

サマースクール

「クオークから超新星爆発まで」

—基礎物理の理想への挑戦—

校長： 青木慎也(筑波大)

副校長： 初田哲男(理研)

コーディネーター： 肥山詠美子(理研)、大西 明(京大基研)
柴田 大(京大基研)、関口 雄一郎(京大基研)
木内健太(京大基研)、諏訪雄大(京大基研)
平松尚志(京大基研)、市川隆敏(京大基研)

主催

- ・ 新学術領域研究「素核宇宙融合による計算科学に基づいた重層的物質構造の解明」
- ・ 計算基礎科学連携拠点
- ・ HPCI戦略プログラム 分野5「物質と宇宙の起源と構造」
- ・ 京都大学基礎物理学研究所

趣旨

素粒子・原子核・宇宙物理の分野連携を目指した新学術領域研究「素核宇宙融合による計算科学に基づいた重層的物質構造の解明」(領域代表者・青木慎也、2008年度～2012年度)が進められています。

この新学術領域では、

- ・ 量子力学に基づくクオークの力学と核力、
 - ・ 核力の詳細に基づく原子核構造、
 - ・ 原子核構造とその反応に基づく超新星爆発などの天体現象
- など、物質の階層を越えた研究領域の形成を目指しています。

このような素核宇宙連携で現在進行している 研究活動状況を外部の研究者に幅広く知ってもらうことを目的とするために、コンピュータを使用して数値計算をしてもらい、我々の研究内容を体験して頂こうとサマースクールを企画しました。



物質の階層構造

DNA

人間

太陽系

銀河系

10^{23} [cm]

10^{12} [cm]

10^2 [cm]

10^{-7} [cm]

10^{-8} [cm]

10^{-12} [cm]

10^{-13} [cm]

$< 10^{-16}$ [cm]

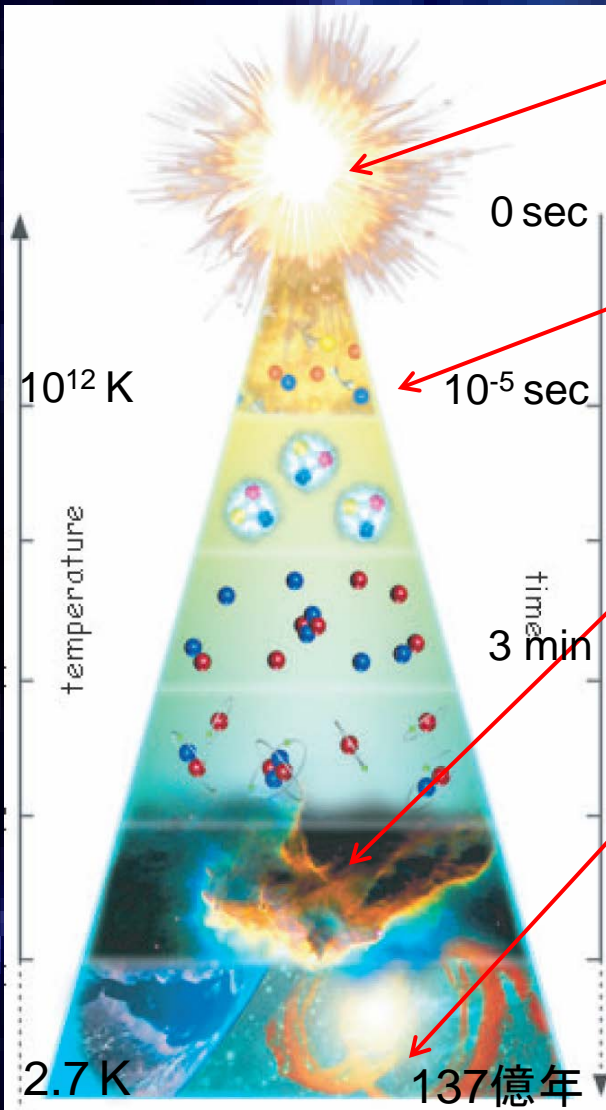
原子

原子核

陽子・中性子

現代物理学の基本課題：宇宙進化と物質創成

--- 我々はどこから来てどこへ行くのか？ ---



▪ **物質の究極構造** ⇔ LHC

-- 統一理論、真空の構造

▪ **宇宙初期の極限物質** ⇔ RHIC, LHC

-- 超高温状態 (10^{12} K) とビッグバン

▪ **重元素の起源** ⇔ RIBF

-- 鉄より重い元素はどのように生まれたのか？

▪ **星の終焉での極限物質** ⇔ J-PARC

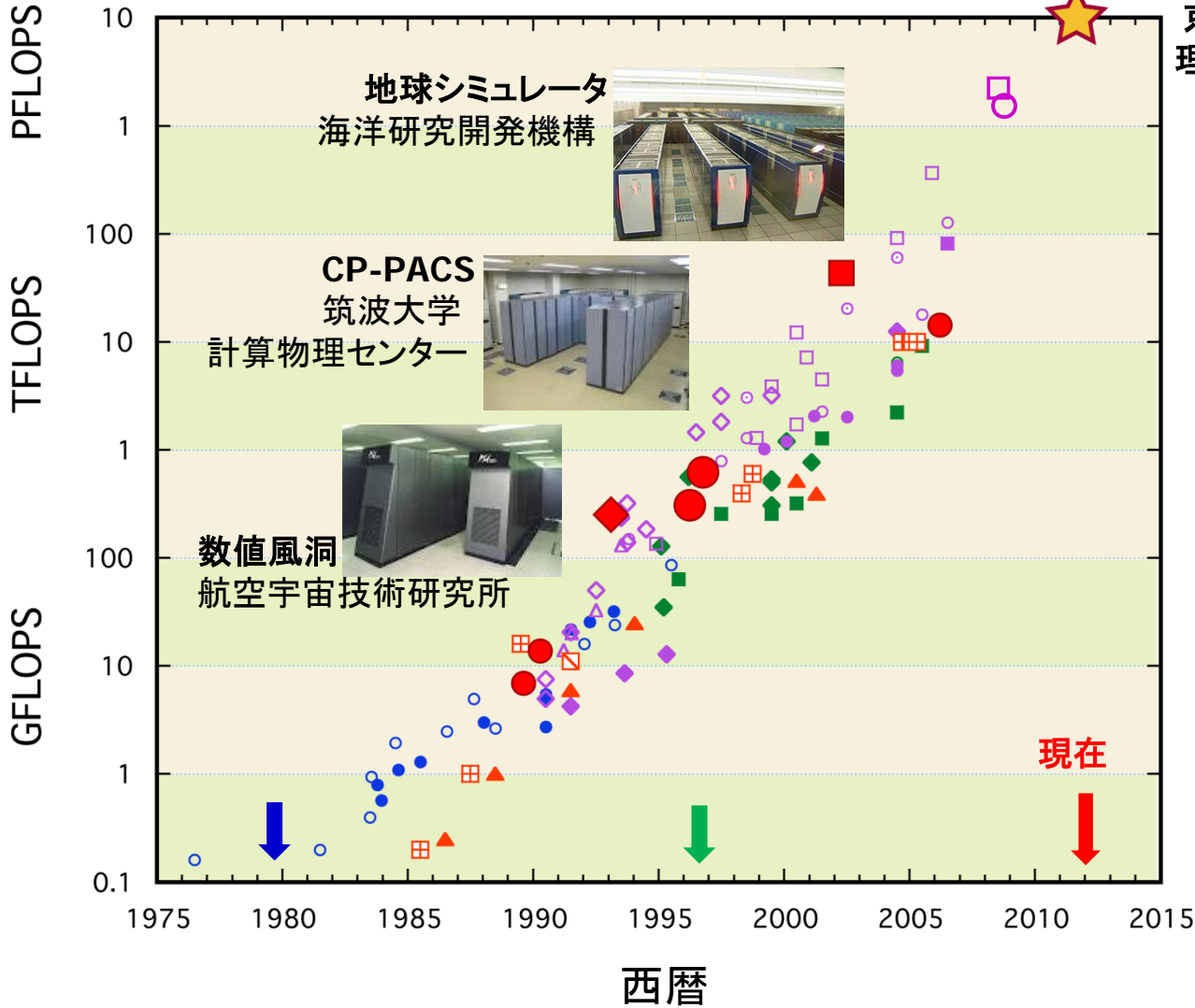
-- 超高密度状態 (10^{12} kg/cm³) と
中性子星、クォーク星、ブラックホール

手法：理論物理、実験物理、計算物理

スーパーコンピュータ



京コンピュータ
理研計算科学研究機構



京速

兆速

億速

京コンピュータ： HPCI戦略プログラム



予測する生命科学・
医療および創薬基盤

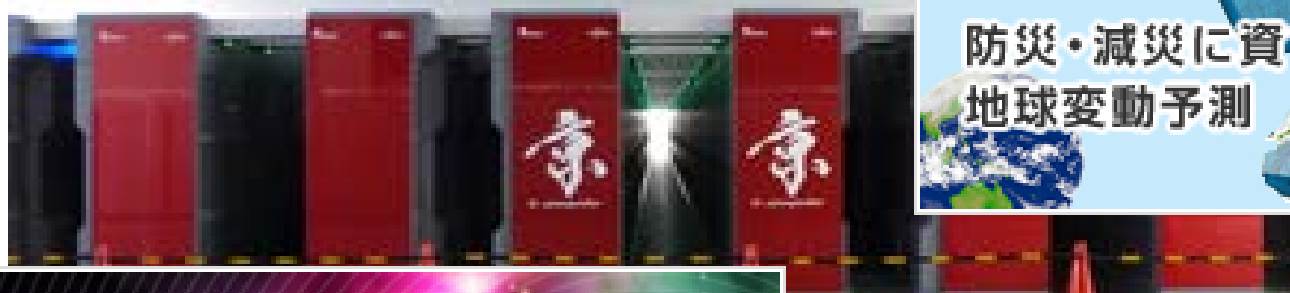
分野1



発想をリアルへ
新物質・エネルギー創成

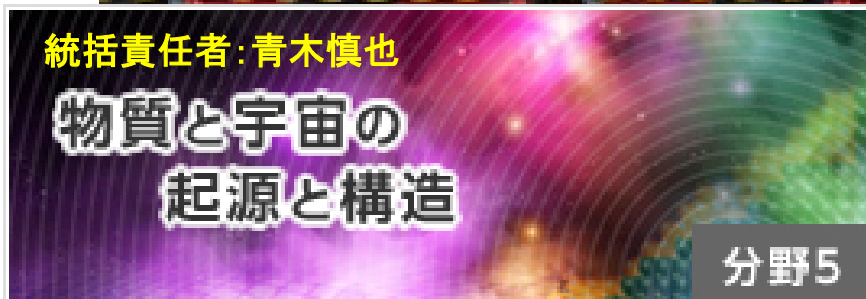
HPCI

分野2



防災・減災に資する
地球変動予測

分野3



統括責任者：青木慎也

物質と宇宙の
起源と構造

分野5



次世代ものづくり

分野4

格子QCDによる物理点でのバリオン間相互作用の決定 ▶

大規模量子多体計算による核物性解明とその応用 ▶

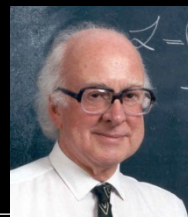
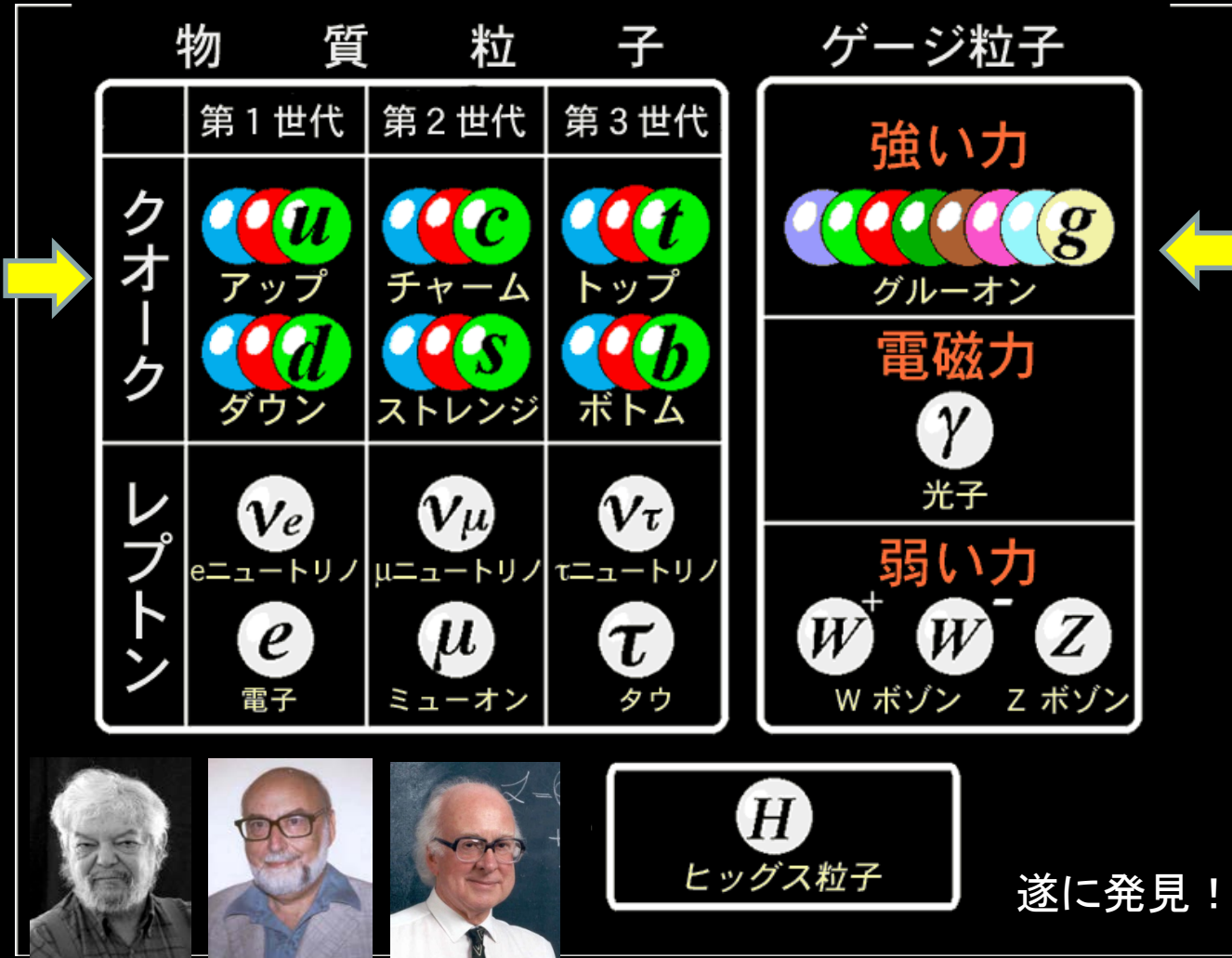
超新星爆発およびブラックホール誕生過程の解明 ▶

ダークマターの密度ゆらぎから生まれる第1世代天体形成 ▶

知られている“物質粒子と力の粒子”

小林誠・益川敏英
(2008年ノーベル賞)

南部陽一郎
(2008年ノーベル賞)



Brout

Englert

Higgs

遂に発見！

ヒッグス粒子が発見

万物に質量(重さ)を与えると考えられてきた「ヒッグス粒子」とみられる新粒子を発見したと、スイス・ジュネーブ近郊にある欧州合同原子核研究機関(CERN)が4日、発表した。素粒子物理学の基礎となる「標準理論」の中で唯一見つかっていなかった素粒子だ。物質が質量を獲得し、宇宙がいかにして現在の姿に至ったかを解明する意味がある。

▼3面▶研究者数千人が参加
ヒッグス粒子は、137億年前の「ビッグバン」によって宇宙が誕生した直後に、光速で飛び回る素粒子に対して水あめのように作用して、動きにくくしたと考えられている。この「動きにくさ」こそ、質量を持ったことを意味する。

万物の重さの源

今回発表されたのは、東大や筑波大など日本の16研究機関が参加する「ATLAS」と、欧米を中心とした「CMS」という二つの研究チームの実験成果。ともに、2008年に稼働を開始したCERNの巨大加速器「LHC」を使って探索実験を続けていた。

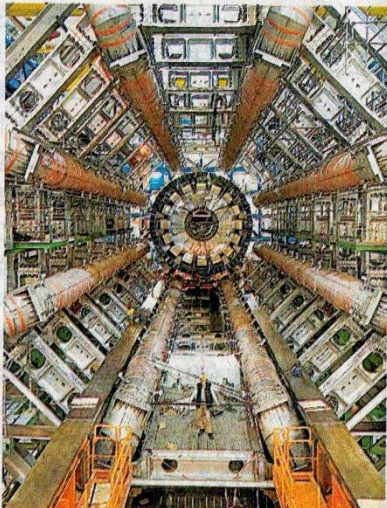
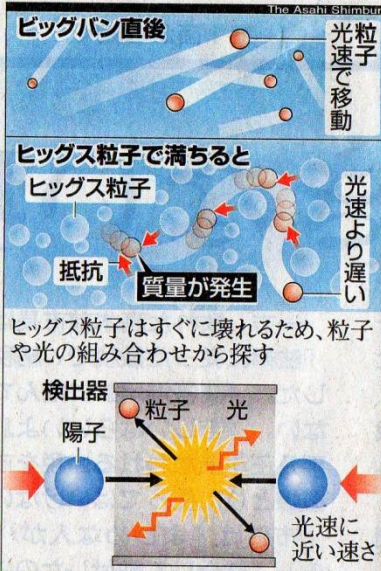
ヒッグス粒子は、加速器で光速近くまで加速した陽子と陽子を衝突させることで人為的に作り出すことができる。だが、瞬時に別の粒子や光に変わり、直接観測できない。そこで、変身後の粒子や光を検出器でとらえ、データを統計的に解析することでヒッグス粒子の存在確率を割り出す。データ量が増えるほど確率は高まる。

今回の成果では、CMS、ATLAS共に、実験によって未知の新粒子が生まれた確率を99.9999%とはじきだした。この確度であれば物理的に「発見」と認定できる。だが、新粒子がヒッグス粒子であることを突き止めるには、なおデータを積み重ねて発見を確定する見通しだ。

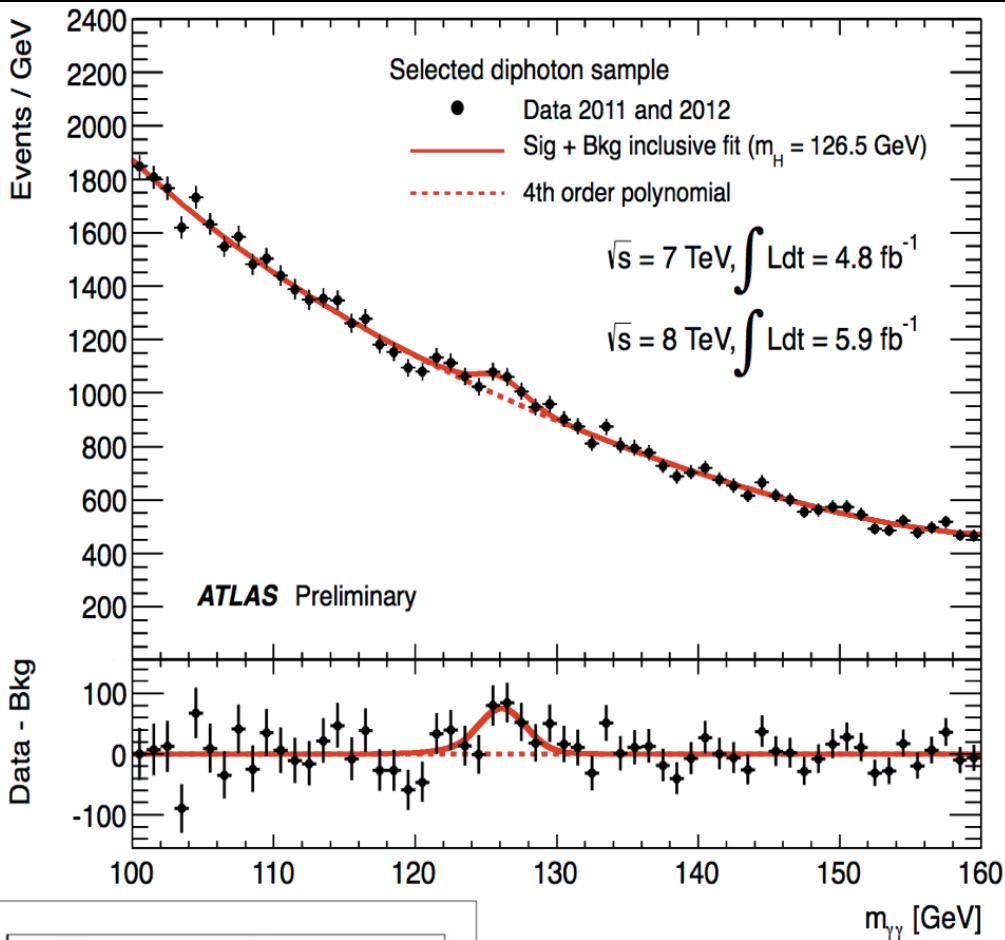
CERNのロルフ・ホイヤー所長は、ヒッグス粒子とみられる粒子の発見について、「歴史的瞬间だが、これからの様々な発見のための始まりに過ぎない」という見解を発表した。

CERNの発表会場には、約四十年前にヒッグス粒子の存在を予測した英エディンバラ大学のピーター・ヒッグス名誉教授(88)も招かれ、拍手で祝福された。(田中誠士)

国際チーム発表



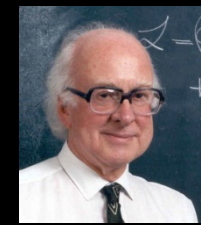
LHCに設置されている検出装置「ATLAS」=CERN、アトラス実験グループ提供



Brout

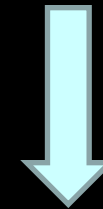


Englert



Higgs

1964年に提唱

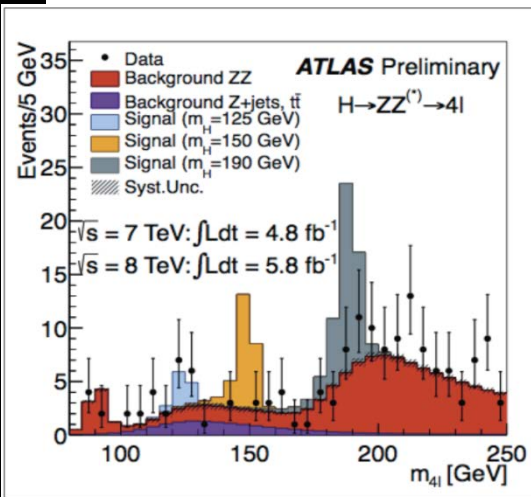


遂に発見！

2012年7月4日 セルン発表

質量: 125.6 GeV
(陽子の約134倍)

信頼度: 5σ
(偶然事象の確率
3百万分の1)

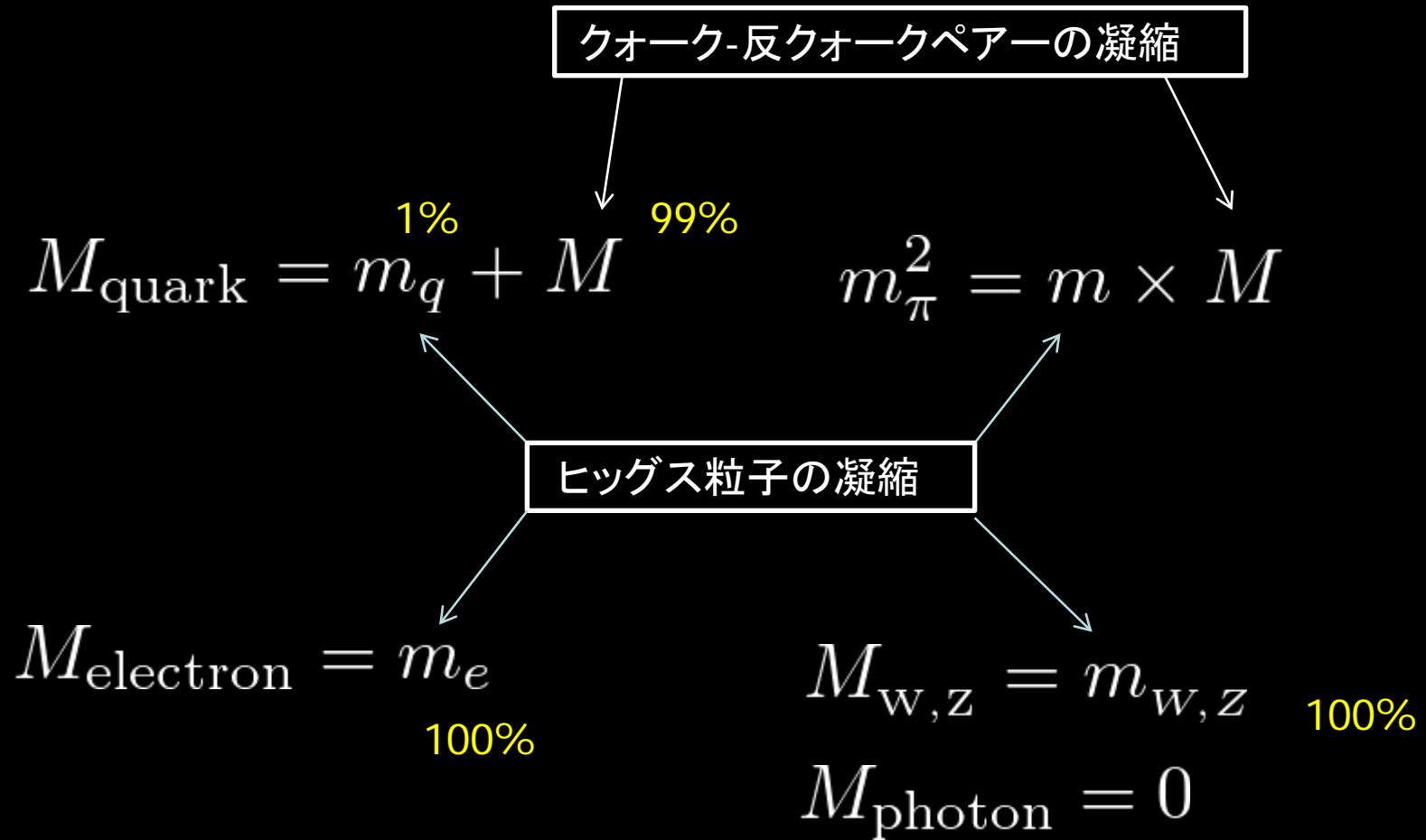


$H \rightarrow \gamma\gamma$

$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4 \text{ lepton}$



“質量の起源をより詳細にみると”

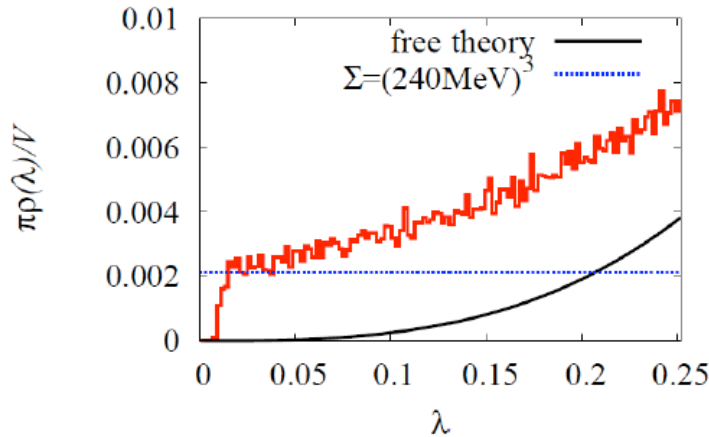


素粒子物理と計算科学

- 自発的対称性の破れと南部理論



南部陽一郎博士

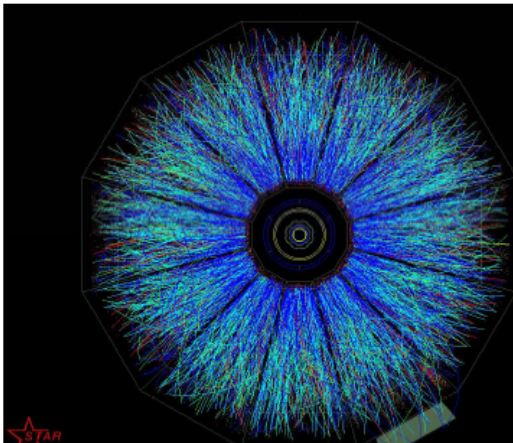


格子QCDによる対称性の破れの証明

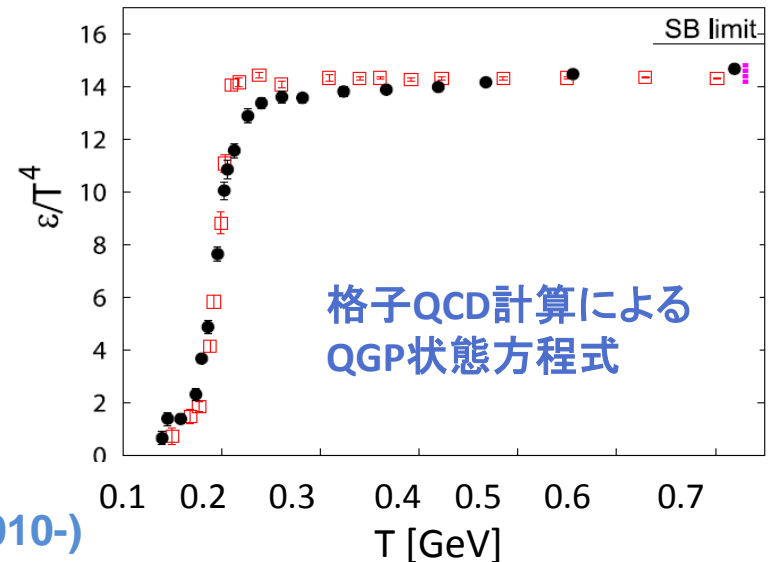


Higgs粒子探索(LHC, 2009-)

- クォーク・グルーオンプラズマ：物質の新しい存在形態を探る

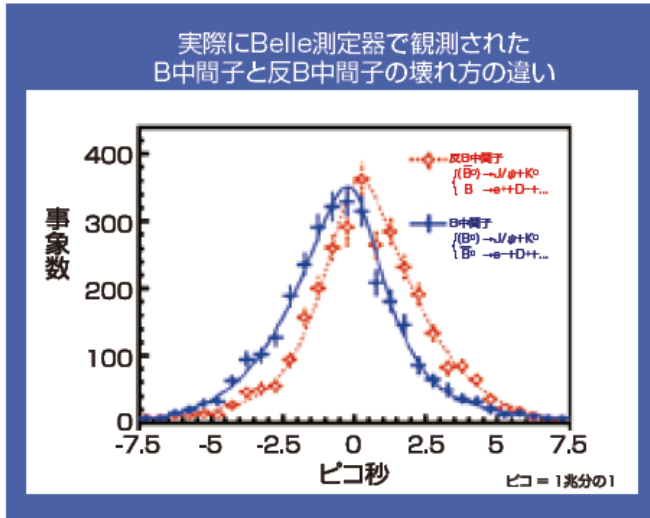


高エネルギー重イオン衝突実験(RHIC, 2000-)(LHC 2010-)



● 素粒子の精密実験と小林・益川理論

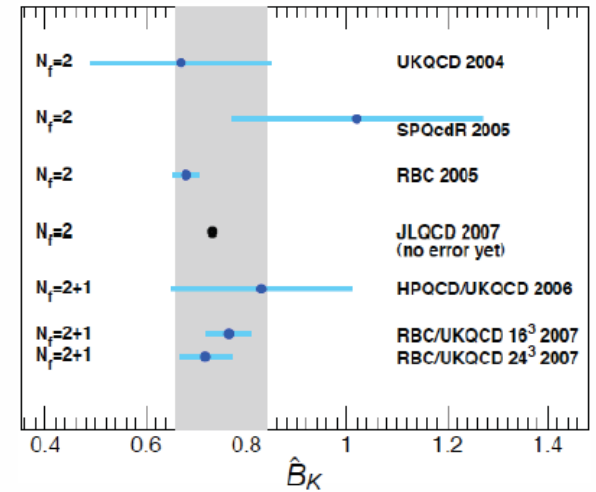
Grey band is constraint on \hat{B}_K assuming CKM-unity ([UTfit web site](#))



小林博士



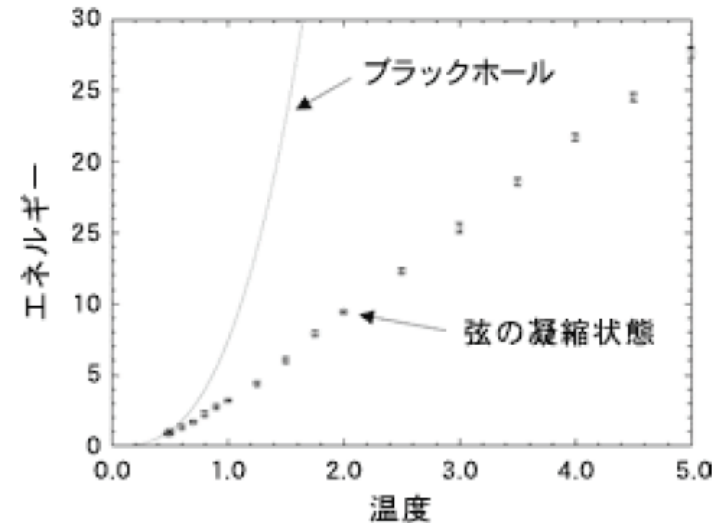
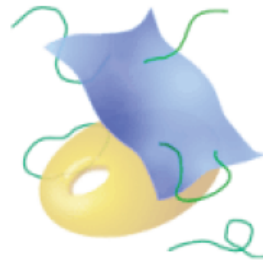
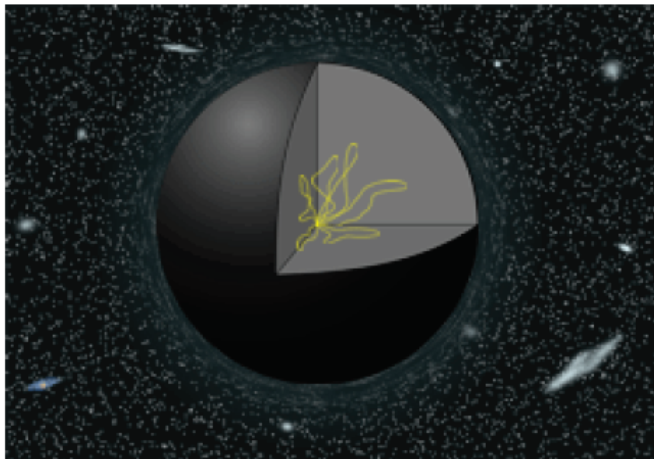
益川博士



KEK B-FactorによるCP対称性の破れの検証

格子QCDによるCPの破れの行列要素の計算

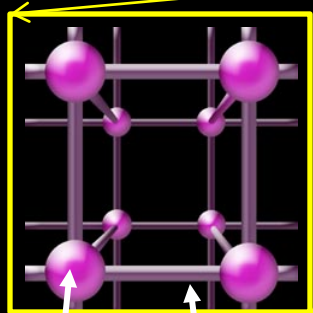
● 超対称性と超弦理論：究極理論へのチャレンジ



超弦理論によるブラックホールの内部構造

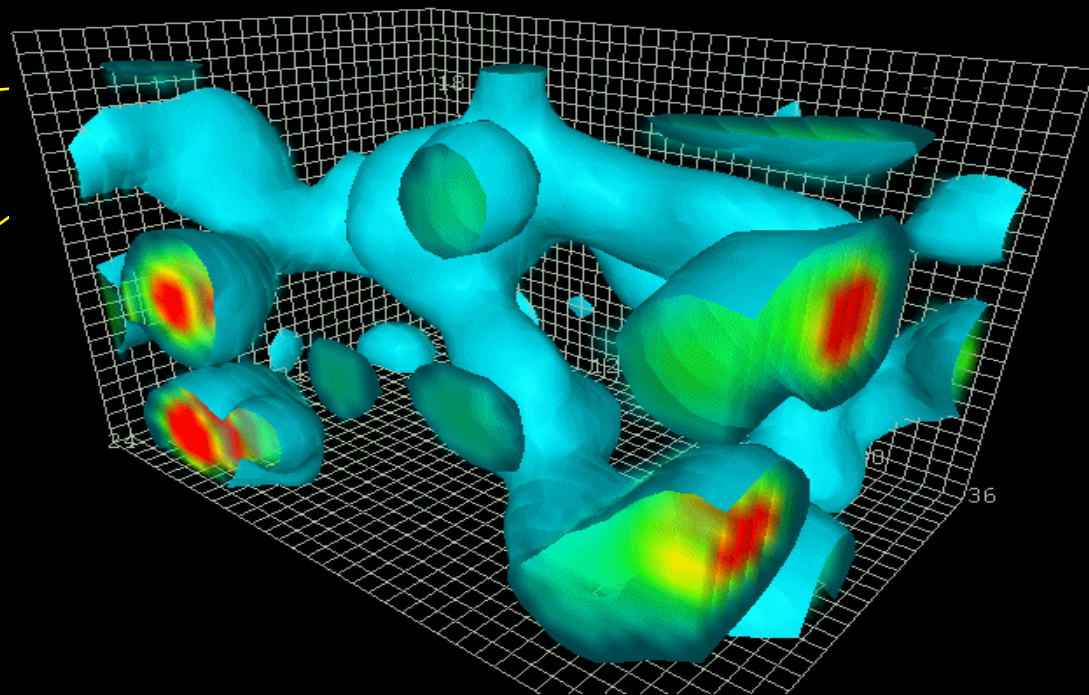
その数値計算

格子QCDによる物質構造



クォーク $q(n)$

グルーオン $U_\mu(n)$



$$\langle O \rangle = \frac{1}{Z} \int_V [dU] e^{-S_g(U)} \cdot \det F(U, m) \cdot Q(U, m)$$

- 定義のはっきりした有限自由度系
- ゲージ不変性
- 非摂動的

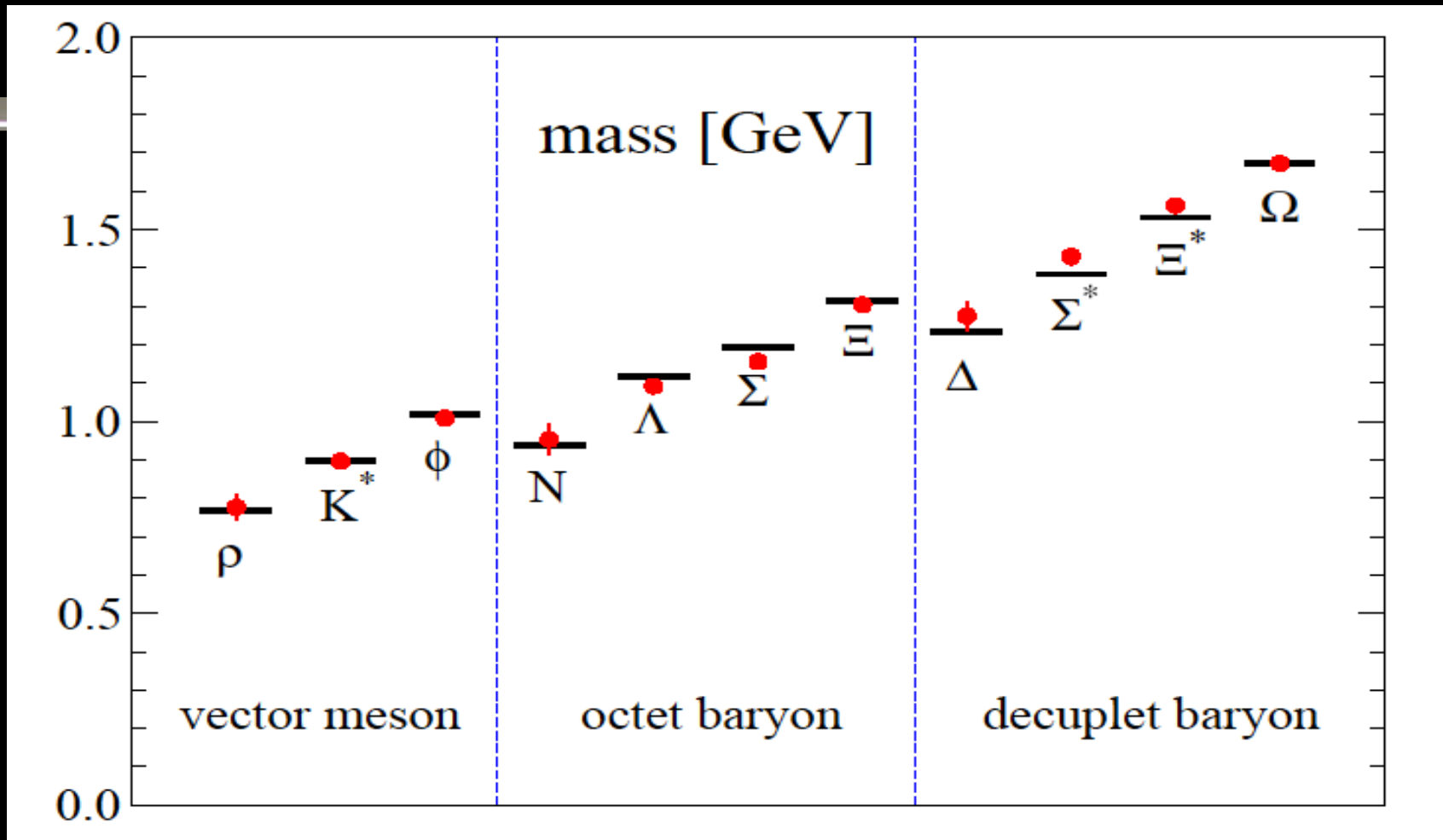
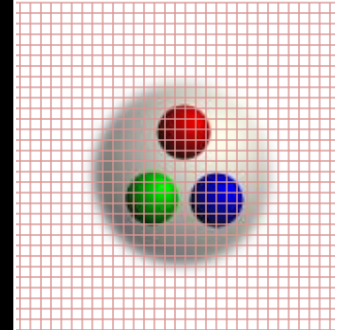


数値シミュレーション

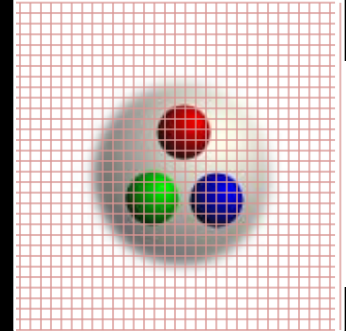
格子QCDによるハドロン質量の計算

3%以内の精度で基底状態のメソン・バリオンの質量を再現

最も軽い π 中間子質量 $m_\pi = 156$ MeV

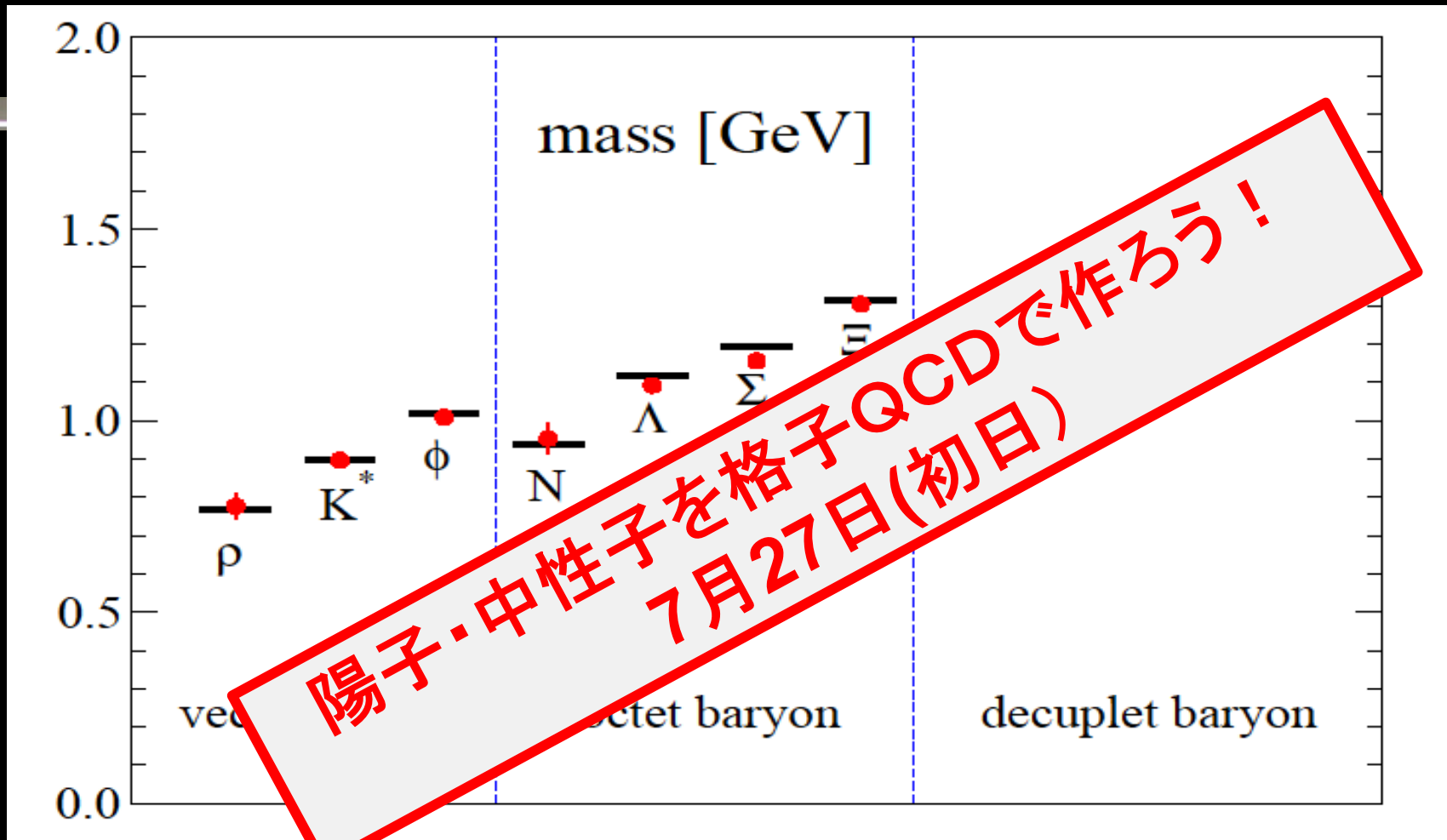


格子QCDによるハドロン質量の計算

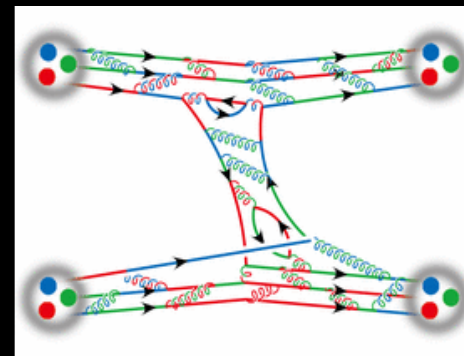


3%以内の精度で基底状態のメソン・バリオンの質量を再現

最も軽い π 中間子質量 $m_\pi = 156$ MeV



核力とハイペロン力



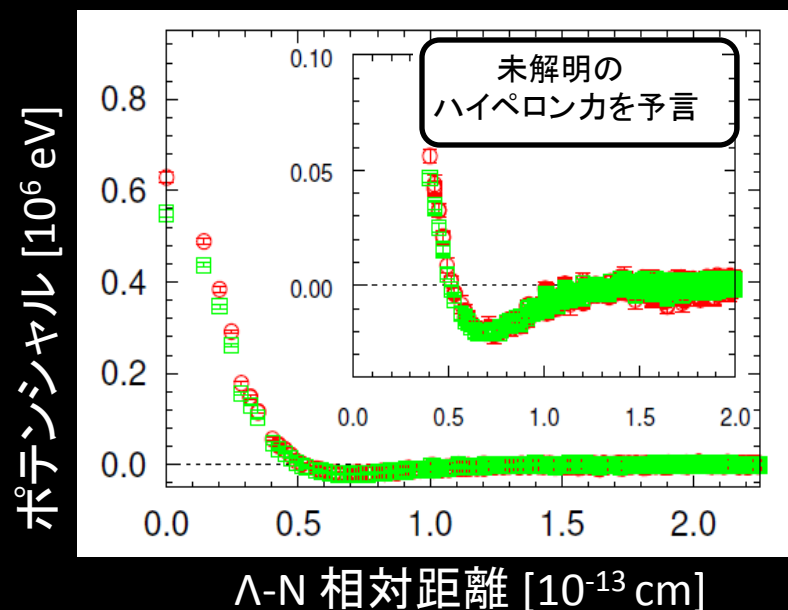
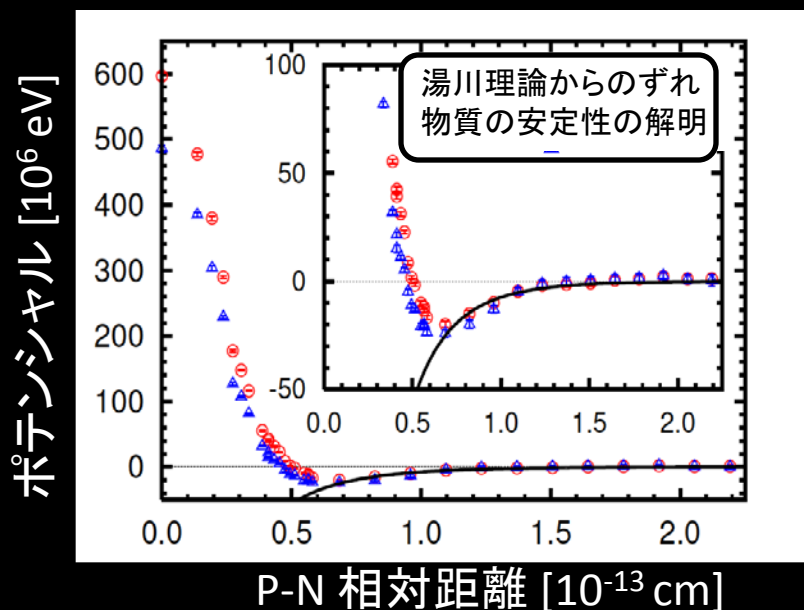
1935年 湯川秀樹博士による核力の中間子論の提唱

1965年 南部陽一郎博士によるQCD(量子色力学)の提唱

1997年 南部陽一郎 “クォーク” 第2版 より

“現在でも核力の詳細を基本方程式から導くことはできない。
いわば複雑な高分子の性質をシュレーディンガー方程式から
出発して決定せよというようなもので、むしろこれは無理な話である。”

2007年 **ところが、理論+数値シミュレーションにより可能になった！**



核力とハイペロン力

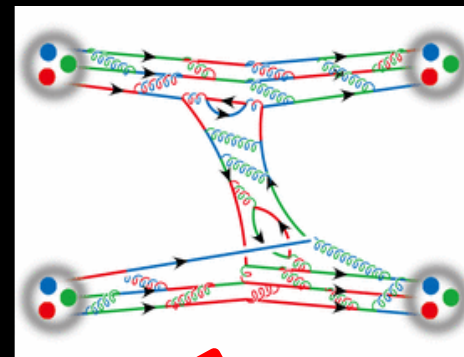
1935年 湯川秀樹博士による核力の中間子論の提唱

1965年 南部陽一郎博士によるQCD(量子色力学)の提唱

1997年 南部陽一郎 “クォーク” 第2版 より

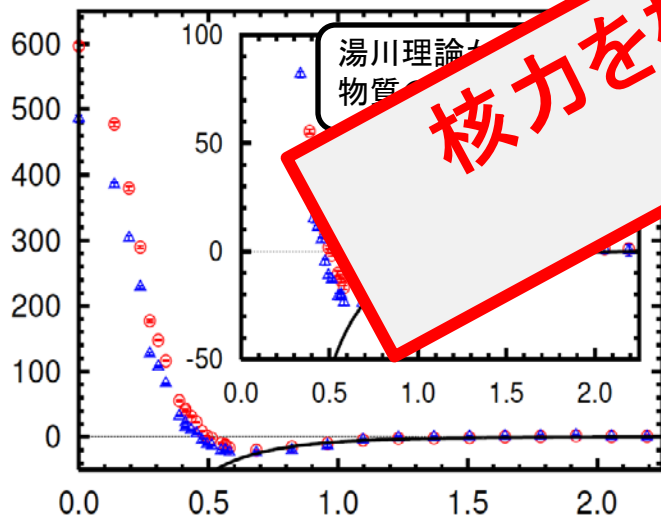
“現在でも核力の詳細を基本方程式から導くことはできない。いわば複雑な高分子の性質をシュレーディンガー方程式から出発して決定せよというようなもので、むしろこの

2007年 **ところが、理論+数値シミュレーションに**



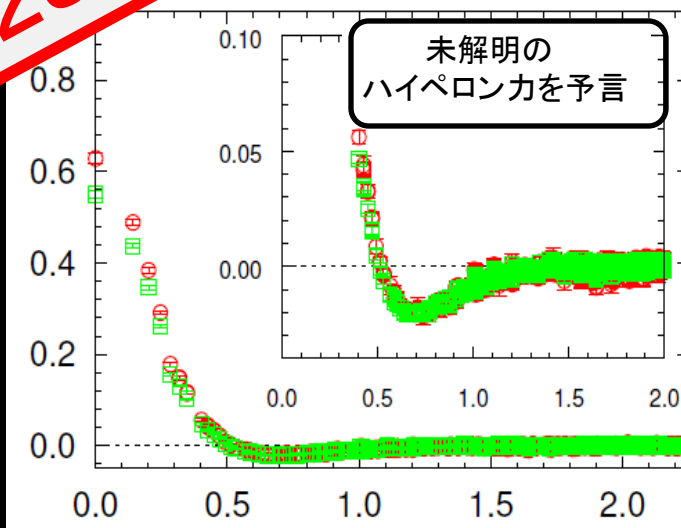
**核力を格子QCDで計算しよう
7月28日(2日目)**

ポテンシャル [10^6 eV]



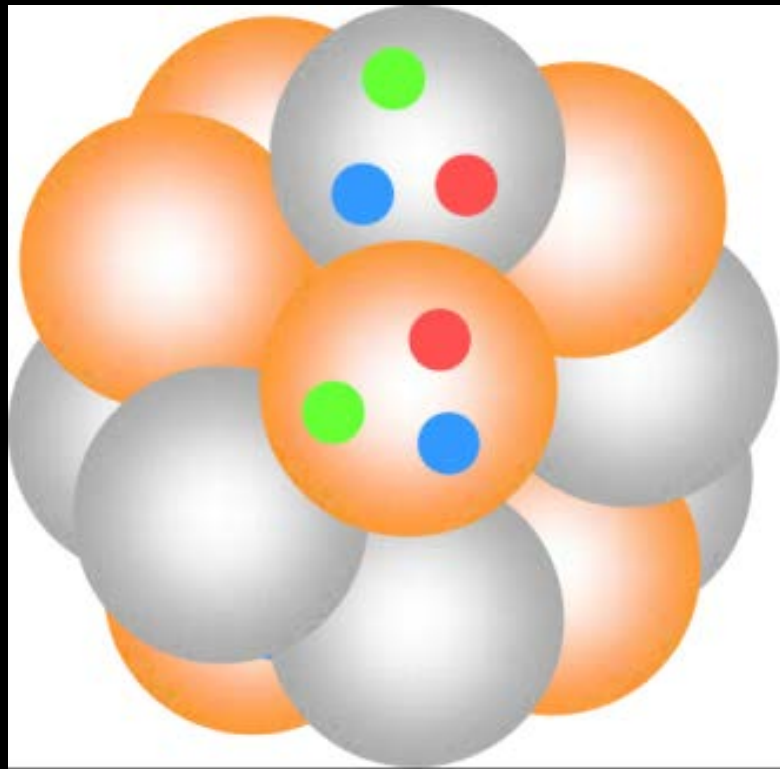
P-N 相対距離 [10^{-13} cm]

ポテンシャル [10^6 eV]

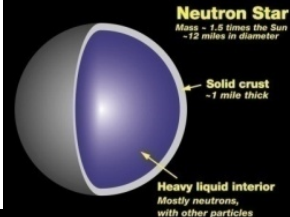
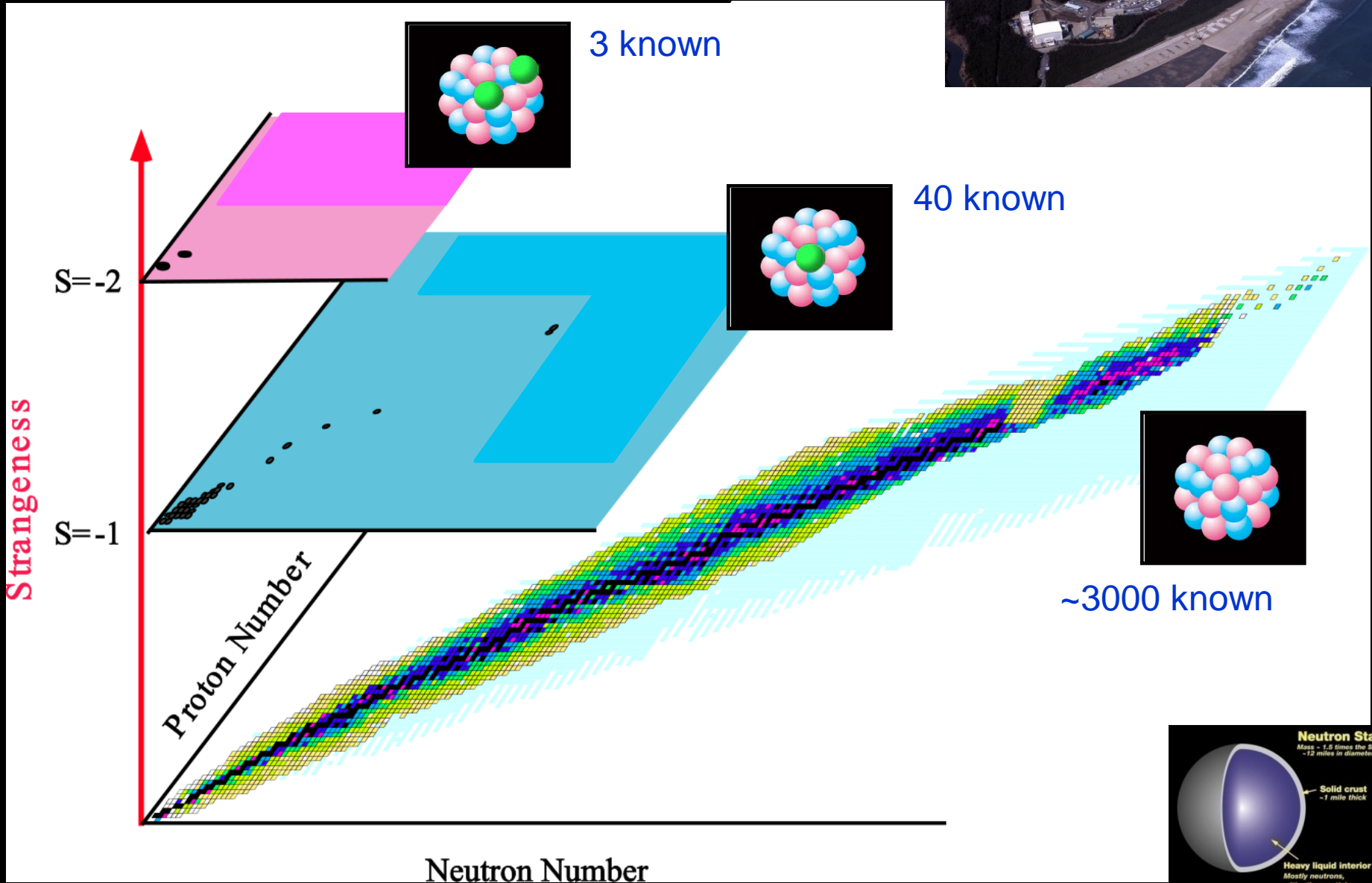


Λ -N 相対距離 [10^{-13} cm]

原子核

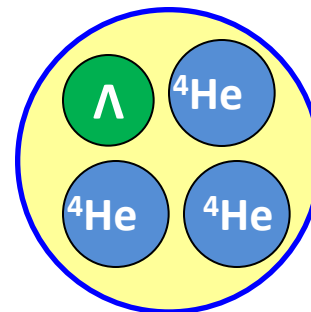


3次元核図表



精密ハイパー核計算による未知のハイペロン核の決定例

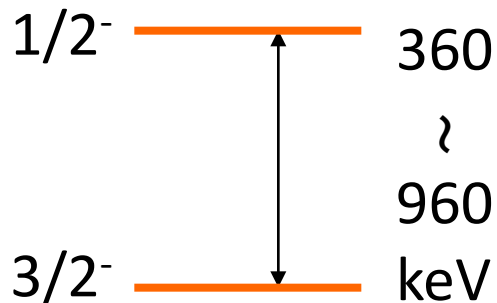
$^{13}_{\Lambda}\text{C}$ 炭素のハイパー同位体



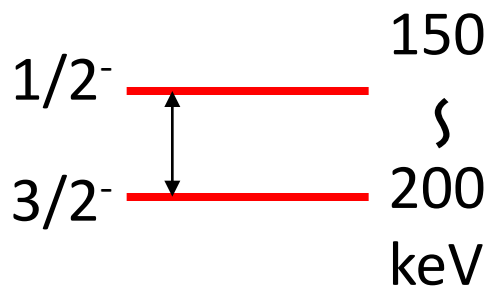
未知のハイペロン核以外の不定性を精密計算(無限小ガウスローブ法)で排除



精密計算の予言

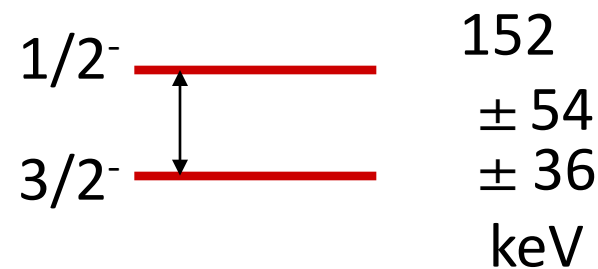


ハイペロン核
モデルA

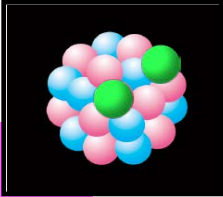
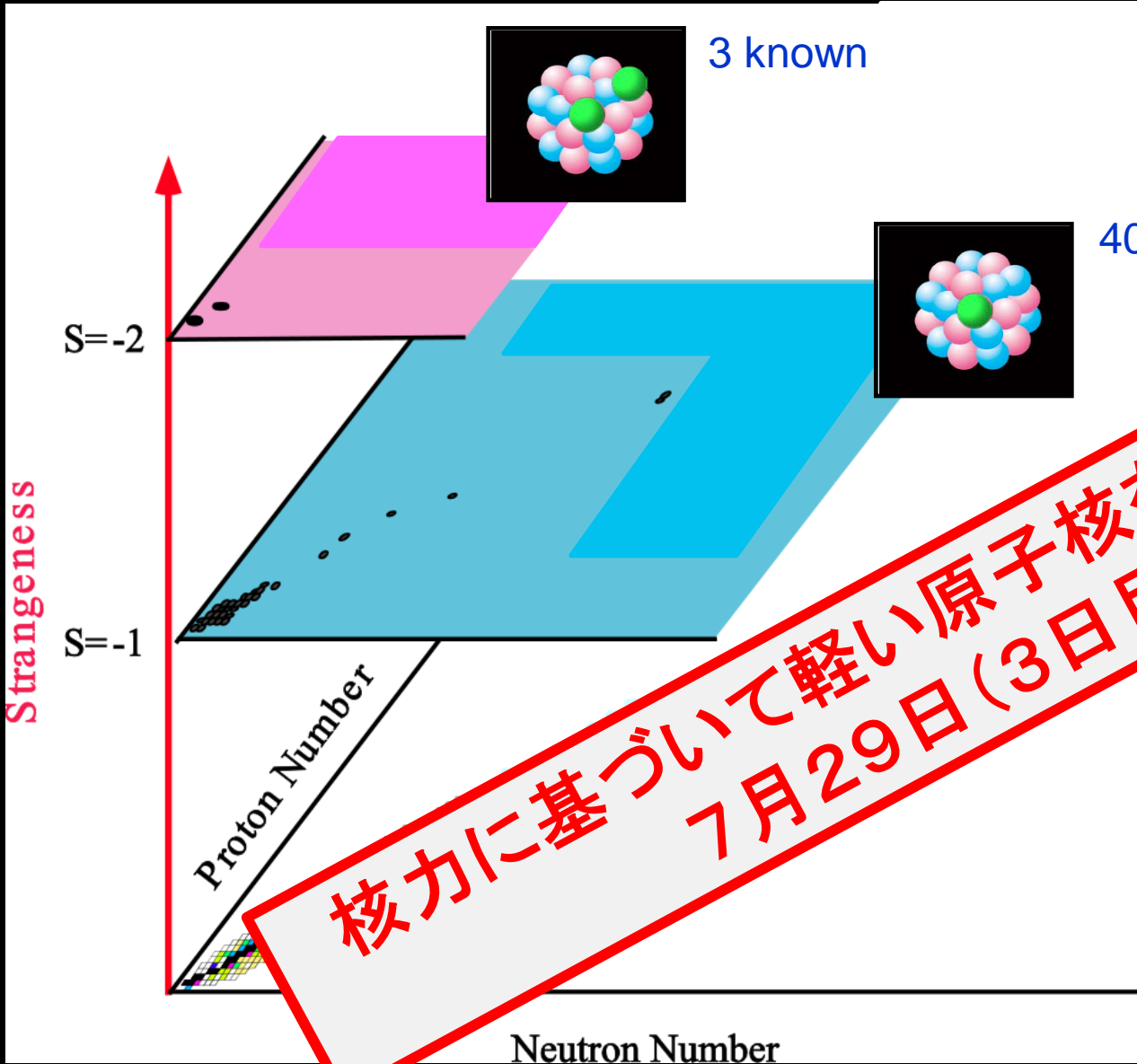


ハイペロン核
モデルB

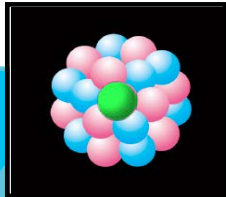
後の実験結果(BNL-E929)



3次元核図表



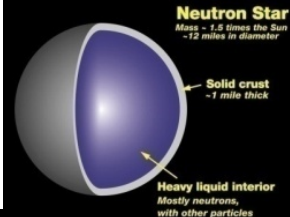
3 known



40 known



~3000 known



中性子星

半径 ~ 10 km

重さ \sim 太陽

中心密度 $\sim 10^{12}$ kg/cm³

原子核物理 (実験)

ハイパー核分光、ハイペロン相互作用
J-PARC (2009-)

原子核物理 (理論)

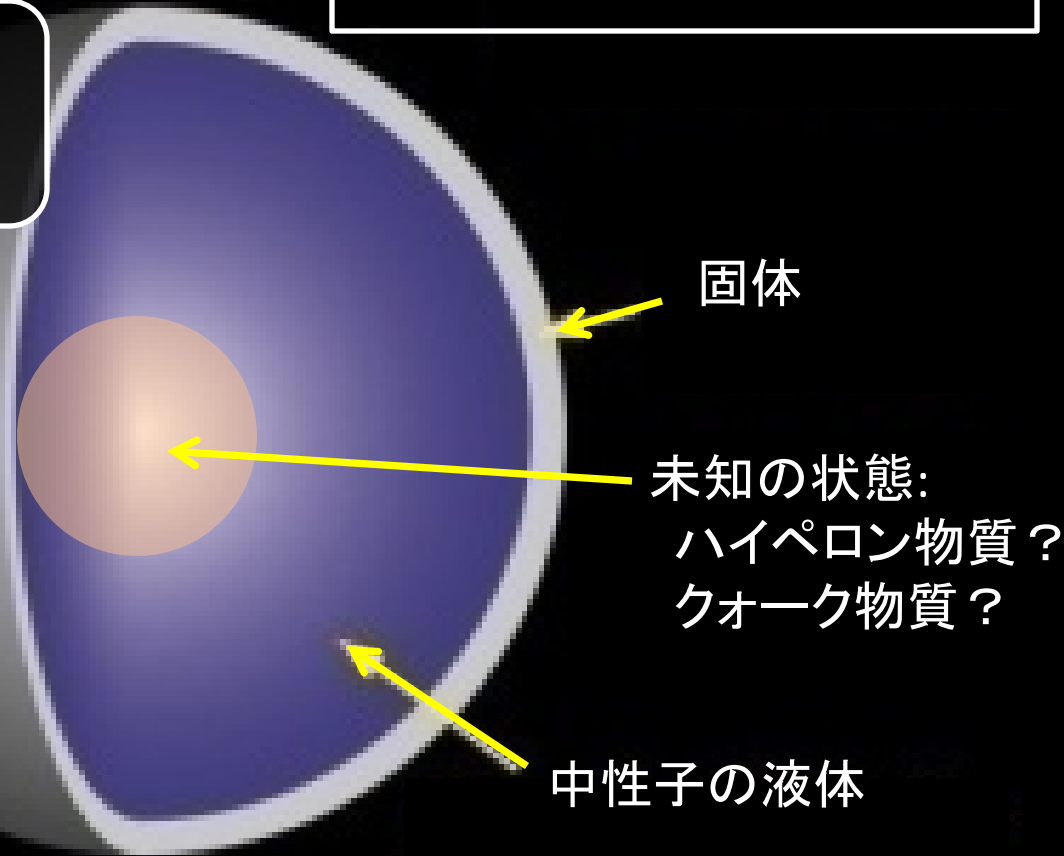
少数量子系厳密計算
高密度状態方程式

宇宙物理 (理論)

一般相対論
回転と磁場を考慮した
中性子星構造計算

宇宙物理 (観測)

質量、半径、回転周期、磁場、温度



中性子星

半径 ~ 10 km

重さ \sim 太陽

中心密度 $\sim 10^{12}$ kg/cm³

原子核物理 (実験)

ハイパー核分光、ハイペロン相互作用
J-PARC (2009-)

原子核物理 (理論)

少数量子系厳密計算
高密度状態方程式

宇宙物理 (理論)

一般相対論
回転と磁場を考慮した
中性子星構造計算

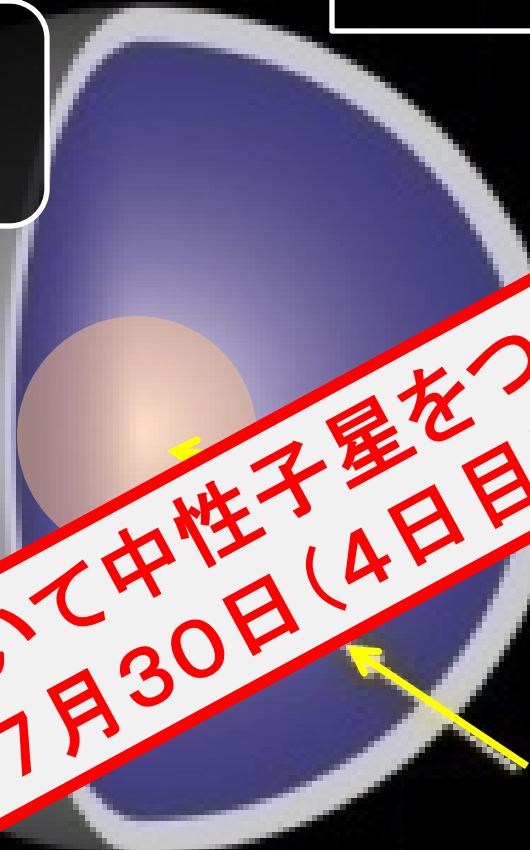
宇宙物理 (観測)

質量、半径、パルス周期、磁場、温度

核力に基づいて中性子星をつくらう!
7月30日(4日目)

未知の状態:
ハイペロン物質?
クォーク物質?

中性子の液体



超新星爆発と元素の起源

宇宙物理 (観測)

超新星爆発の観測
可視光、X線、ガンマ線
ニュートリノ、重力波

原子核物理 (実験)

不安定原子核の質量、寿命、反応
RIビームファクトリー@理研 (2007-)
2010以降: FAIR (ドイツ), SPIRAL2 (フランス),
FRIB (アメリカ) など

宇宙物理 (理論)

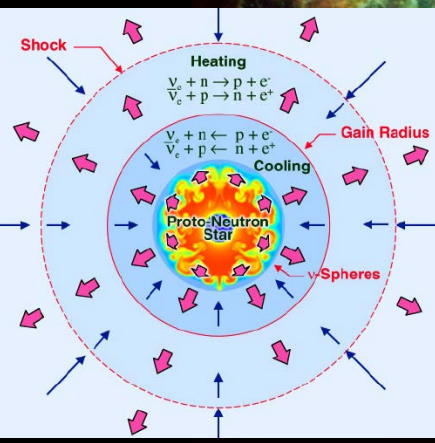
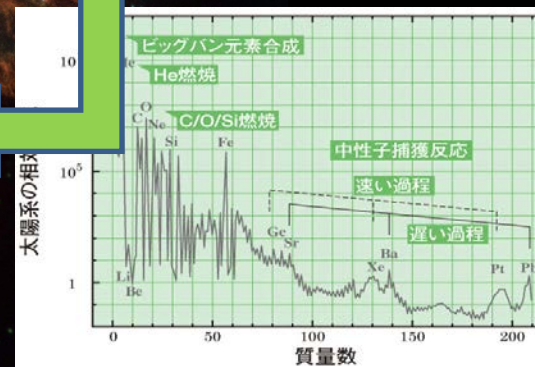
超新星爆発シミュレーション
一般相対論
ニュートリノ輻射流体計算

原子核物理 (理論)

精密原子核計算による核種の性質
反応率の予言

原子核物理 (理論)

大規模核反応ネットワーク
による実時間計算
5000核種以上



超新星爆発と元素の起源

宇宙物理 (観測)

超新星爆発の観測
可視光、X線、ガンマ線
ニュートリノ、重力波

原子核物理 (実験)

不安定原子核の質量、寿命、反応
RIビームファクトリー@理研 (2007-)
2010以降: FAIR (ドイツ), SPIRAL2 (フランス),
FRIB (アメリカ) など

宇宙物理 (理論)

超新星爆発シミュレーション
一般相対論
ニュートリノ輻射流体計算

原子核物理 (理論)

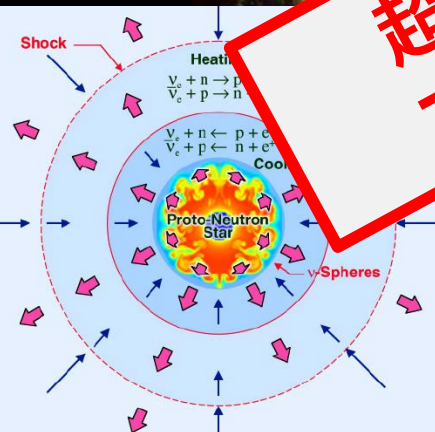
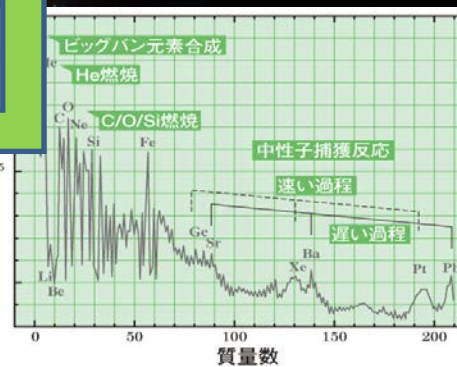
核計算による核種の性質
崩壊率の予言

超新星爆発をおこしてみよう!
7月30、31日(4, 5日目)

原子核物理 (理論)

大規模核反応ネットワーク
による実時間計算
5000核種以上

太陽系の相対

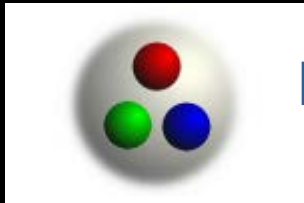


これからの5年

素核宇の連携、計算基礎科学の進展、実験・観測との連携で、
ミクロ(素粒子・原子核)からマクロ(宇宙)への架け橋が
構築されていく

素粒子

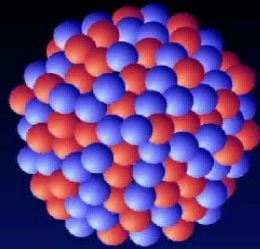
$r < 10^{-13}$ [cm]



大規模
QCD計算

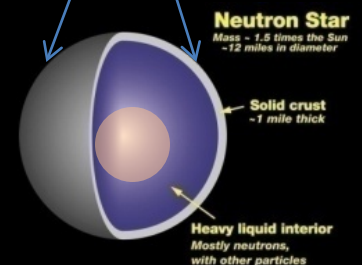
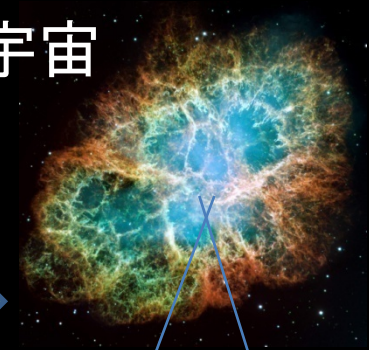
原子核

$r \sim 10^{-12}$ [cm]



精密
原子核計算

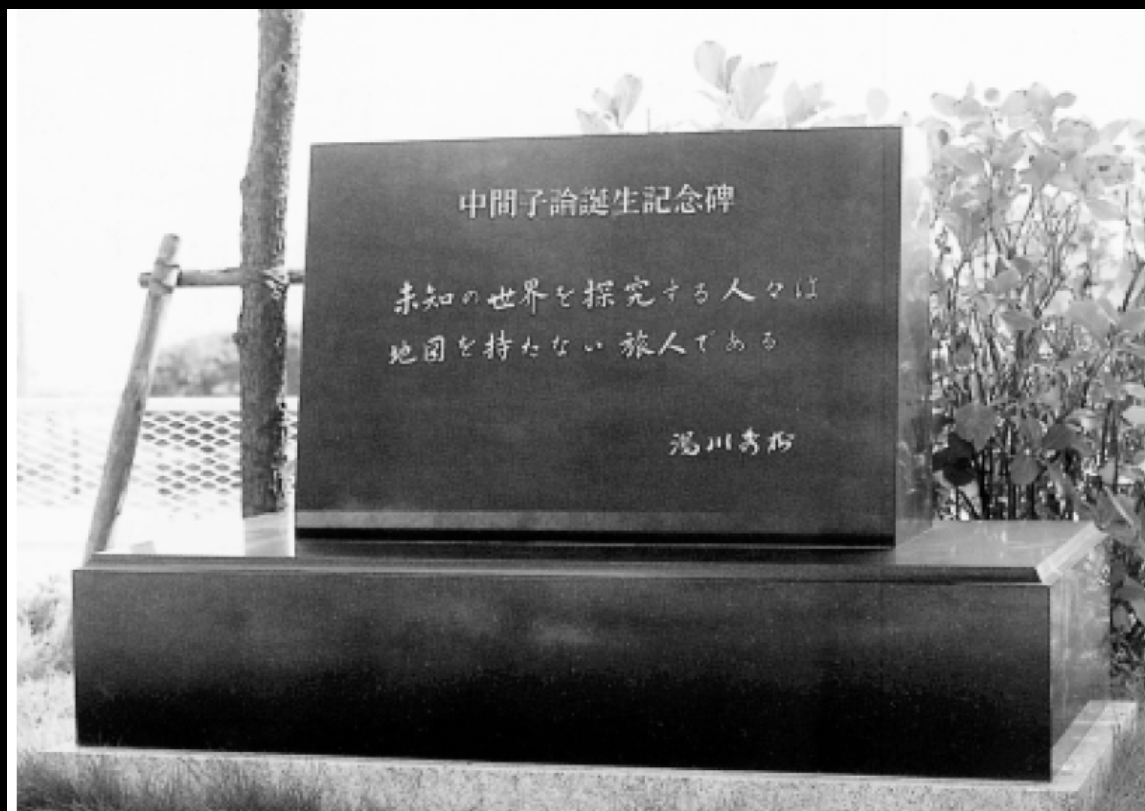
宇宙



3D 超新星爆発
+ 元素合成
シミュレーション

未知の世界を探求する人々は、地図を持たない旅人である

湯川秀樹



湯川秀樹博士記念碑(西宮市立苦楽園小学校校庭)

Enjoy !