

ポスト「京」で進む宇宙の理解 ～重点課題9の挑戦

橋本省二（高エネルギー加速器研究機構）
素粒子・原子核・宇宙「京からポスト京に向けて」シンポジウム」
2019年1月9日

ポスト「京」共用開始まであと2年



重点課題は「成果創出フェーズ」へ。

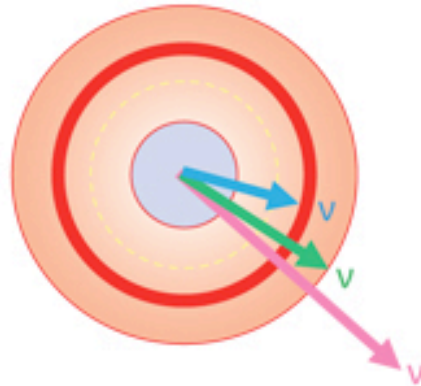
「社会的・科学的課題」に対する成果が求められる。

特に、重点課題9には

（純粋科学として）わかりやすい成果
を求められている。

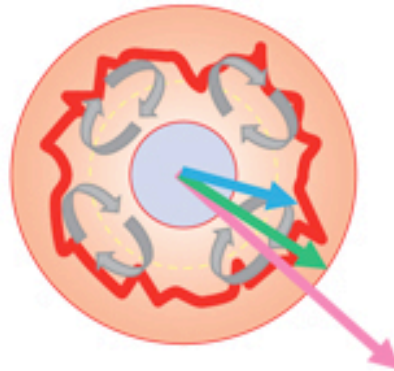
例えば...

2000年代



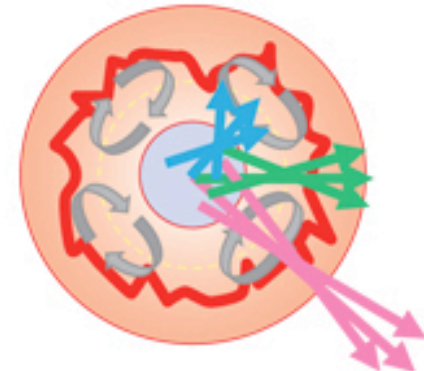
- 空間1次元での計算
- ν はエネルギーごとに角度平均量を解く
- 爆発しない

2014年(「京」)



- 3次元モデルで対流を採り入れる
- ν はエネルギーごとに角度平均量を解く
- 爆発に成功

ポスト「京」



- 3次元モデルで対流を採り入れる
- ニュートリノはエネルギーごと、角度ごとに計算
- よりリアルな爆発

超新星爆発のシミュレーション（提供：国立天文台滝脇知也助教）

2000年代になってから詳細に計算できるようになったが、「京」で3次元モデルの計算を行うことで、初めて爆発の再現に成功した。1次元での計算と「京」での計算では、ニュートリノ(ν)が平均した方向に進むとしている(図の3本の矢印。エネルギーはピンク、緑、青の順に高くなり、エネルギーの低いニュートリノほど抜け出しやすいことを表している)。少し右に進むニュートリノと少し左に進むニュートリノは、本来すれ違うはずだが、これまでは右と左を平均した方向にいくものと仮定して、計算していた。ポスト「京」では、あらゆる方向に進むニュートリノを採り入れることで、より現実に近い爆発の再現をめざす。

目的

素粒子から宇宙までのスケールにわたる現象の精密計算を実現し、大型実験・観測と組み合わせ、多くの謎が残されている素粒子・原子核・宇宙物理学全体にわたる物質創成史を解明

中間目標

ポスト京での研究を視野に入れた中間的目標を達成し、**ポスト京で実行するアプリの計算手法を確立**。

最終目標

アプリの本格的な**最適化**を実施し、ポスト京で実行する準備を完了。

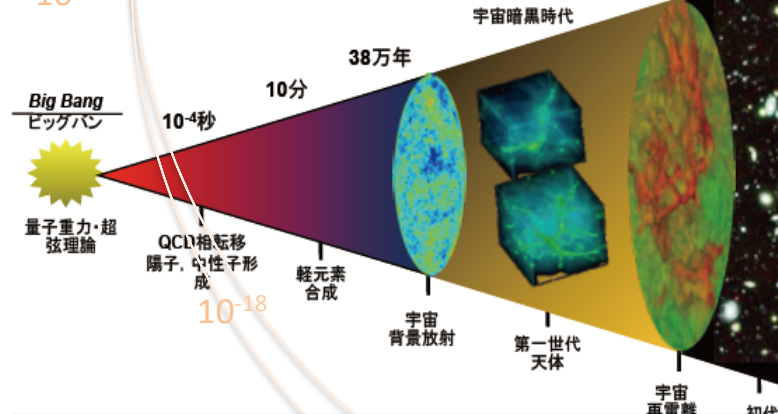
内容

ポスト「京」で実行するため、計算規模や時間の検討、コード開発やチューニングなどを実施
ポスト京時代の研究に備えて、各研究分野における最先端の研究を継続的に実施

サブ課題A「究極の物理法則と宇宙開闢の解明」

素粒子の精密実験と相補的な役割を果たす精密計算を実現して素粒子標準模型を検証。

10^{-24}



SuperKEKB や
J-PARCなど

137億年

10億年

サブ課題C 「大規模数値計算と広域宇宙観測データの融合による宇宙進化の解明」

宇宙の階層的構造形成と銀河形成、ブラックホール進化を融合した大規模計算を行い、広域サーベイ観測データの統計解析によって宇宙の進化史を解明。

10^{30} cm

すばる、ALMA、TMTなど

サブ課題B「物質創成史の解明と物質変換」

バリオン間相互作用、原子核の構造と反応、超新星爆発・中性子星連星合体という素粒子現象から天体現象までをシミュレーション研究でつなぎ、物質創成・変換過程を理解、未解決の基礎科学現象の解明。

10^{-12}

J-PARC、RIBF、KAGRA、TMT など

具体的目標は見えてきたか？

目的

素粒子から宇宙までのスケールにわたる現象の精密計算を実現し、大型実験・観測と組み合わせて、多くの謎が残されている素粒子・原子核・宇宙物理学全体にわたる物質創成史を解明



(私案ですが...)

(実験・観測も含めた)分野全体として2つのチャレンジ

1. ダークマターは何者か？
2. 元素はどこでどうやってできたのか？

この大きなパズルのピースとして各研究は重要な役割。

2つのチャレンジ

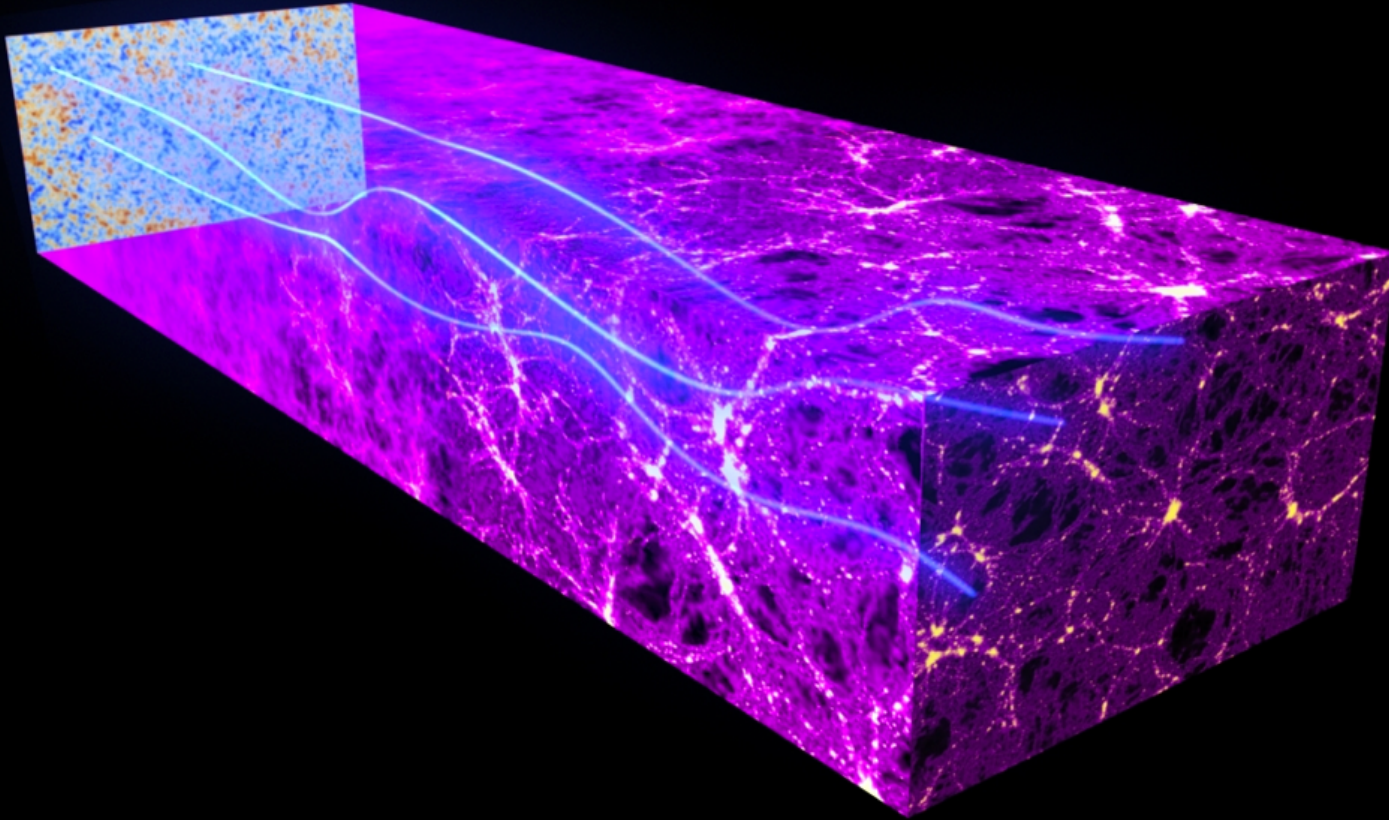
ダークマターは何者か？

- 何をしているのか？
 - 観測によってさまざまな知見。
 - シミュレーションを組み合わせてさらなる詳細を。
- 正体は？
 - 実験的手がかりは全然ない。あらゆる手段で探索が進む。
 - シミュレーションで発見はできない。実験と連携して発見を後押し。

元素はどこでどうやってできたのか？

- どこでできたのか？
 - 超新星爆発 → 超新星・ブラックホール合体へ。
 - シミュレーションでその詳細を。
- どうやってできたのか？
 - r過程の詳細に、シミュレーションと実験の両面からせまる。
 - 第一原理計算から出発。

ダークマターは何者か？ ～ 何をしているのか？



ダークマターは何者か？～ 何をしているのか？

宇宙

ダークマターはほぼ一様に分布



ゆらぎの大きさは1/100,000



重力

密度の差がはっきりしてくる



スパコンの中

粒子がばらばらに分布



N体
シミュレーション

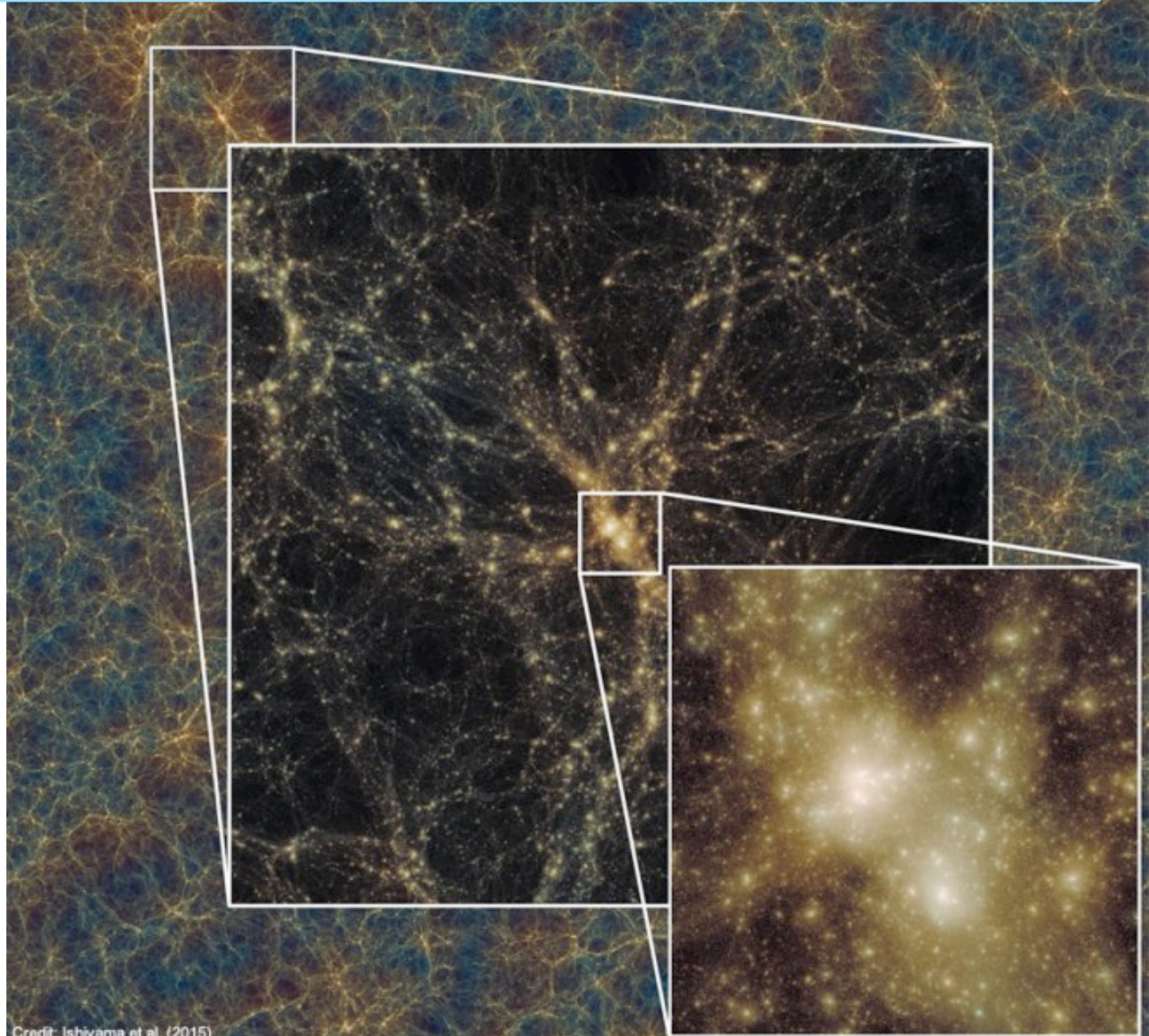
粒子のかたまりができる



宇宙論的N体シミュレーション（提供：東京大学吉田直紀教授）

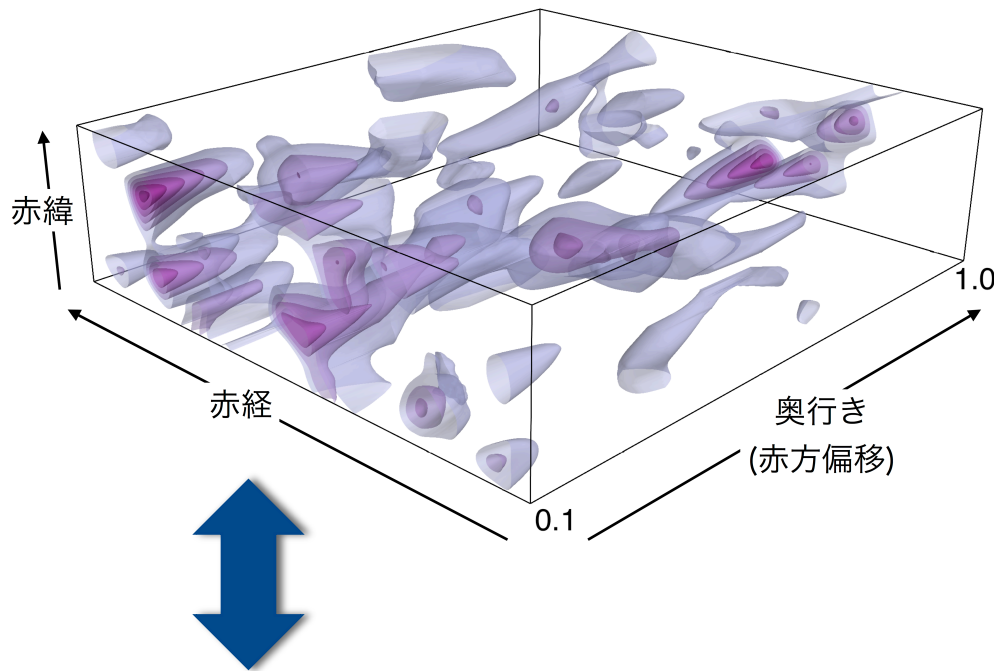
ダークマターの分布を粒子の集まり具合で表し、この粒子について重力N体シミュレーションを行う。

現在の宇宙でのダークマター分布（クレジット：Ishiyama et al. 2015）

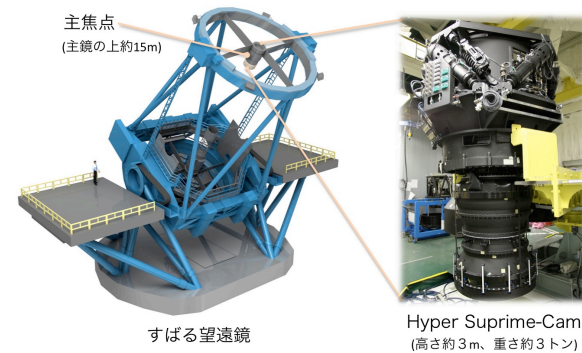


弱重力レンズ効果を利用して推定したダークマターの3次元分布図。

(クレジット：東京大学/国立天文台)



すばる HSC



サブ課題C：宇宙の構造形成シミュレーションにより大局的および局所的なダークマター分布を明らかにした。

86億個の質量粒子を用いた大規模Nシミュレーションを100ラン以上行った。この出力をデータベース化し、主成分解析やガウス過程を実装した「エミュレータ」を開発し、物質分布の2点相関関数など主要統計量の高速計算を可能にした。次に、5500億個の質量粒子を用いた宇宙の構造形成シミュレーションを「京」上で行った。銀河形成の基本要素であるダークマターハローの形成進化のカタログを生成し、天文学の研究者らが使えるように整備した。

ダークマターは何者か？～ 正体は？

いまのところ、実験的な手がかりはなし。

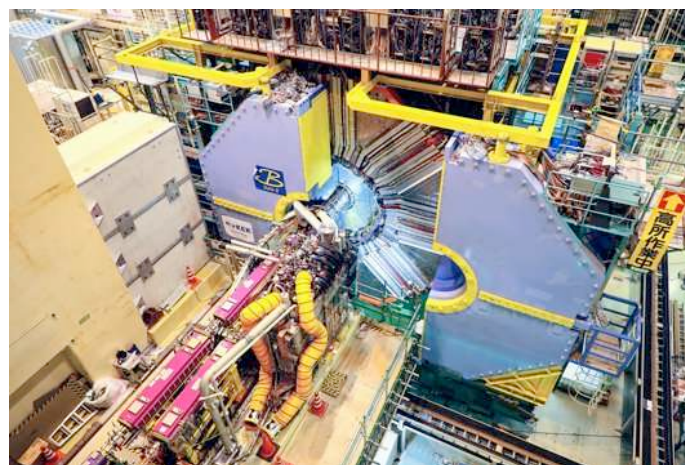
新物理（＝新粒子 and/or 相互作用）の探索

それもいっぱいあるので、どこに焦点を当てるのが正しいか答はない。

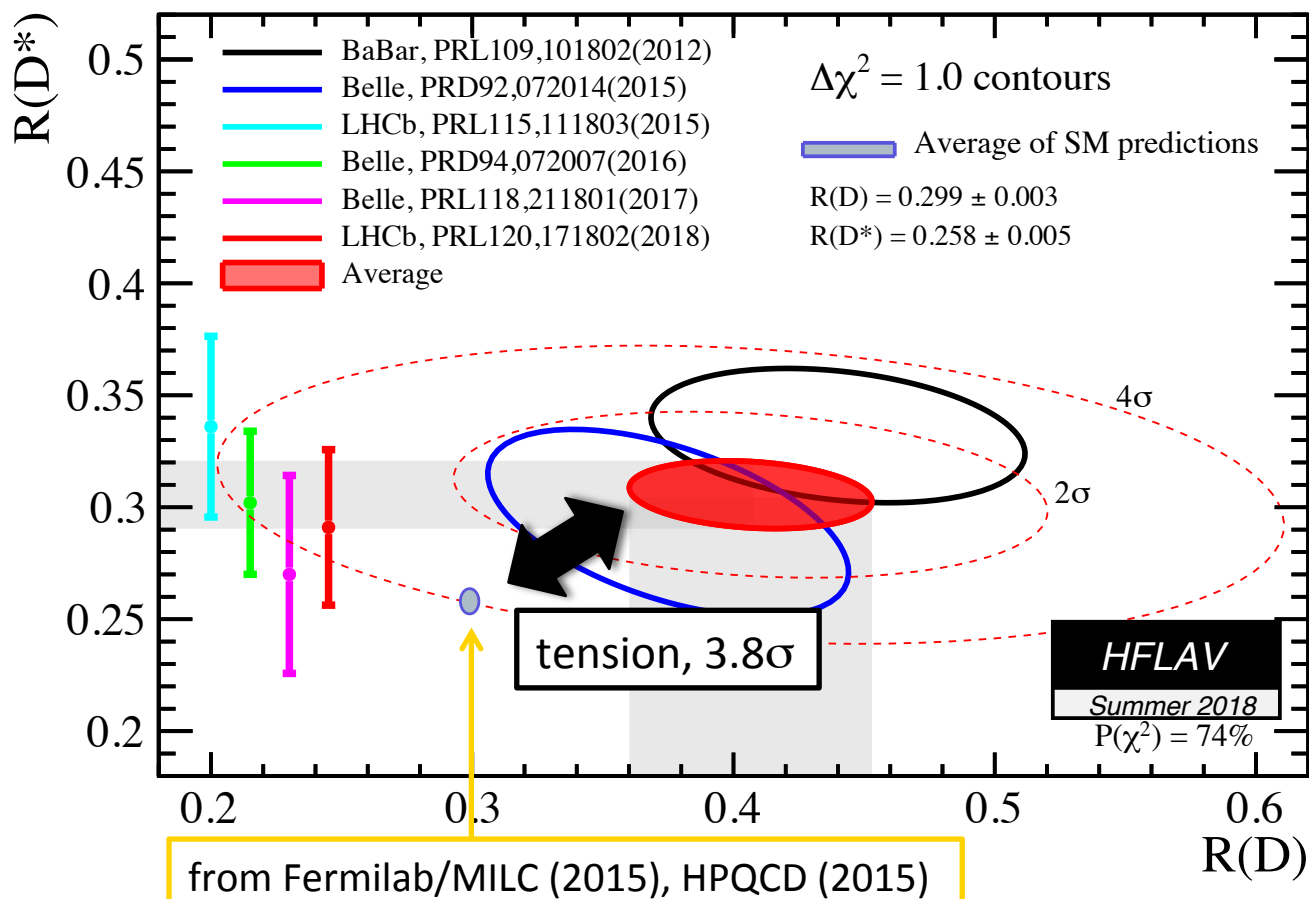
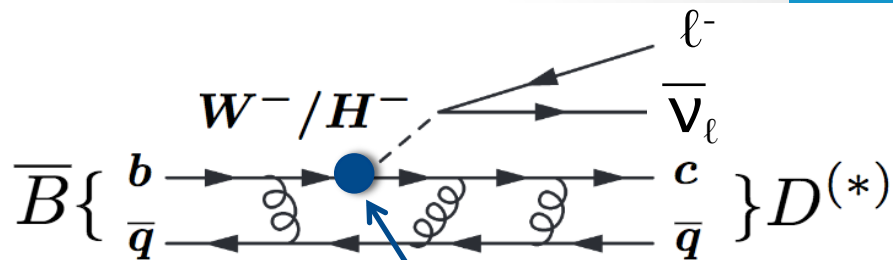
実験との連携

シミュレーションだけで新物理の「発見」はできない。

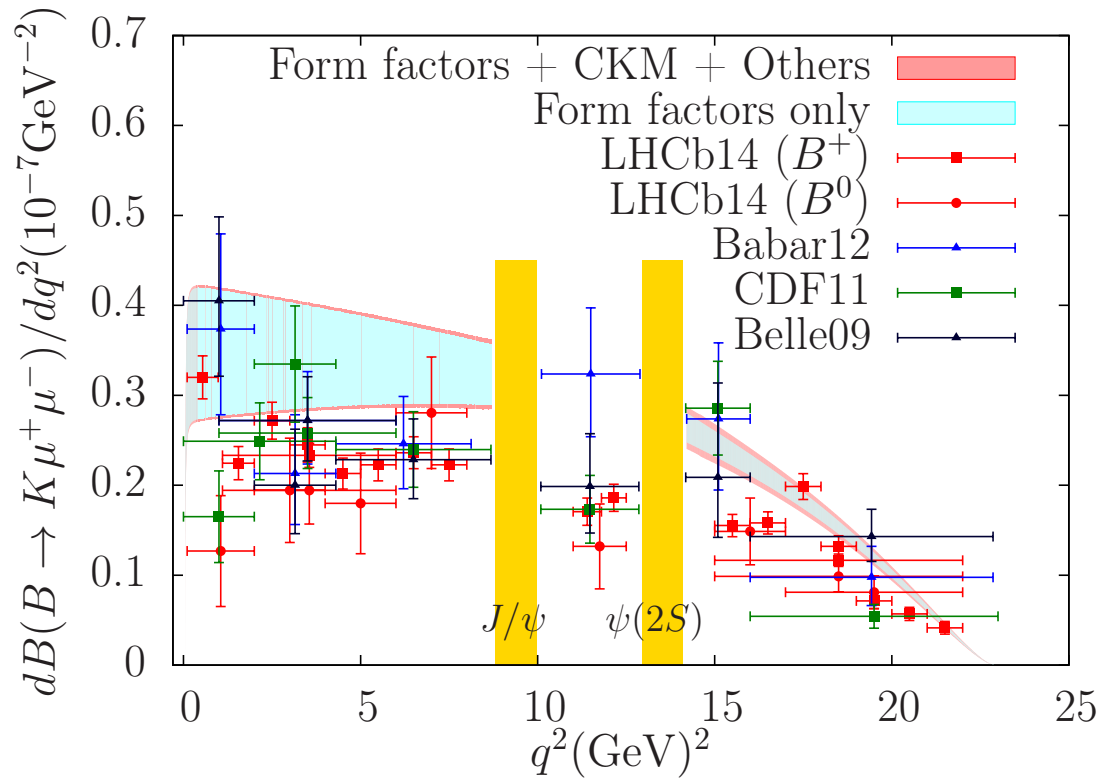
SuperKEKB / Belle II
2019年3月から
本格物理ラン



$$R(D^{(*)}) = \frac{\Gamma(\bar{B} \rightarrow D^{(*)} \tau \bar{\nu})}{\Gamma(\bar{B} \rightarrow D^{(*)} \mu \bar{\nu})}$$

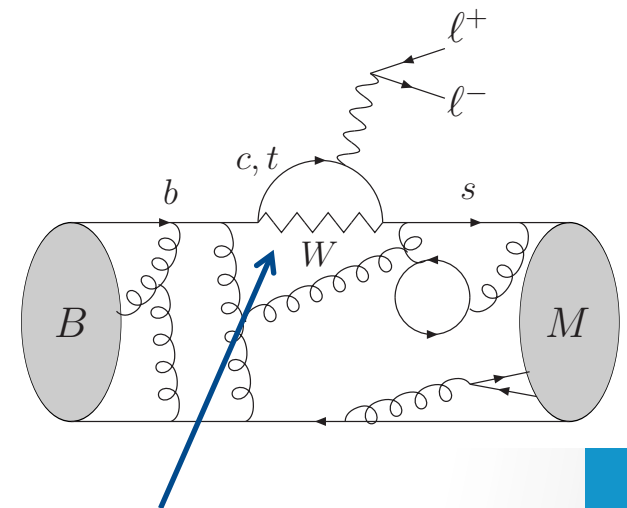


もしかして
他の相互作用も
あるかも。

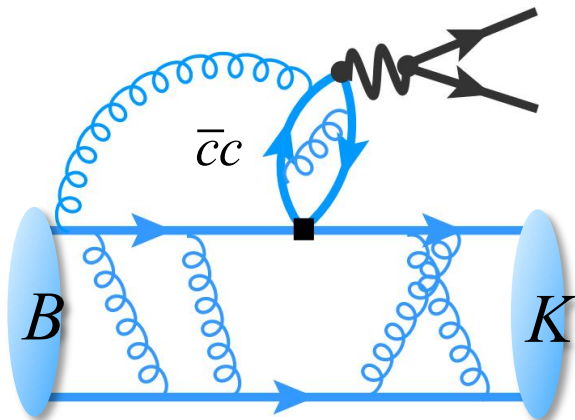


$$B \rightarrow Kl^+l^-$$

a plot from
Fermilab-MILC (Du et al.),
PRD93, 034005 (2016).



もしかして他の相互作用
もあるかも



でも、標準模型の部分は
ちゃんと理解できている
だろうか??

→ 金児

元素はどこでどうやってできたのか？

鉄より重い元素のこと。

数年前までは超新星爆発だと聞いてたけど、今は違うらしい…。

お話は…

1. 中性子星合体で大量の中性子が放出される。

: 宇宙物理学

2. 中性子がいっぱいくっついた原子核が壊れる
過程でさまざまな元素ができる（r過程）。

: 原子核物理学

どっちも複雑で難しい物理が満載！

核物質の状態方程式、磁場の影響、ニュートリノ輻射…

原子核構造、励起状態、核分裂…

一つずつ片付けていくしかない。実験・観測で確認しながら。

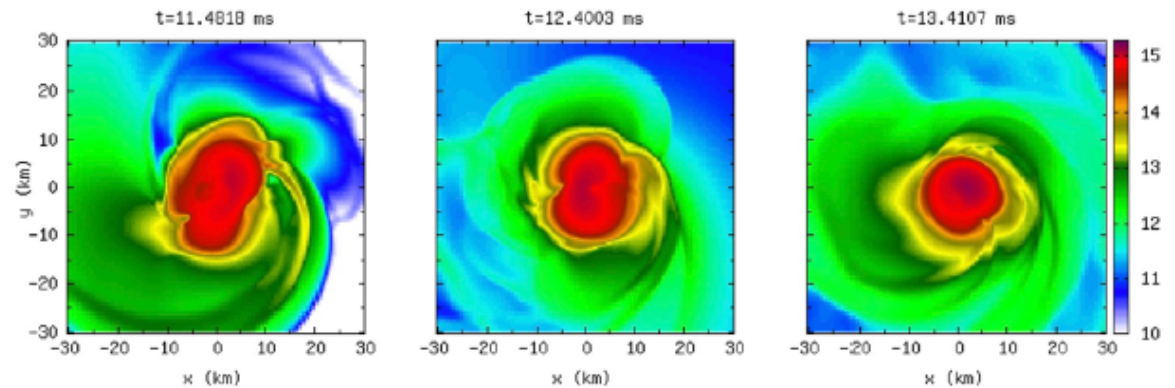


図1. 太陽質量の 1.2 倍と 1.5 倍の連星中性子星合体時の物質密度分布 (g/cm^3) の数値相対論シミュレーション [論文 5 より]。

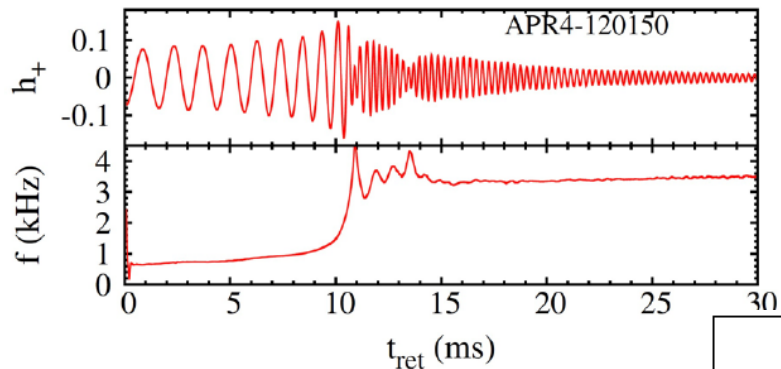


図2. 太陽質量の 1.2 倍と 1.5 倍の連星中性子星合体から放出される重力波と振動数の数値相対論シミュレーション [論文 5 より]。

柴田大 氏
第64回仁科記念賞
(受賞理由より拝借)

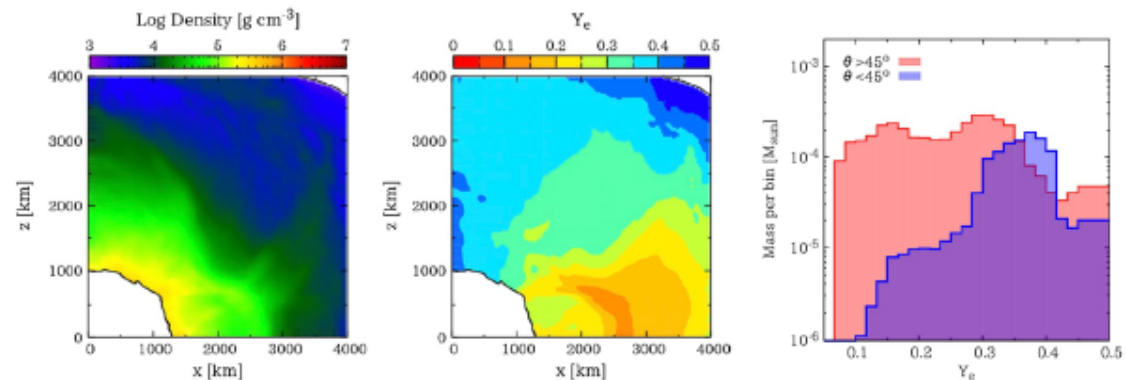
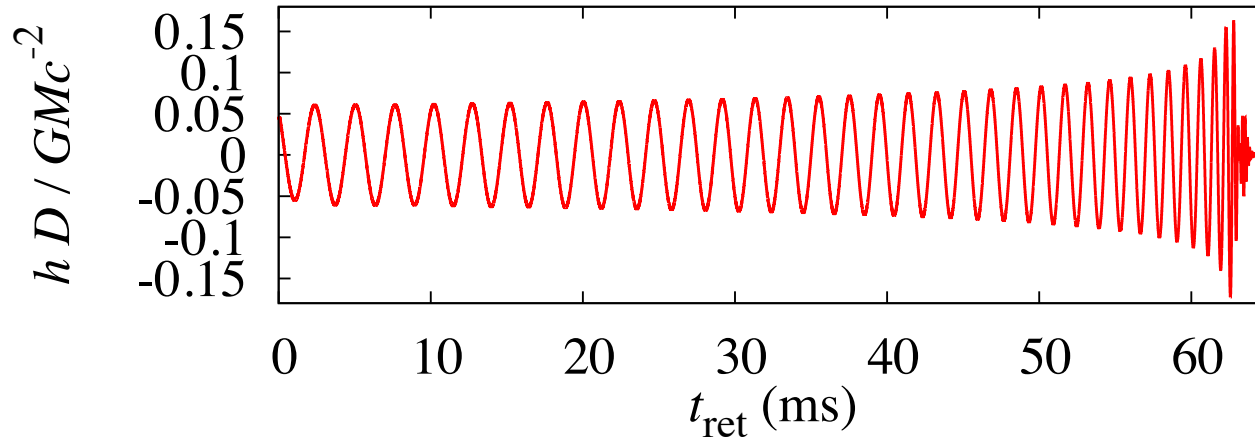


図3. 重力波イベント GW170817 に対応する太陽質量の 1.3 倍と 1.4 倍の連星中性子星合体シミュレーションに基づいた質量放出の密度分布 (左)、電子比 Y_e (中央)、放出質量と Y_e の関係 (右)。いずれも合体してから 40ms 後のスナップショット [論文 6 より]。



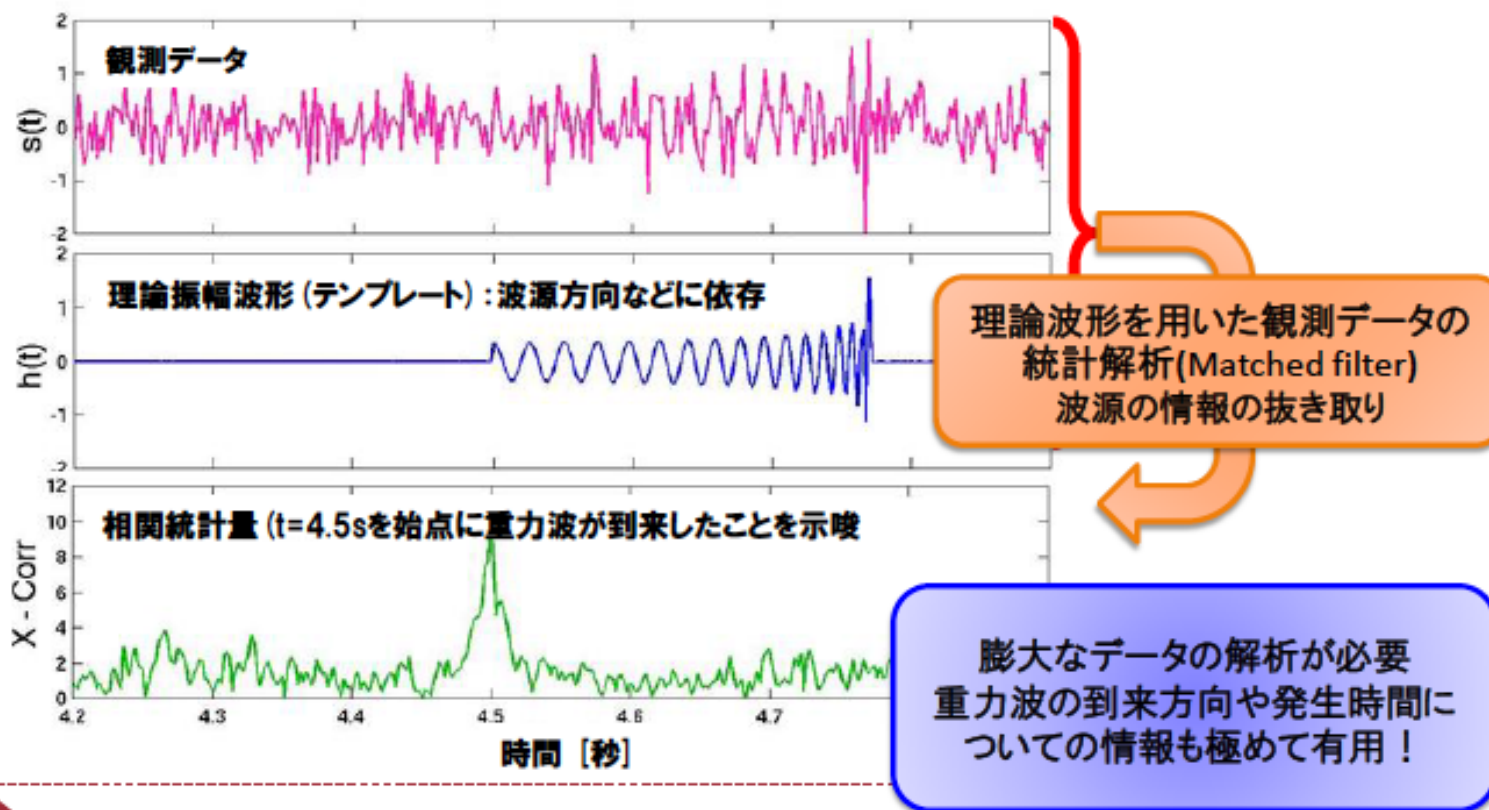
中性子星連星の合体時に放射されると予想される重力波の波形。 h が重力波の振幅、 D が波源までの距離、 G が重力定数、 c が光速を表す。

サブ課題B：中性子星連星の合体による重力波の高精度計算が実行可能になった。

中性子星連星の合体や重力崩壊型超新星爆発現象に対する高解像度シミュレーションを実行するための準備が進んだ。中性子星連星の合体に対しては、合計200radian を超える重力波位相に対して約0.1radianの精度で重力波の波形が導出できるようになったため、**精度の高い重力波テンプレートが構築できるようになった**。また超新星爆発に対する3次元シミュレーションが効率よく実行できるようになったため、これまで予想していなかった重力波のパターンが発見できた。本成果は、本格到来した重力波観測計画において必須の、正確な**理論テンプレート作成**を実行可能にした。

重力波の検出方法

- ▶ ノイズを含むデータからの抽出: 波形の理論予測 (波源の理解) が必要

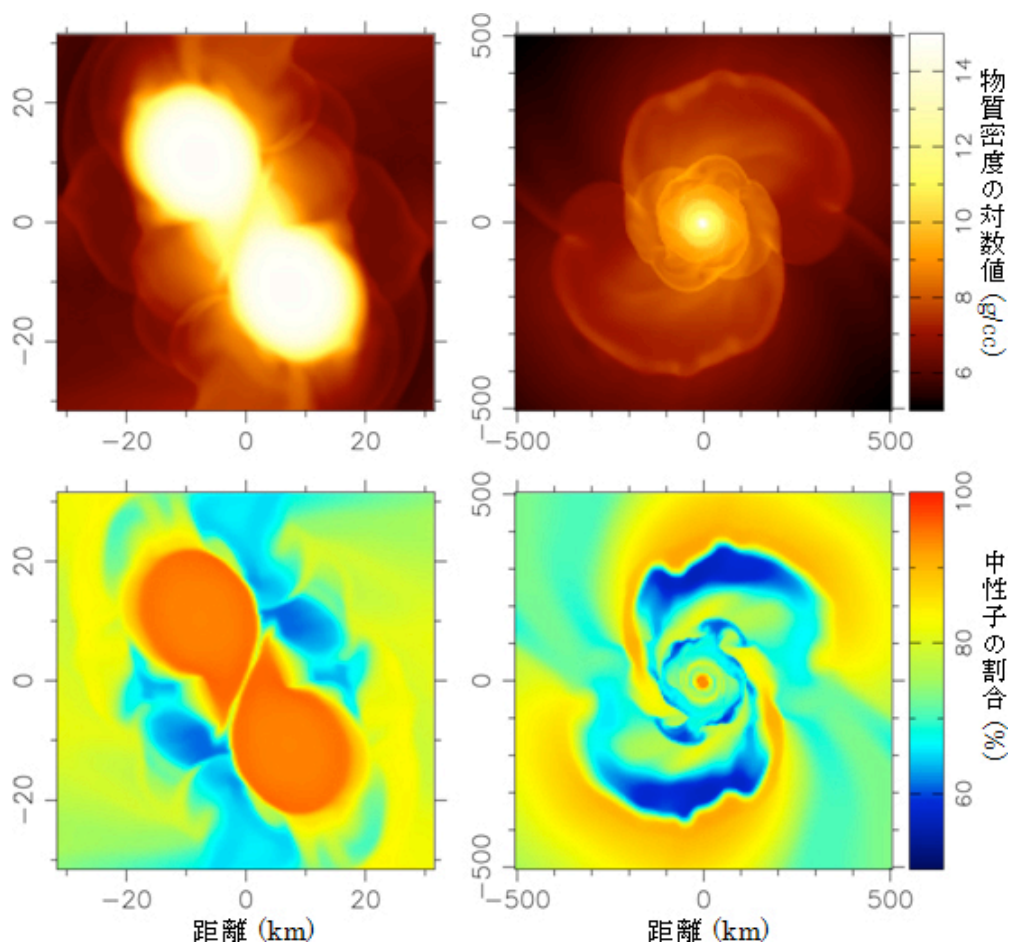


LIGO, VIRGO, KAGRA との直接的な連携

関口雄一郎 氏

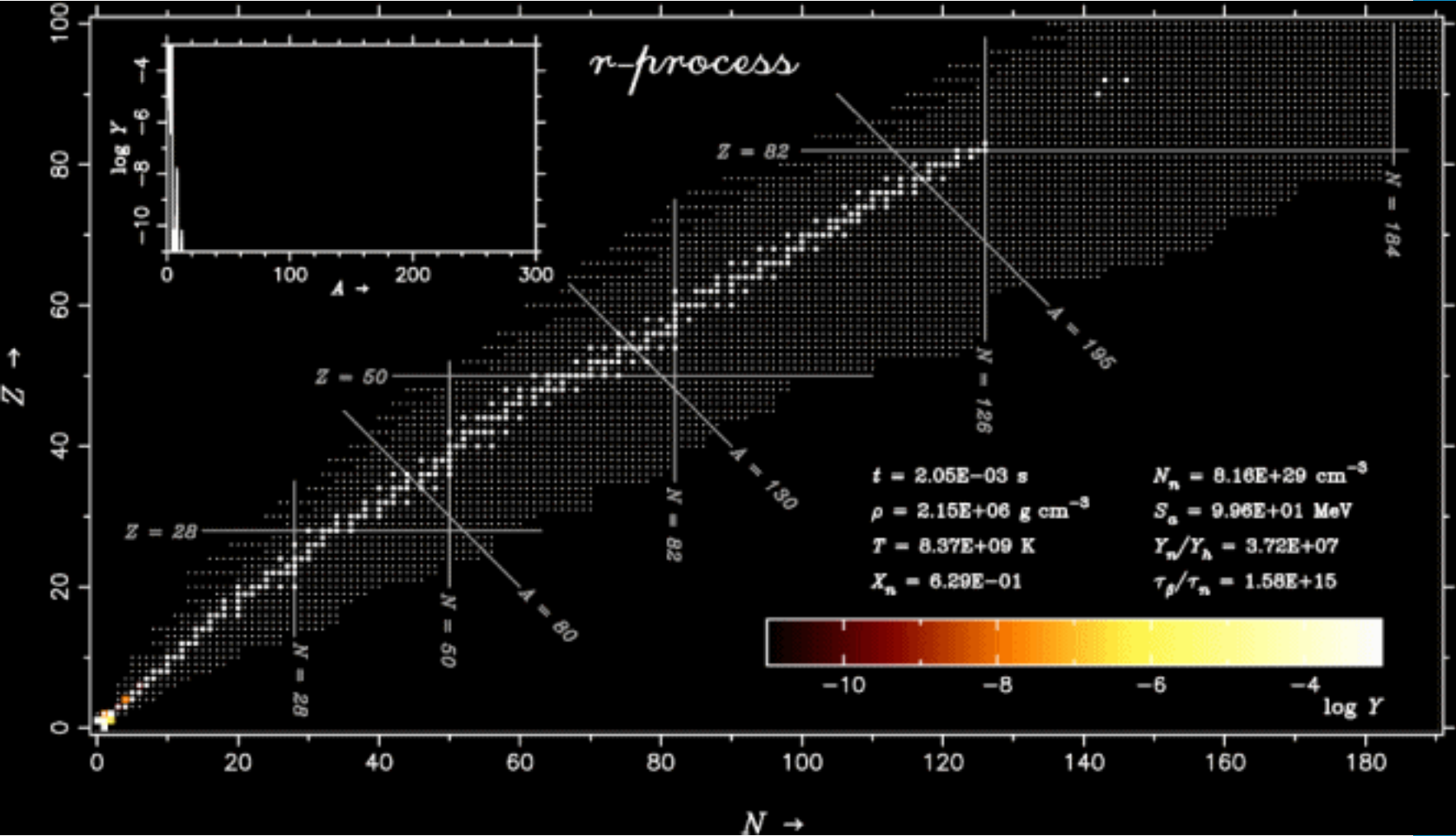
第12回（2018年度）湯川記念財団・木村利栄理論物理学賞

「連星中性子星の合体に対する現実的な素過程を
組み込んだ数値相対論シミュレーション」



元素はどこでどうやってできたのか？

原子核構造のことを知らないと話が進まない。

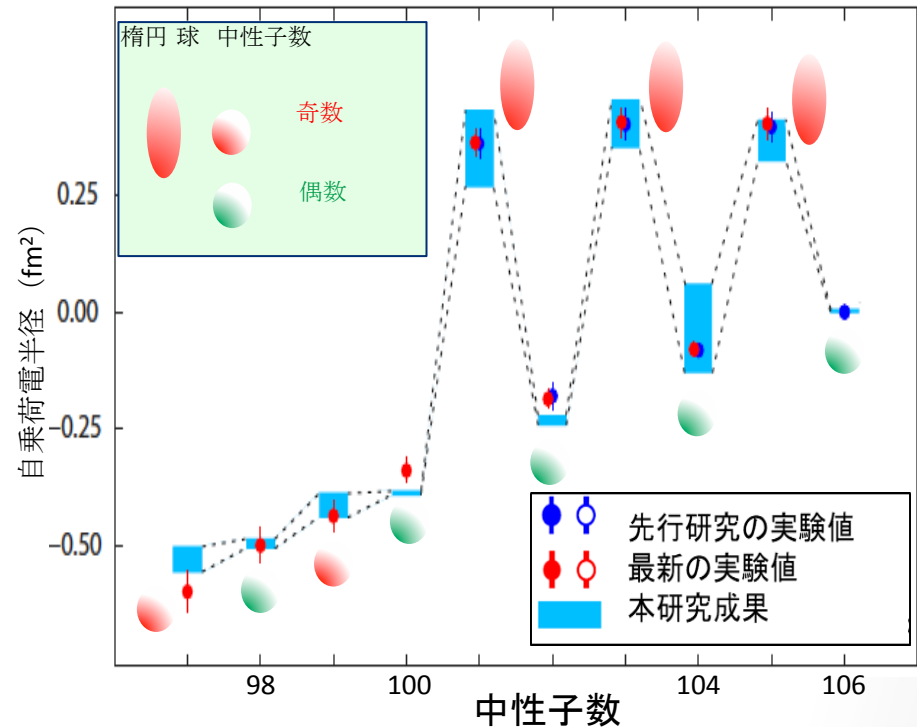


元素はどこでどうやってできたのか？

原子核構造のことを知らないと話が進まない。

モンテカルロ殻模型計算

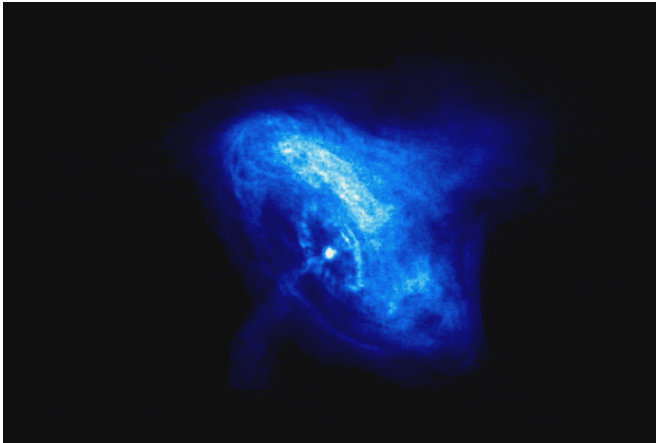
- 水銀 ($Z=80$, $A=180\sim$) くらい重い核でも精度よい計算が可能になってきた。
- 実験との比較を通じて計算を検証。
- r 過程を追いかけるのはさらなるチャレンジ。



水銀同位体の自乗荷電半径（楕円体で大）の異常な中性子数依存性。¹⁸⁶Hgからの相対値。大塚、角田 他。

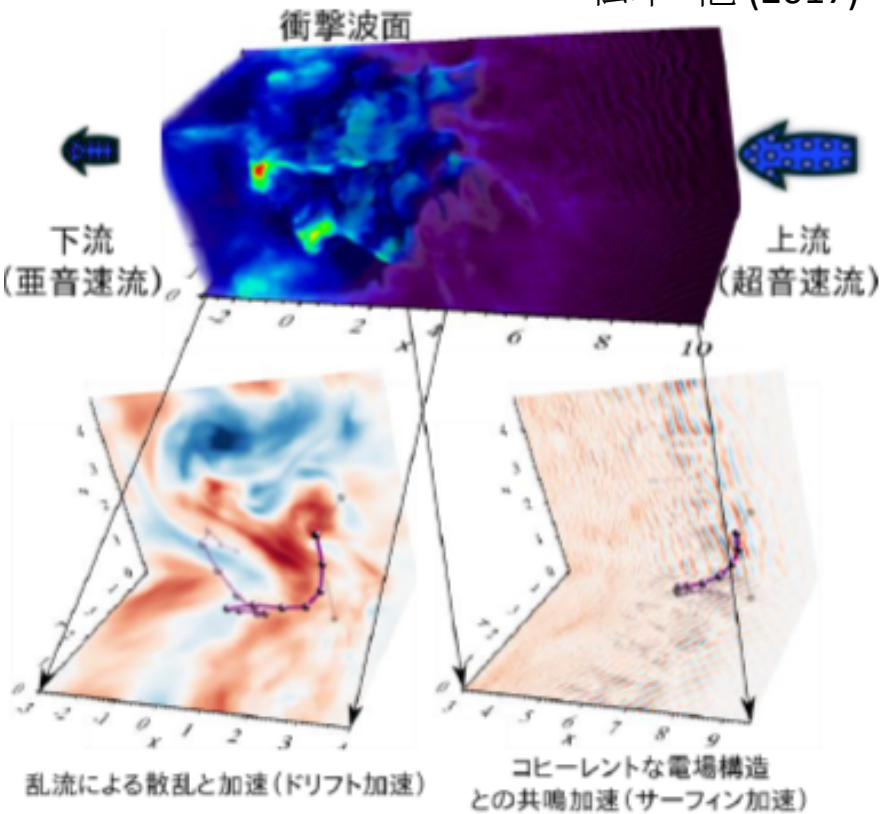
元素はどこでどうやってできたのか？

ほんとにそれだけか？



宇宙には変なものがいろいろある。

天体衝撃波の立体構造
松本 他 (2017)



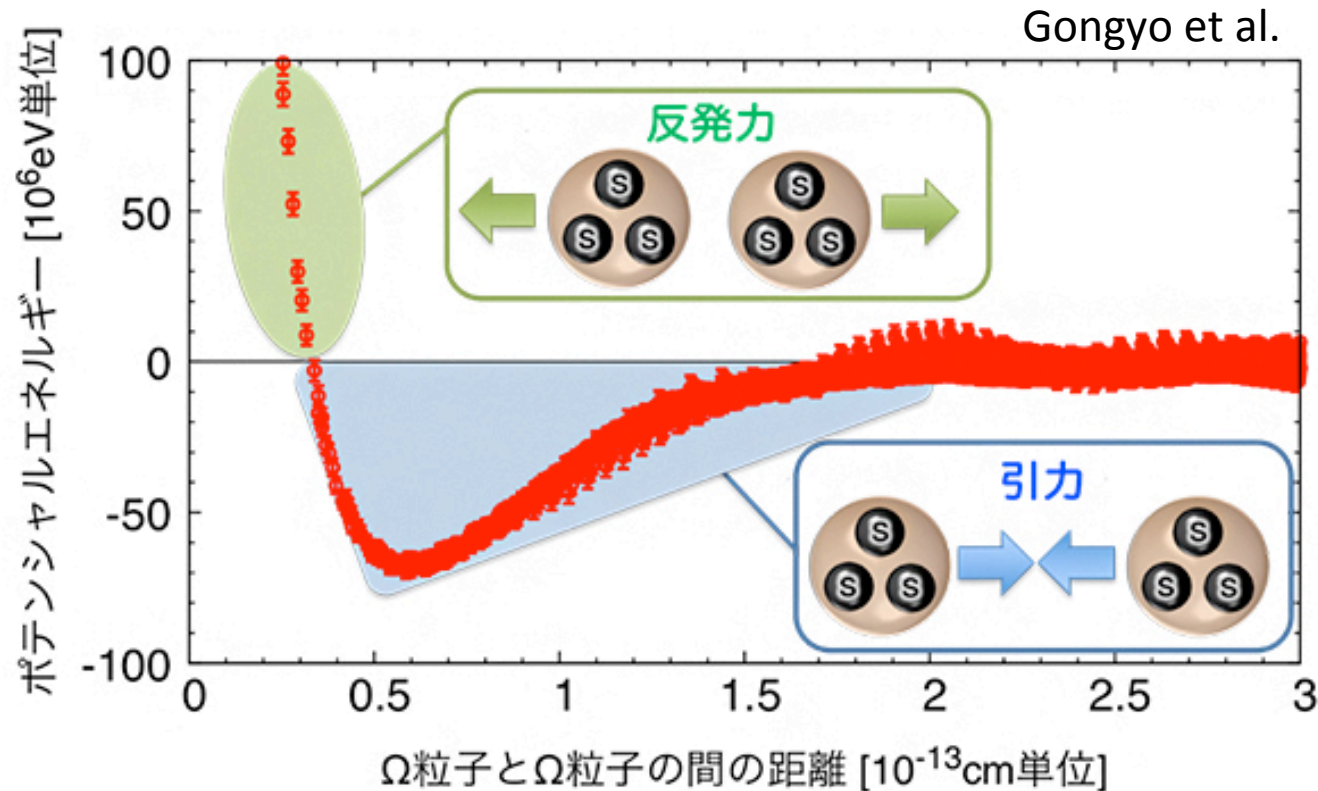
ICRR

元素はどこでどうやってできたのか？

ほんとうは第一原理から計算したい

格子QCDで計算した核力をインプットに…

でもそんなに簡単ではない。統計, 統計, 統計, ...
まずはストレンジクォーク。



2つのチャレンジ

ダークマターは何者か？

元素はどこでどうやって
できたのか？

• 何をしているのか？

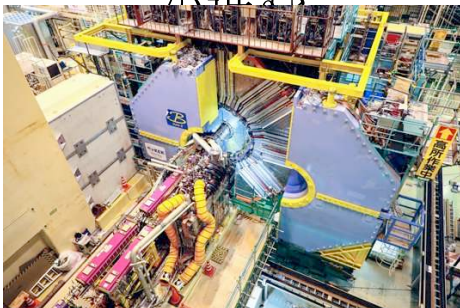
• どこでできたのか？

あらゆるところでシミュレーション

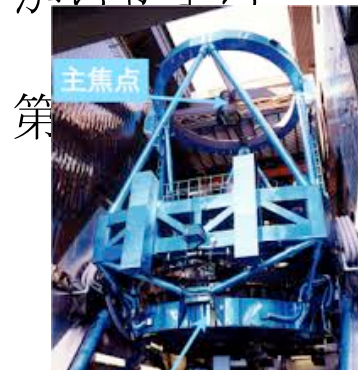
+ 実験・観測

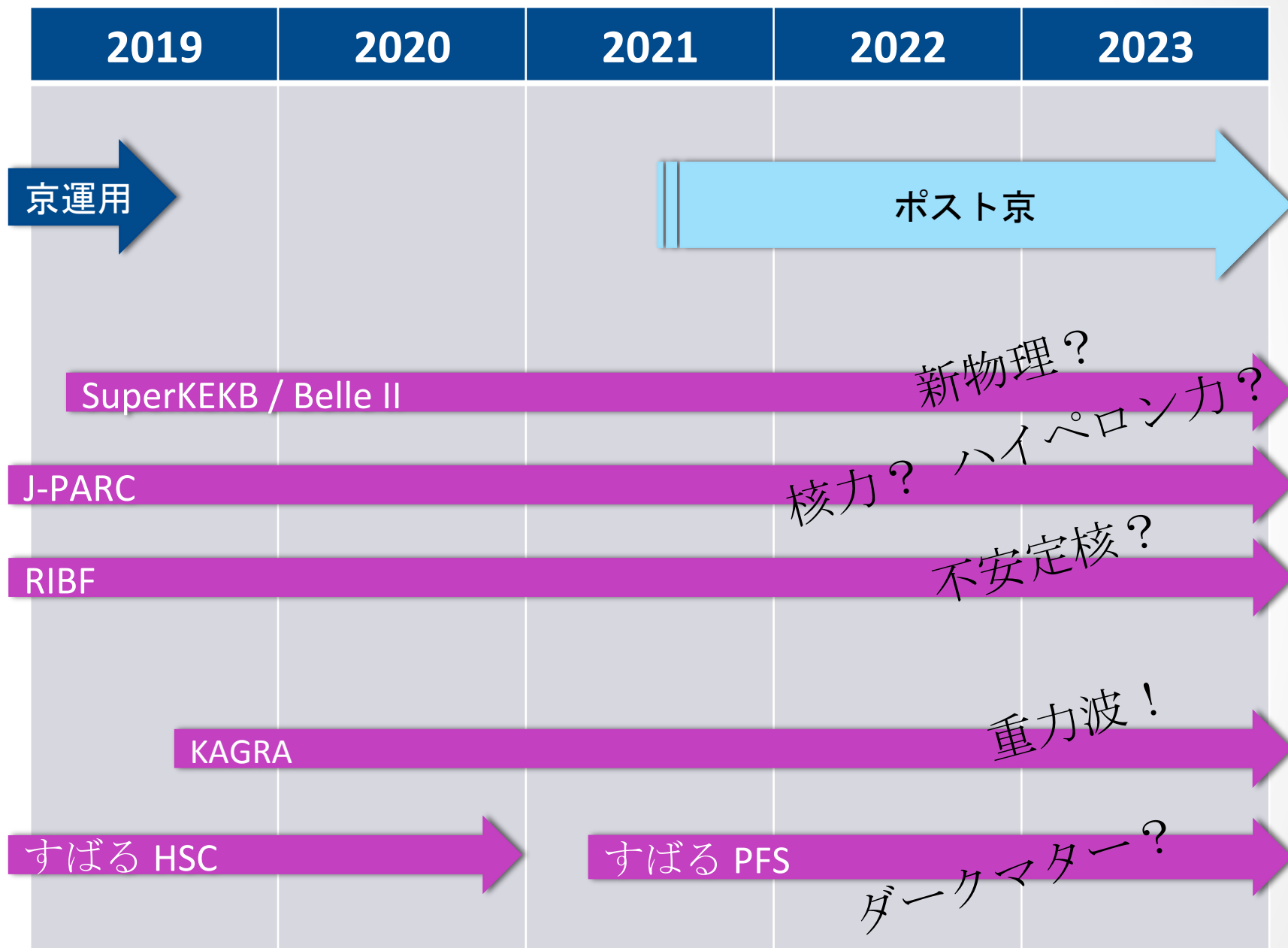
い。あらゆる手段で探索
が進む

レー
からせまる



ヨ実押





これからが本番

- これまでの4年間でもさまざまな進歩
 - シミュレーション研究はもちろん、実験・観測でも
(重力波観測！)
- 素粒子原子核宇宙：分野全体への貢献
 - シミュレーションだけで意味があるわけではない。分野としての大きな目標の中での役割。
 - 実験・観測との連携を深める。
- 具体的な課題と目標の設定
 - ポスト京全体の「目に見える成果」にどう貢献するか。
 - インパクトと地道な研究のバランスも大事。