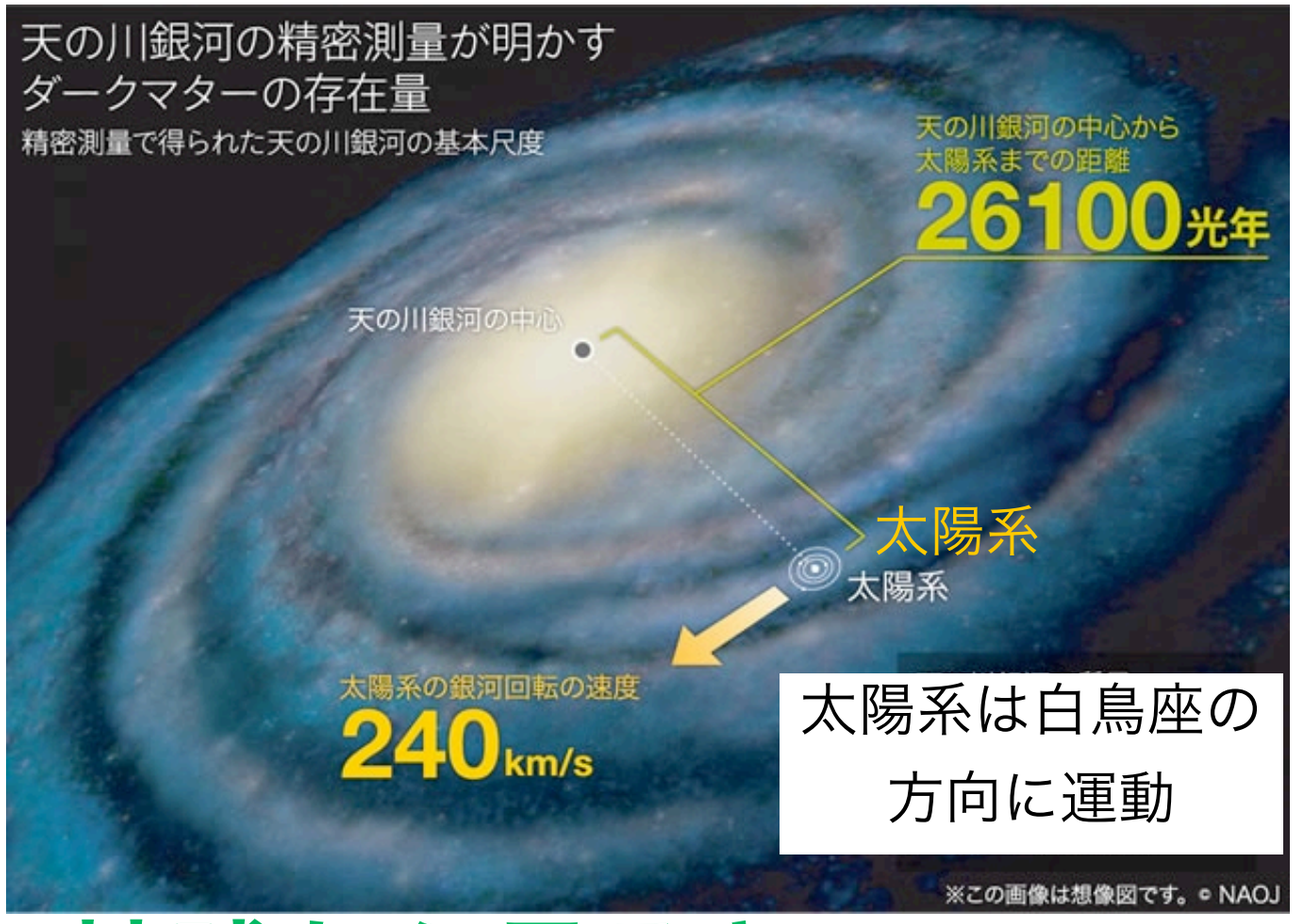
B02: 低バックグラウンド技術を応用した方向感度をもつ暗黒物質探索の基礎研究

暗黒物質のもう１つの特徴「暗黒物質の風」を捉えろ！

暗黒物質事象の２つの特徴

- 季節変動 → B01班で利用
- 方向性　→ B02班で実現

方向性は、暗黒物質の際だった特徴であるが、その測定は容易でない。



地球から見ると，
暗黒物質の「風」が
白鳥座から吹いている

B02: 低バックグラウンド技術を応用した方向感度をもつ暗黒物質探索の基礎研究

暗黒物質のもう１つの特徴「暗黒物質の風」を捉えろ！

２つの挑戦

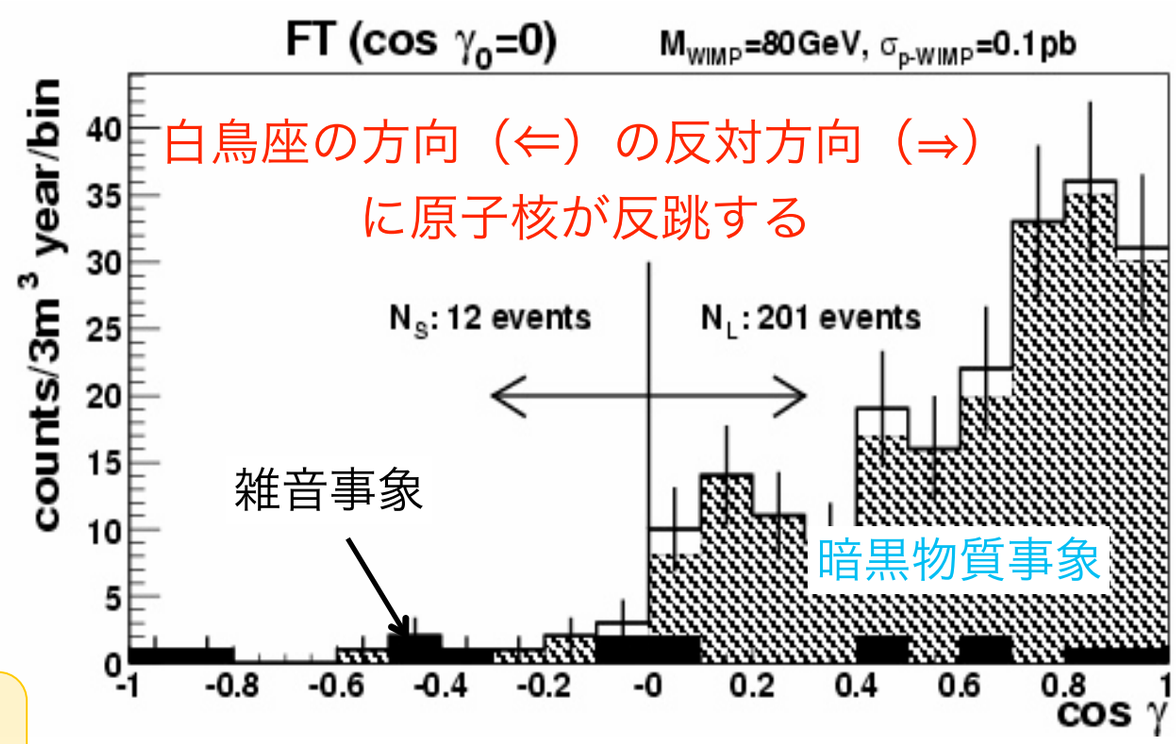
・暗黒物質による

僅かな飛跡の測定を実現

・低バックグラウンド化

革新的な検出手法 ＋ 領域内シナジー(低バックグランド)

方向感度を持つ暗黒物質探索装置の実現



強力な領域内シナジー効果

２つの暗黒物質検出器，即ち

・大統計の大型検出器（B01）

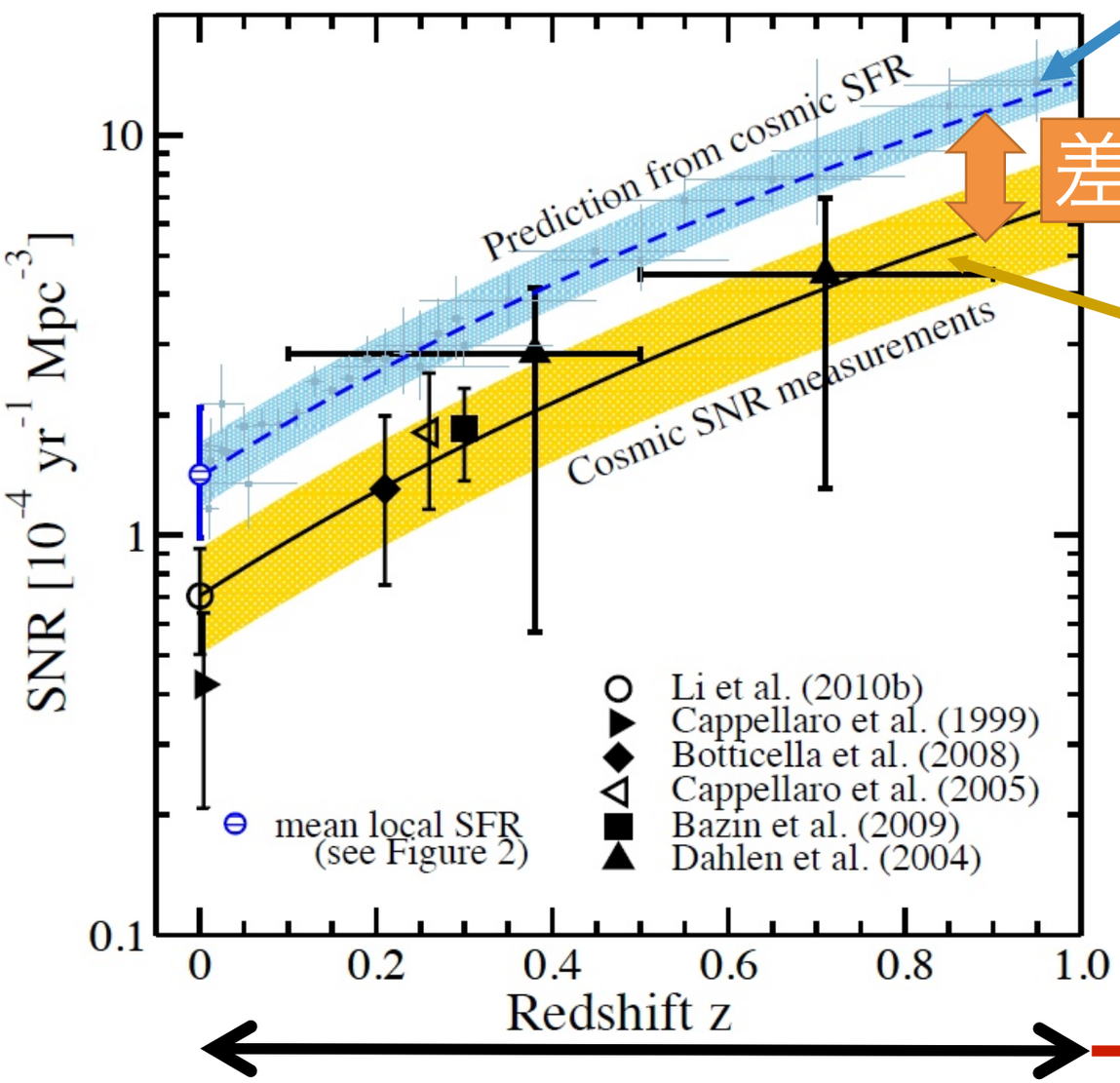
・方向感度を持つ検出器（B02)

を武器に世界の暗黒物質研究をリード

C01: 超新星背景ニュートリノ観測による星形成の歴史の研究

星形成率からの超新星爆発の頻度

星形成理論からの予測



差が存在?

光学観測の測定結果

➡ 超新星背景ν (SNR)の理論予想精度向上

➡星間物質の影響のないニュートリノ観測を期待

現在〜75億年前

特別推進(E>~15MeV)

本研究でE>~10MeVを実現。
75〜100億年前(1<Z<2)に有感!
暗黒物質による大規模構造形成とつながる　(相乗的)

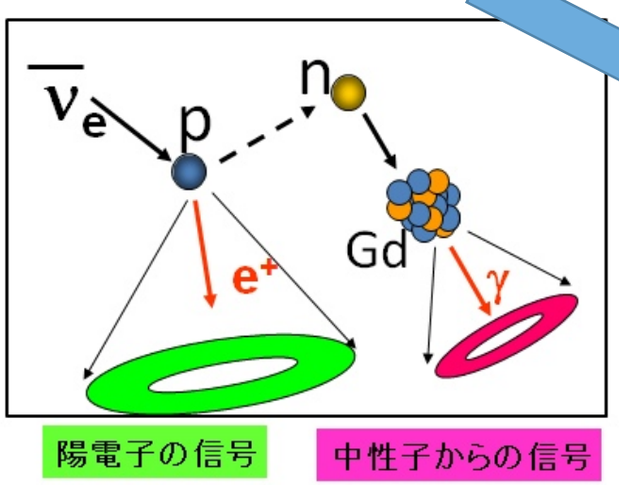
C01: 超新星背景ニュートリノ観測による星形成の歴史の研究

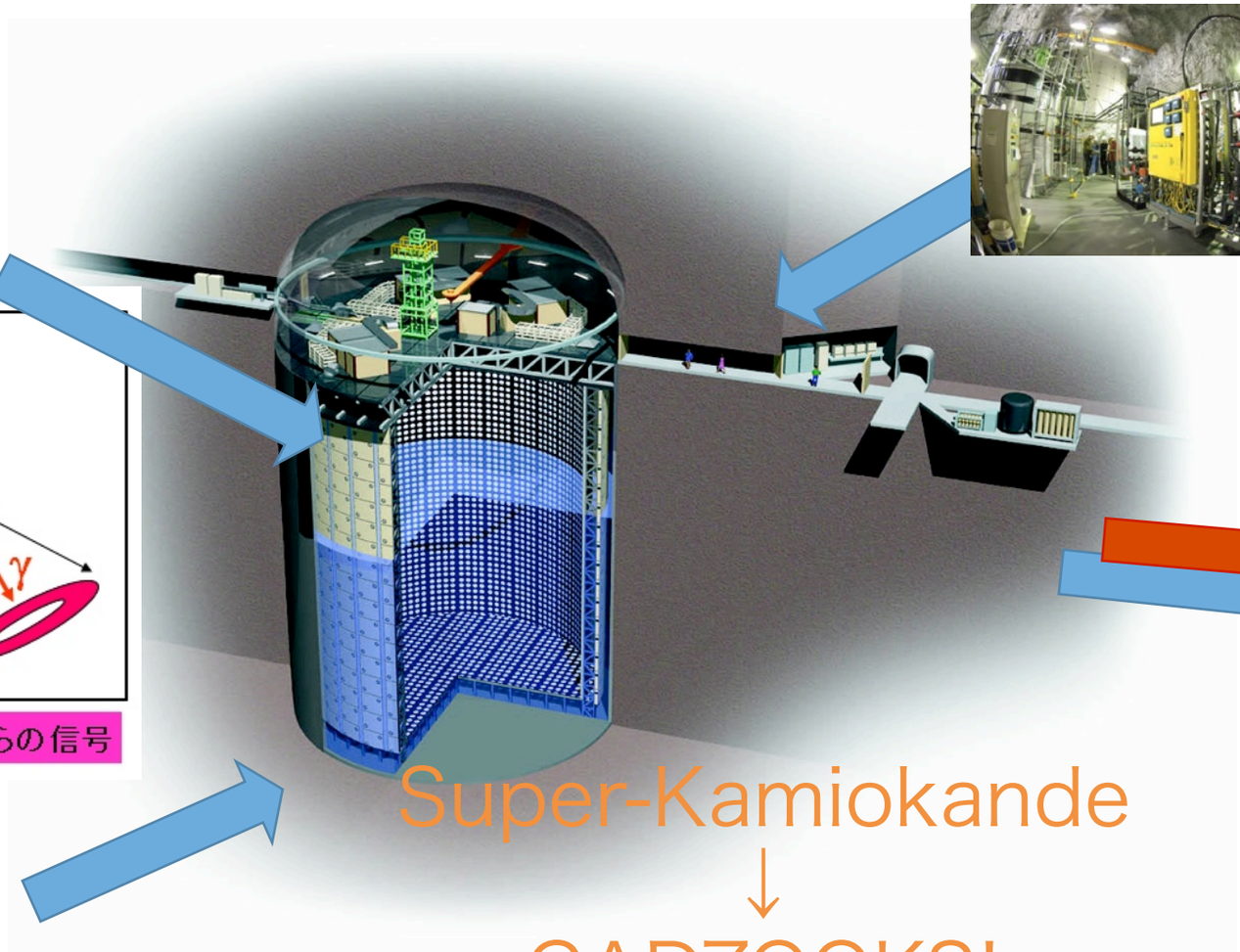
市販ガドリニウム(Gd)中の放射性不純物を
1/100〜1/1000 (0.3mBq/kg(Gd)以下)に低減

放射性不純物
除去装置追加

透過率向上のための Gd対応純水装置追加(特別推進)

市販Gd添加
(特別推進)





Super-Kamiokande
↓
GADZOOKS!

水漏れ補修
(特別推進)

低エネルギー超新星背景ニュートリノの観測

理論との比較

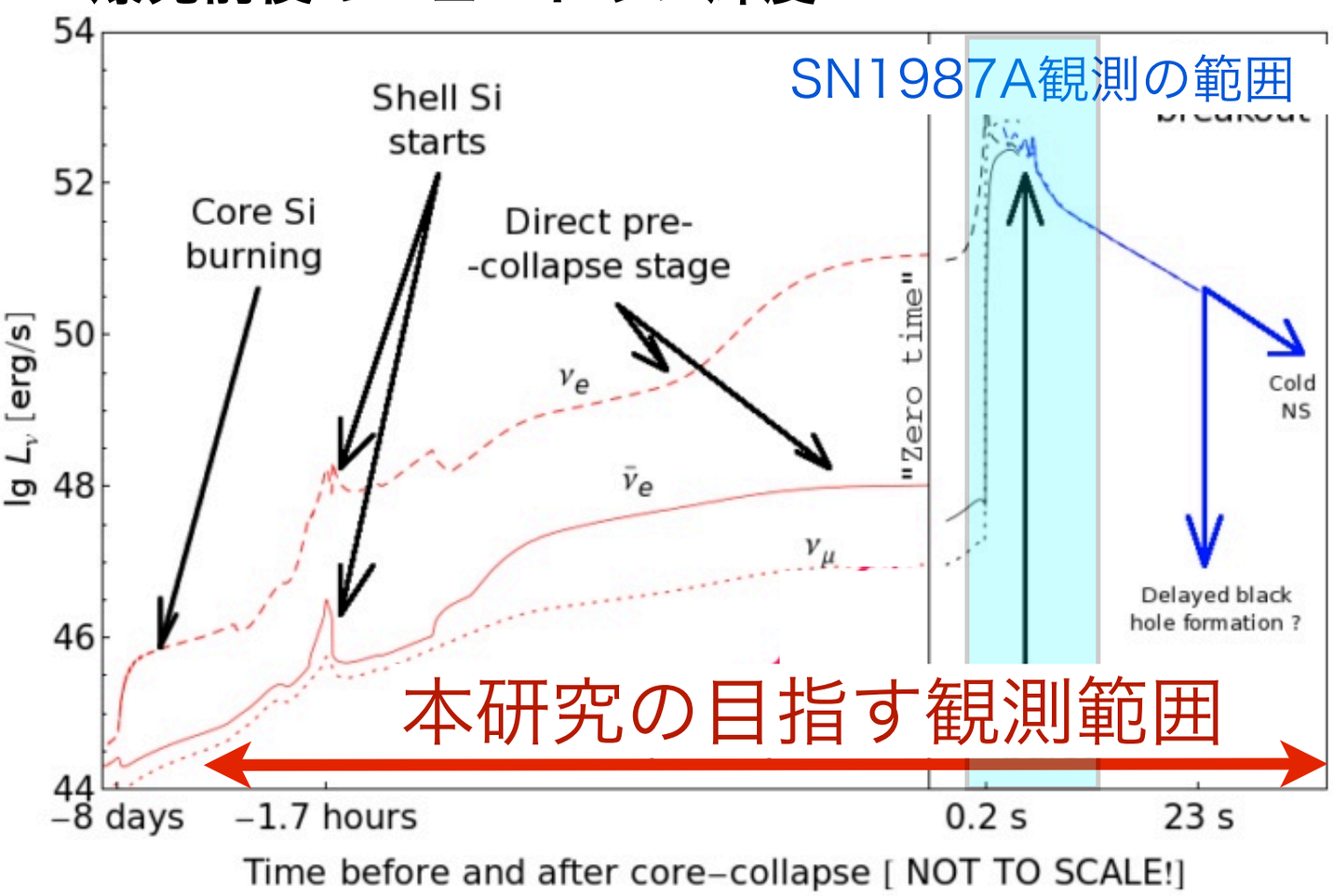
超新星前兆ν（中性子信号増加）・太陽νも観測対象に！

C02: 近傍天体ニュートリノ包括的観測体制の構築と天体活動の研究

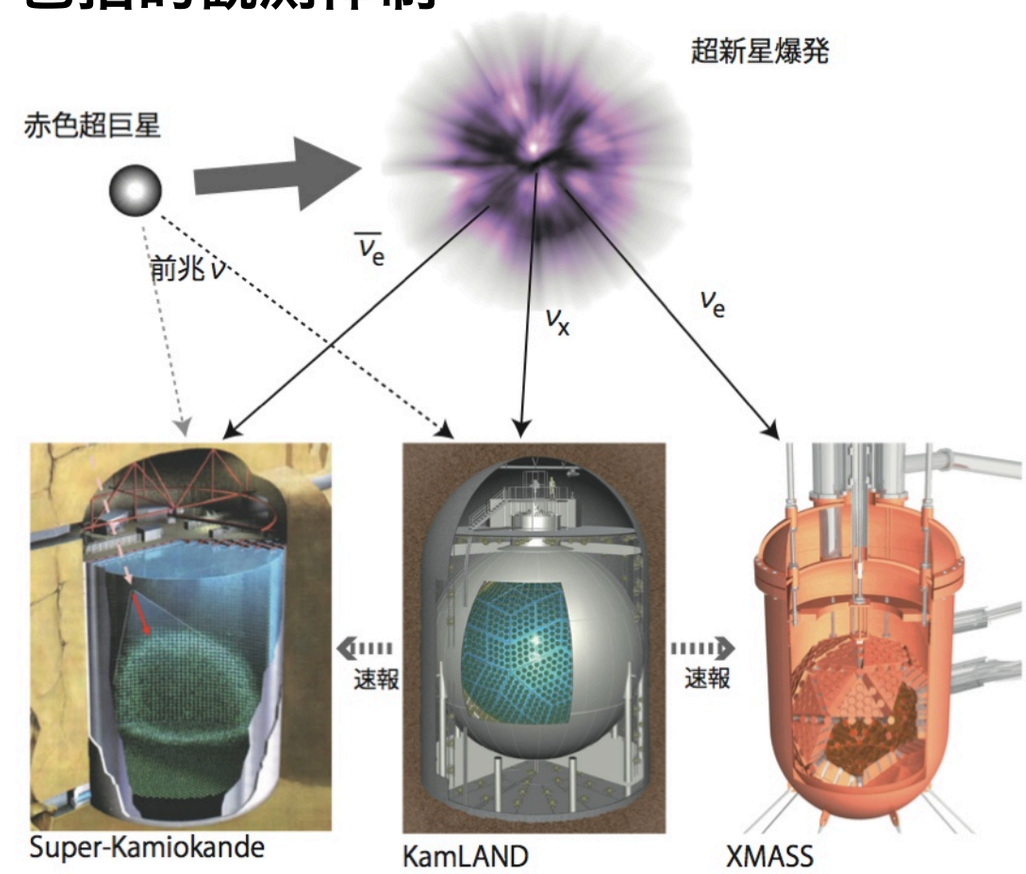
近傍ニュートリノ観測から超新星爆発に至る天体活動の解明

- ケイ素燃焼フェーズから観測
- 3検出器の協力で全種類のニュートリノ観測
- 最新の観測を考慮した恒星進化と超新星爆発の研究

爆発前後のニュートリノ輝度



包括的観測体制



若手中心 (平均年齢 37歳)の実験グループを超えた計画研究

C02: 近傍天体ニュートリノ包括的観測体制の構築と天体活動の研究

近傍ニュートリノ観測から超新星爆発に至る天体活動の解明

ターゲットの星 (例)

世間はベテルギウスに注目

- 爆発が迫っている
- 2012年にベテルギウスという国際会議が開催された

ベテルギウスなど近傍天体の爆発前アラームを世界に配信する

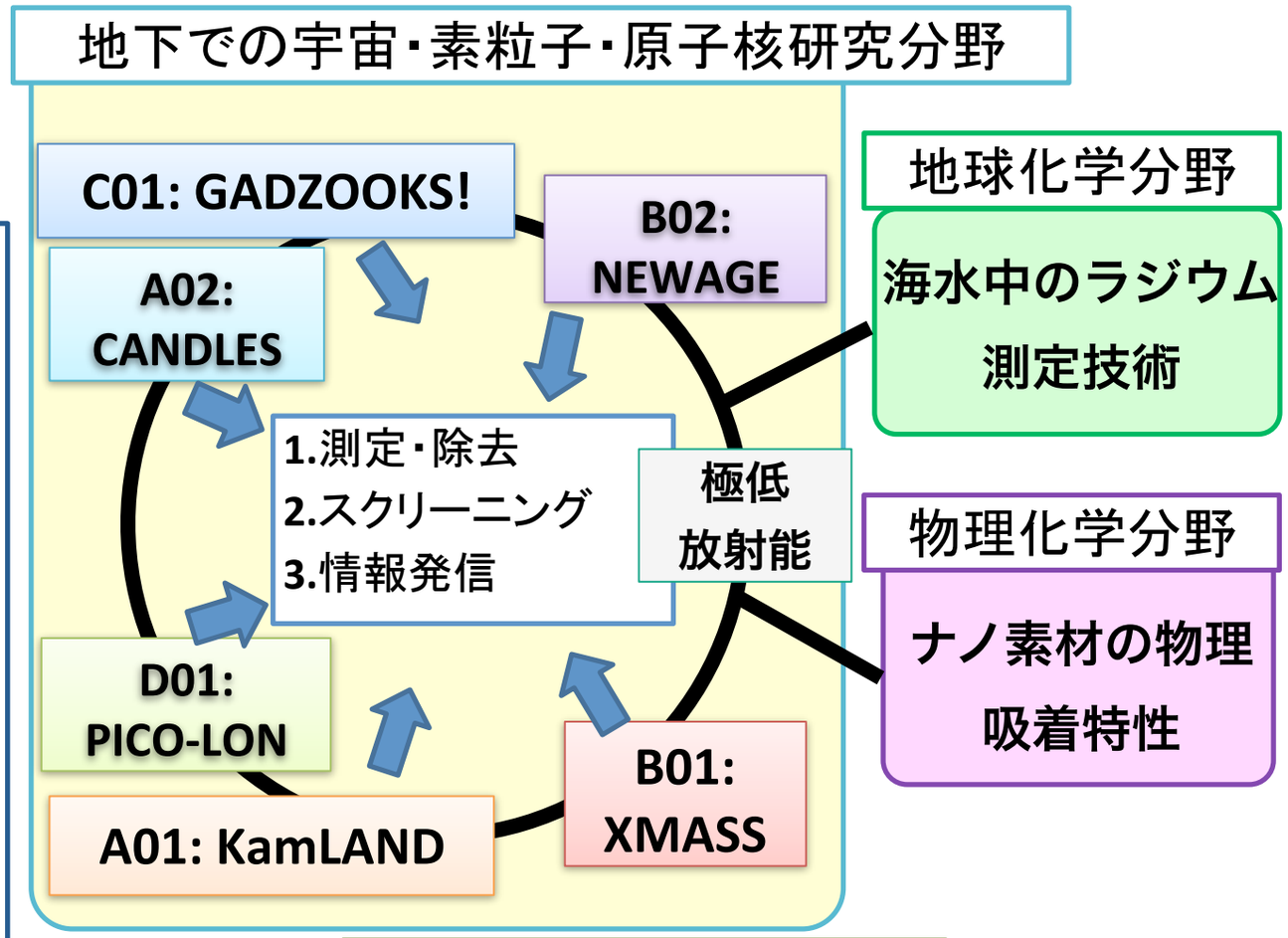
D01: 極低放射能技術による宇宙素粒子研究の高感度化

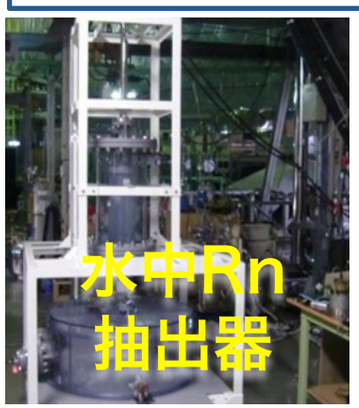
各グループで蓄積したノウハウ+他分野の専門知識を結集

1.測定・除去
- 検出器本体及び環境中の放射性不純物の測定と除去
- 特に、ウラン系列、トリウム系列、^{222}Rn、^{40}K、^{60}Co、、、

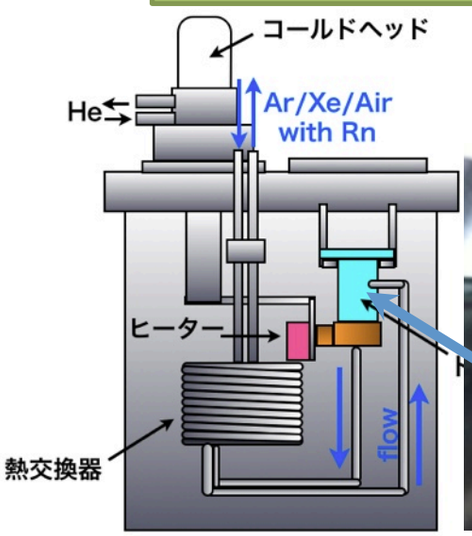
2.スクリーニング
- 放射性不純物検査装置の構築

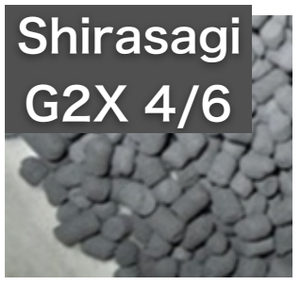
3.情報発信
- 放射性不純物測定情報の共有





コールドトラップ装置

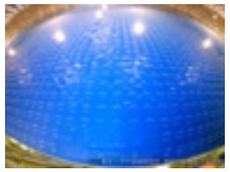




D01: 極低放射能技術による宇宙素粒子研究の高感度化

D01: 各プロジェクトでの低放射能関連研究者で構成
⇒共通の低放射能技術開発を加速する

純水

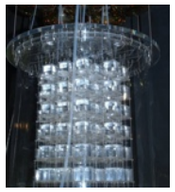


- ■C01: 検出器本体
- ■A01, A02, B01, : 環境放射能の遮蔽
- ■A01: 液シンの純化
- ■連携：C01で、技術蓄積豊富 (Super-Kは大容量純水で世界最高純度)

ラドン

- ■全てで低減が必須
- ■連携: D01(ラドン検出器)で技術蓄積豊富 (LSM(France), LBNE(US)にも情報提供した)

部材中の放射能



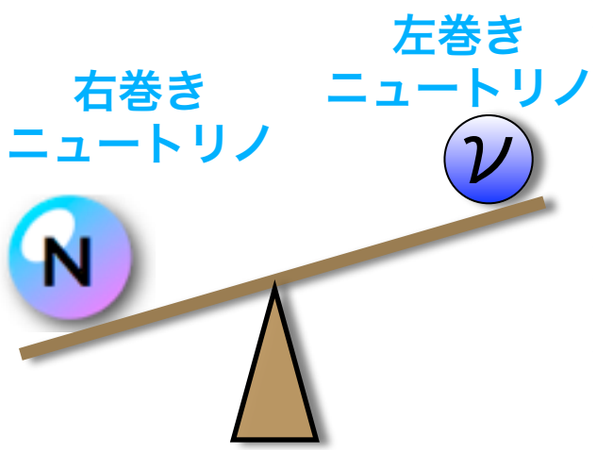
- ■全てで低減が必須
- ■A02, B02, C01で特に重要
- ■連携: D01(PICO-LON)で技術蓄積豊富 (世界最高純度のNaI開発目処あり)

表面放射能

- ■A01, B01で特に重要
- ■連携: B02の検出器を表面α線の精密測定に応用可

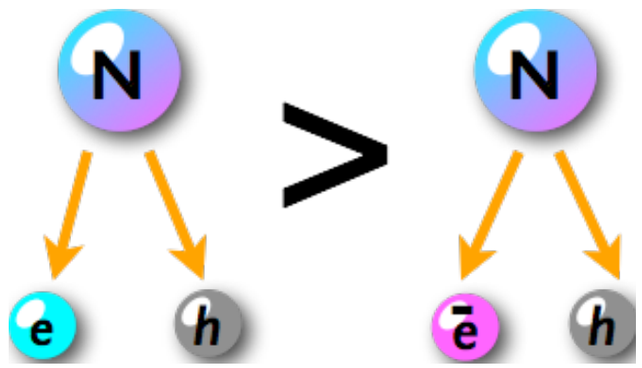
E01: 物質粒子の起源と宇宙進化の解明

Seesaw機構とニュートリノ質量



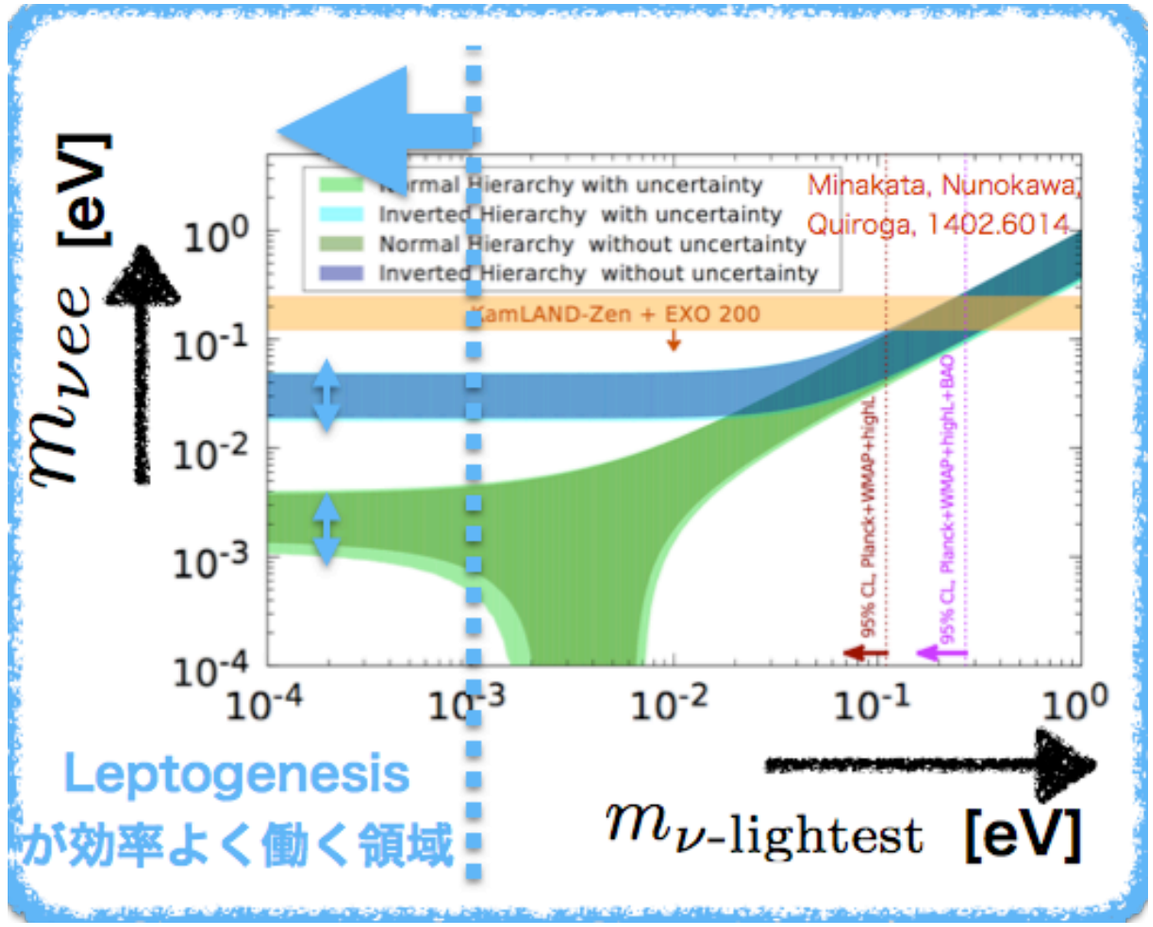
(ニュートリノ質量) ～ m^2/M

Leptogenesisによる物質生成

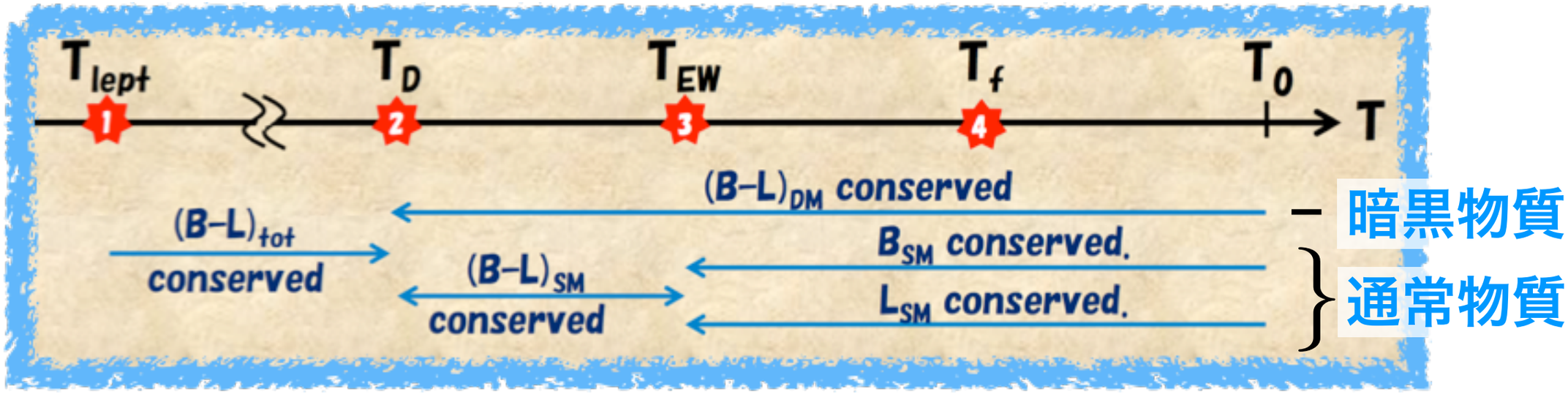


右巻きニュートリノの崩壊がレプトン数を生成しバリオン数に転換する。

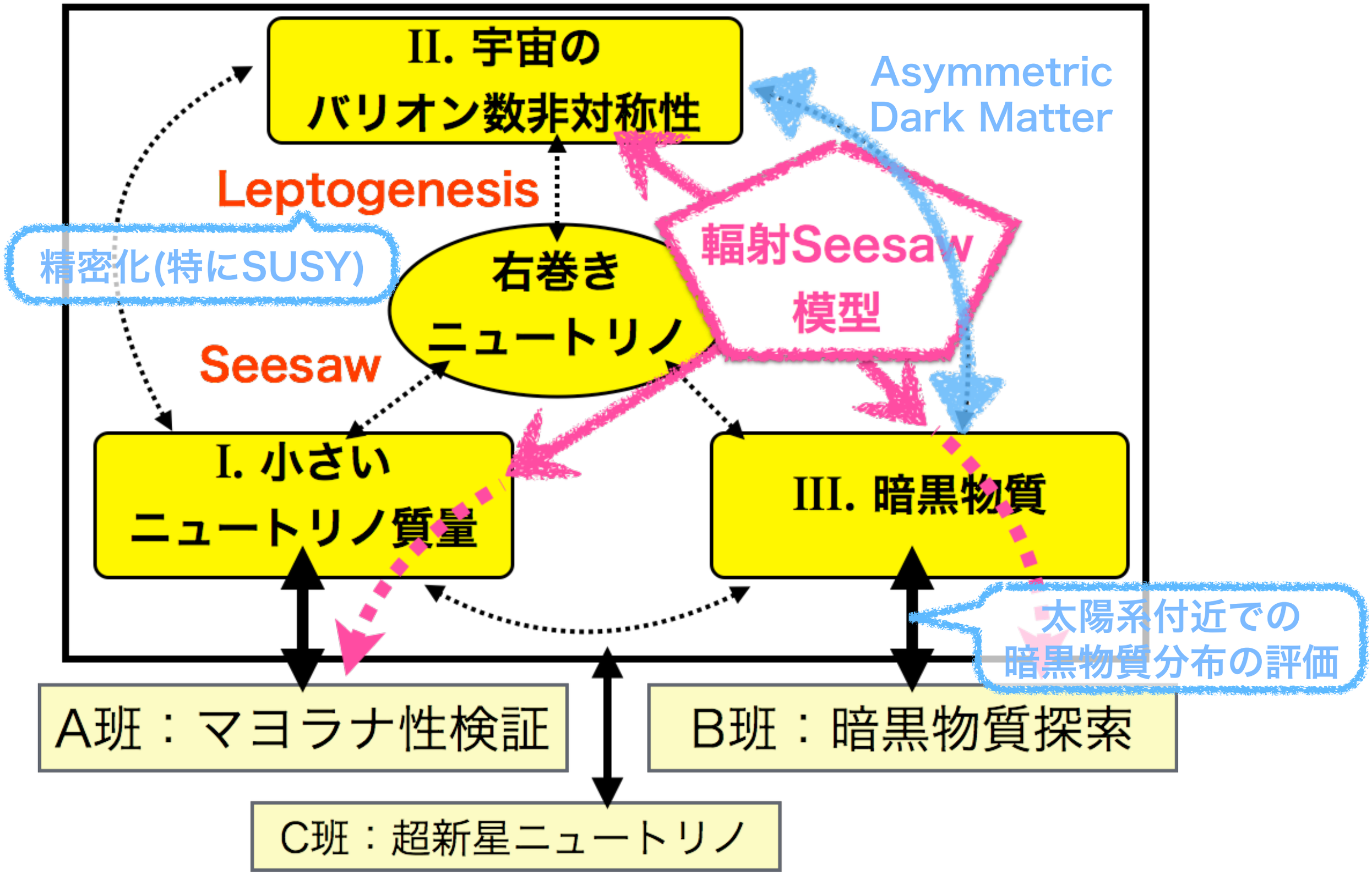
Leptogenesisとマヨラナ質量



Asymmetric Dark Matter (Leptogenesisでの暗黒物質)



E01: 物質粒子の起源と宇宙進化の解明



年次計画

	2014	2015	2016	2017	2018	以降
A01	縮退構造検証	ニュートリノ源設置機構	Xe増量 クリーンミニバルーン	縮退構造検証 第4世代ニュートリノ探索	Xe増量	逆階層構造検証
A02	設計 蛍光熱量測定器開発	高速液体クロマト構築/同位体濃縮/結晶成長			性能評価	濃縮結晶観測
B01	低質量暗黒物質検証(季節変動) 詳細シミュレーション環境構築	（簡易型）表面ＢＧ測定装置構築	低BG光センサー開発	大質量暗黒物質相補検証	モックアップ製作	大型化
B02	装置BG測定 乳剤BG測定	低BG装置試作/動作試験 低BG乳剤試作	実機製作/動作試験 スピン無感暗黒物質探索		方向有感暗黒物質探索（CF_4, 写真乾板）	
C01	Gd化合物中ラジウム測定 超新星背景ニュートリノ詳細計算	Gd化合物純化樹脂選定/大型装置設計/SKに導入			低閾値超新星背景ニュートリノ観測	
C02	KL,SK,XMASS観測ネットワーク構築 超新星前兆ニュートリノ詳細計算	KL,XMASS極近傍超新星対応新型電子回路/トリガー回路開発・導入		極近傍超新星前兆ニュートリノ/超新星ニュートリノネットワーク観測		
D01	超高純度結晶成長技術、表面不純物測定技術、樹脂による不純物除去技術、スクリーニング環境の構築、静電場によるラドン娘核遮断技術の開発および適用	低放射能素材データベースの構築と情報発信				
E01	熱的レプトジェネシスと無矛盾な超対称性標準模型の構築、インフレーションへの応用、Asymmetric Dark Matter の検証、軽い暗黒物質および暗黒輻射の調査、太陽系付近での暗黒物質分布の評価、輻射シーソー機構による統一的な素粒子模型・宇宙論シナリオの構築 A,B,C班の成果を理論に反映、理論予測による助言、成果の関連づけ					

宇宙初期
物質粒子生成・軽いニュートリノの謎の究明

宇宙中期
暗黒物質の謎の究明

宇宙後期・現在
星形成の歴史、天体活動の究明

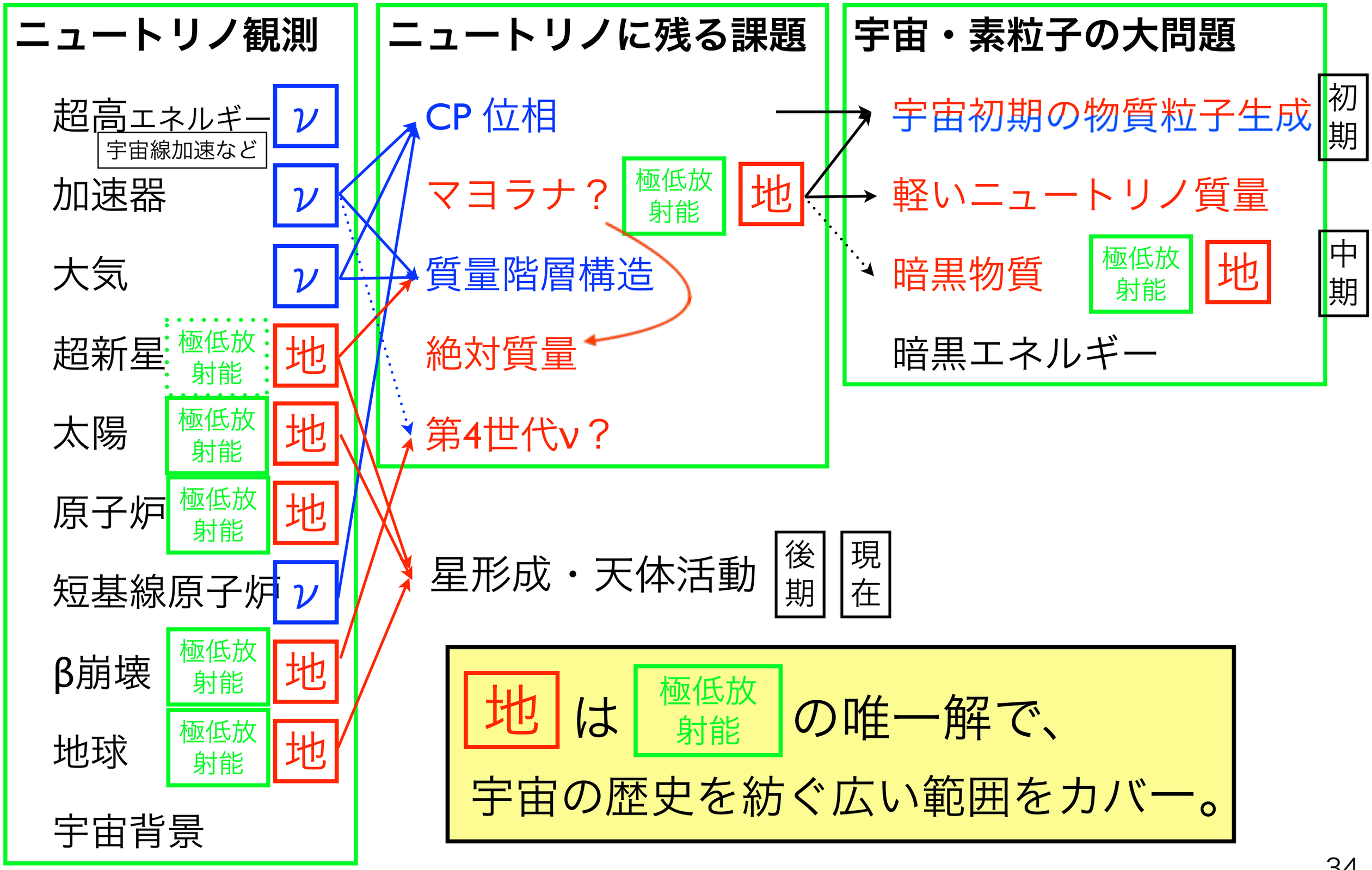
A~Cの技術基盤

A~Cの成果から宇宙史の系統的理解

他領域との関係

本領域 地

ニュートリノフロンティアの融合と進化 ν



地 は 極低放射能 の唯一解で、
宇宙の歴史を紡ぐ広い範囲をカバー。

実験名の意味

Kamiokande	**Kamioka** **n**ucleon **d**ecay **e**xperiment **n**eutrino **d**etection **e**xperiment
KamLAND	**Kam**ioka **L**iquid-scintillator **A**nti-**N**eutrino **D**etector
-Zen	**Ze**ro **n**eutrino double beta decay search
CANDLES	**CA**lcium fluoride for the study of **N**eutrino and **D**ark matters by **L**ow **E**nergy **S**pectrometer
XMASS	**X**enon detector for weakly interacting **MASS**ive particles
NEWAGE	**NE**w generation **W**IMP search with an **A**dvanced **G**aseous tracking device **E**xperiment
GADZOOKS!	**G**adolinium **A**ntineutrino **D**etector **Z**ealously **O**utperforming **O**ld **K**amiokande, **S**uper**!**
PICO-LON	**P**lanar **I**norganic **C**rystal **O**bservatory for **LO**w-background **N**eut(ra)linos