

# 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(東大/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)

## 主催

京都大学基礎物理学研究所、  
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」

## 趣旨

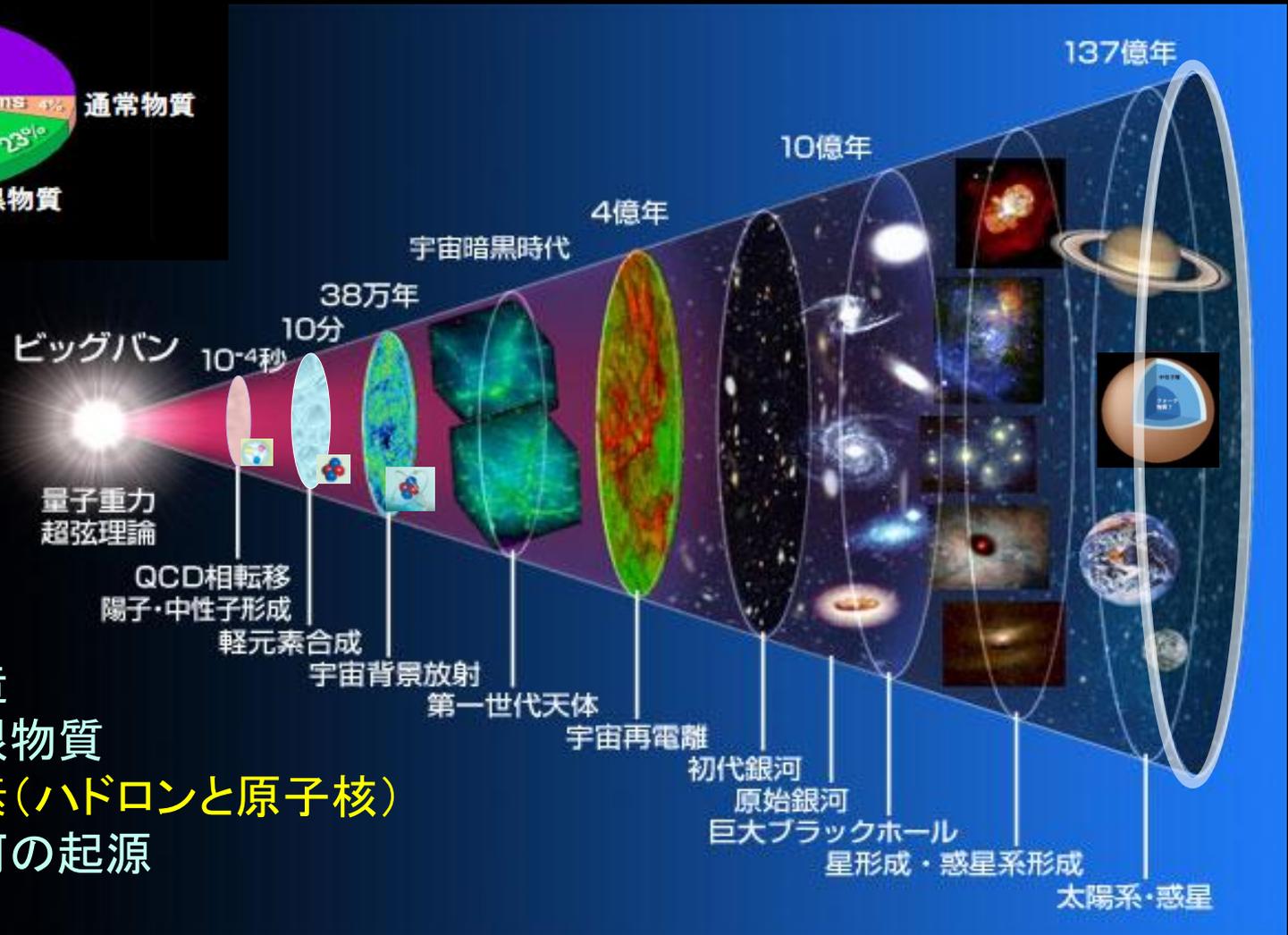
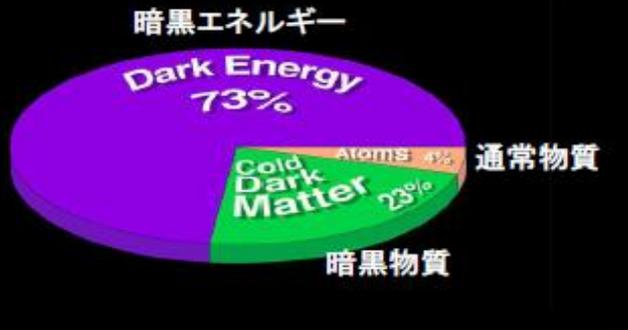
素粒子・原子核・宇宙物理の分野連携を目指した新学術領域研究  
「素核宇宙融合による計算科学に基づいた重層的物質構造の解明」  
(領域代表者・青木慎也、2008年度～2012年度)が進められています。

この新学術領域では、

- ・量子力学に基づくクォークの力学と核力、
- ・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いただくとうとサマースクールを企画しました。

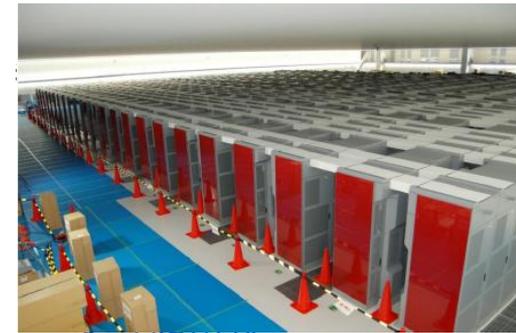
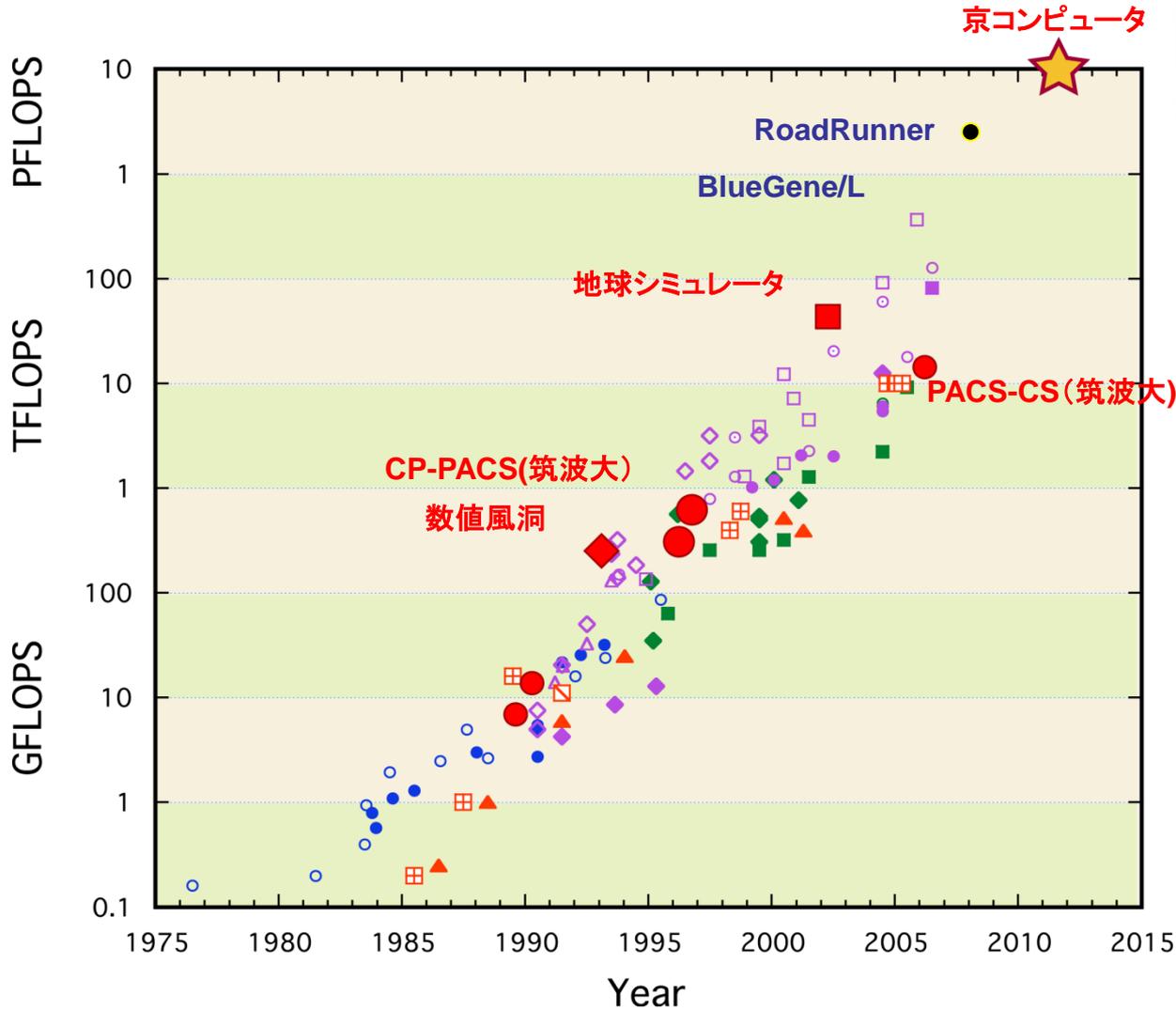
# 物質と宇宙の進化：我々はどこから来てどこへ行くのか？



- 物質の究極構造
- 宇宙初期の極限物質
- 物質の構成要素(ハドロンと原子核)
- 初代天体や銀河の起源
- 重元素の起源
- 爆発的天体現象と極限物質

# スーパーコンピュータの高速化動向

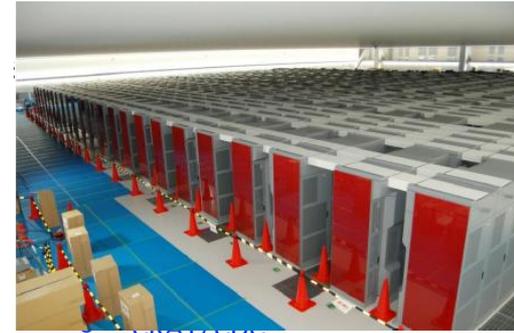
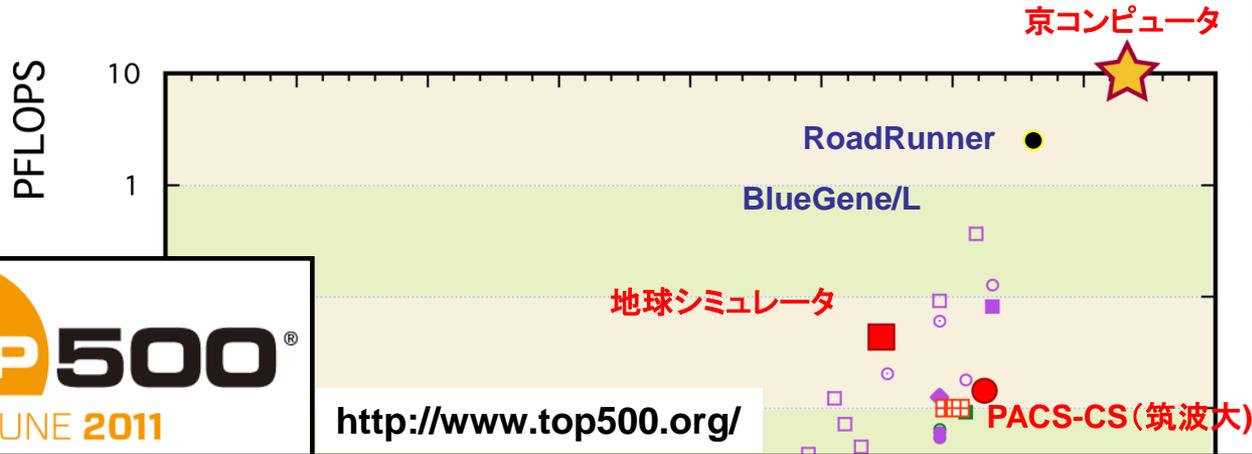
30年で100万倍



- Hitachi/Fujitsu/NEC
- ベクトル並列計算機
  - ◆ Fujitsu
  - NEC
  - CRAY
- 並列計算機
  - CRAY
  - IBM
  - ◇ Intel
  - △ TMC
  - other
  - ◆ Fujitsu
  - Hitschi
  - NEC/Sun
- プロジェクトマシン
  - Tsukuba
  - 田 Columbia
  - ▲ APE
  - 田 GF11 (IBM)

# スーパーコンピュータの高速化動向

30年で100万倍



● Hitachi/Fujitsu/NEC

ベクトル並列計算機

◆ Fujitsu

■ NEC

○ CRAY



<http://www.top500.org/>

	NAME/MANUFACTURER/COMPUTER	LOCATION	COUNTRY	CORES	$R_{max}$ P flop/s
1	<b>K Computer</b> SPARC64 VIIIfx 2.0GHz, Tofu interconnect	RIKEN	Japan	548,352	8.16
2	<b>Tianhe-1A</b> 6-core Intel X5670 2.93 GHz + Nvidia M2050 GPU w/custom interconnect	NUDT/NSCC/Tianjin	China	186,368	2.56
3	<b>Jaguar</b> Cray XT-5 6-core AMD 2.6 GHz w/custom interconnect	DOE/SC/ORNL	USA	224,162	1.76
4	<b>Nebulae</b> Dawning TC3600 Blade Intel X5650 2.67 GHz, NVidia Tesla C2050 GPU w/Iband	NSCS	China	120,640	1.27
5	<b>Tsubame 2.0</b> HP Proliant SL390s G7 nodes (Xeon X5670 2.93GHz), NVIDIA Tesla M2050 GPU w/Iband	TITech	Japan	73,278	1.19

# 計算科学研究機構(AICS) 理研

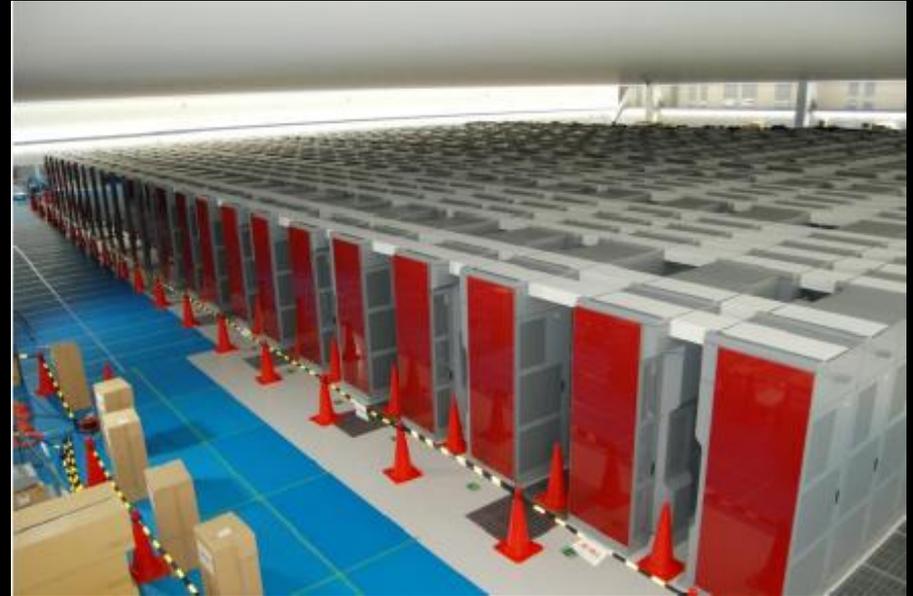
8 Pflops (June 2011), 10 Pflops (in 2012)

<http://www.nsc.riken.jp/index-eng.html>

AICS @ 神戸



K(京) computer



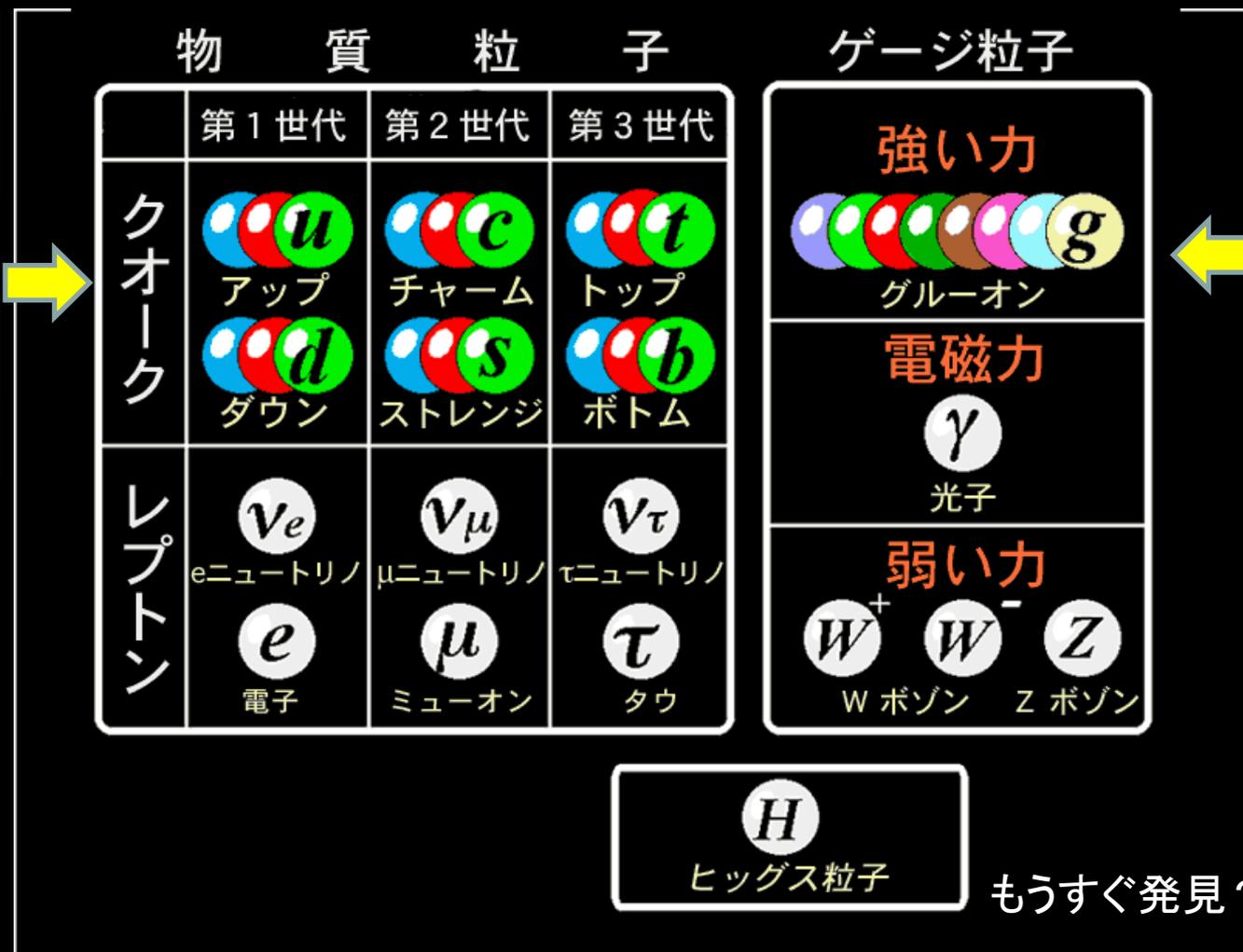
## 戦略5分野

1. Life and Medicine
2. New materials
3. Environment
4. Engineering
5. Particle, nuclear and astrophysics

# ”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)

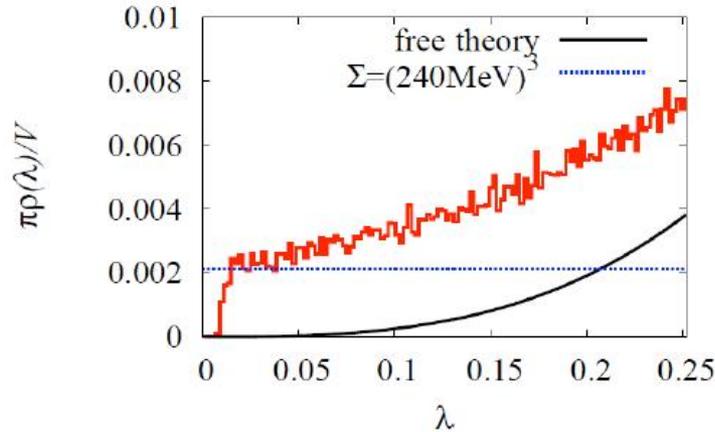


# 素粒子物理と計算科学

- 自発的対称性の破れと南部理論



南部陽一郎博士

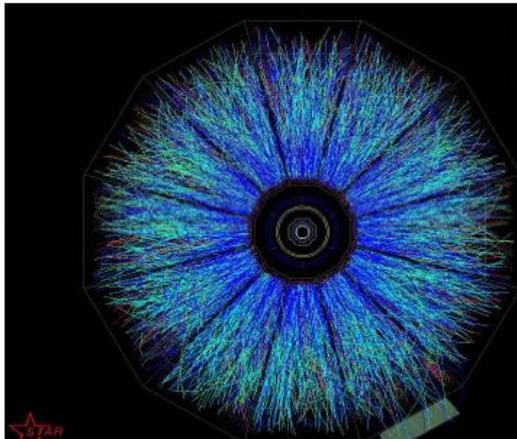


格子QCDによる対称性の破れの証明

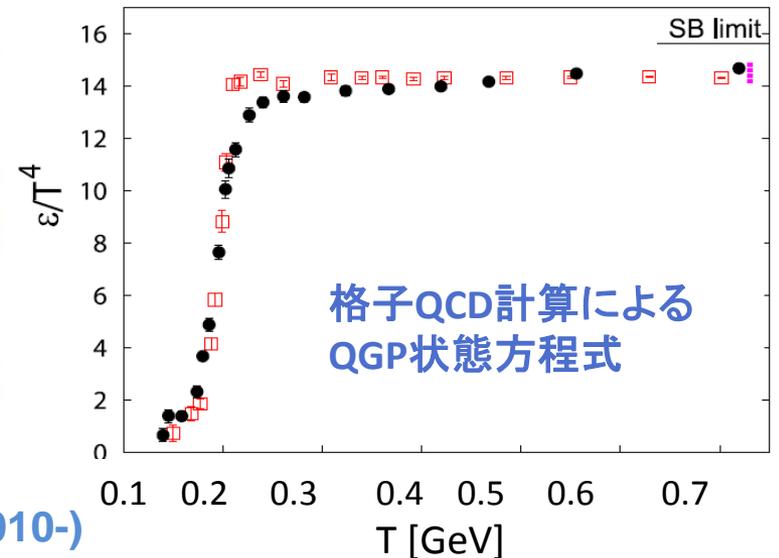


Higgs粒子探索(LHC, 2009-)

- 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

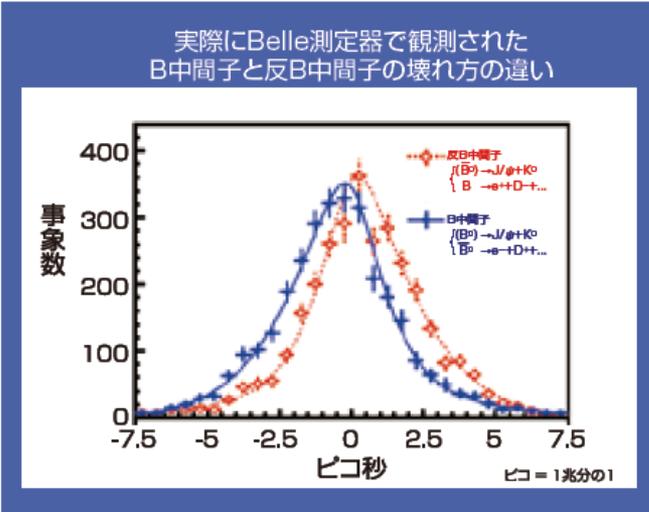


高エネルギー重イオン衝突実験(RHIC, 2000-)(LHC 2010-)



● 素粒子の精密実験と小林・益川理論

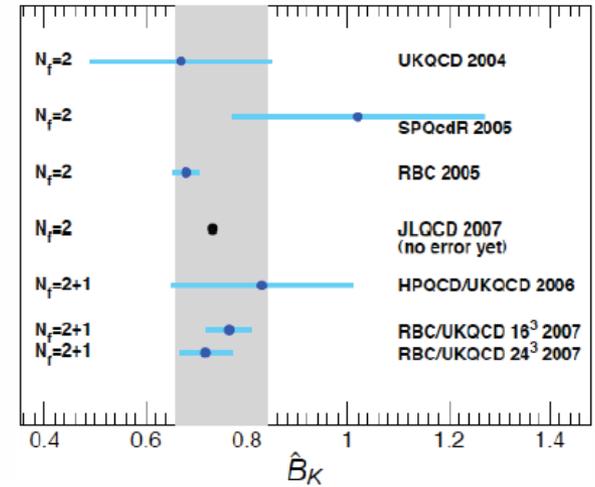
Grey band is constraint on  $\hat{B}_K$  assuming CKM-unity (*UTfit web site*)



小林博士



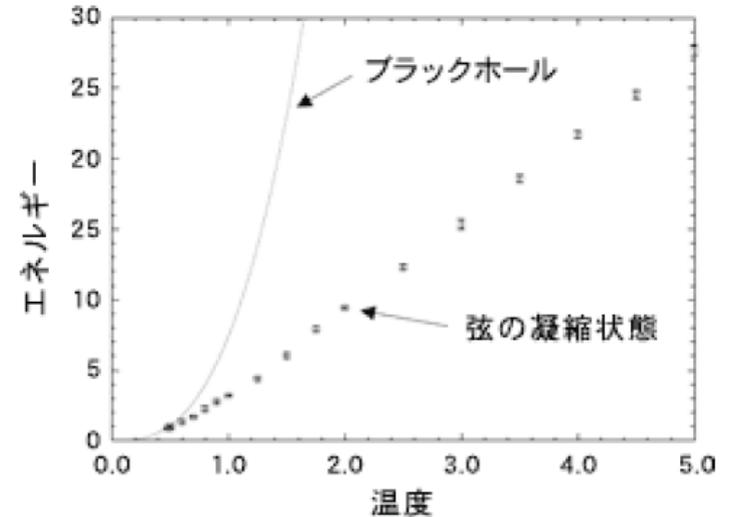
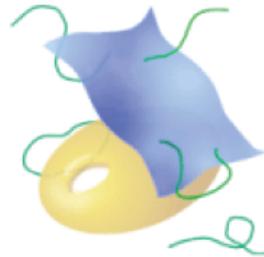
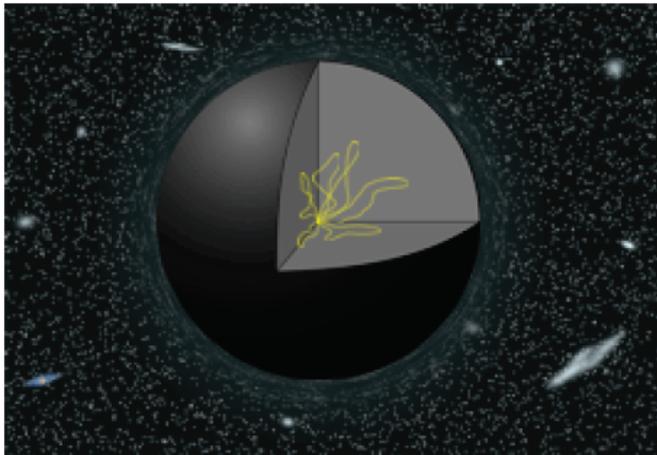
益川博士



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

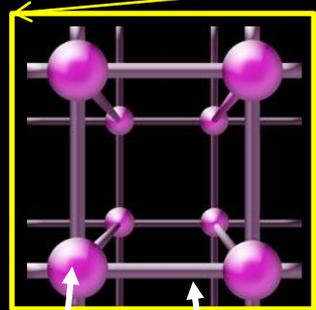
● 超対称性と超弦理論：究極理論へのチャレンジ



超弦理論によるブラックホールの内部構造

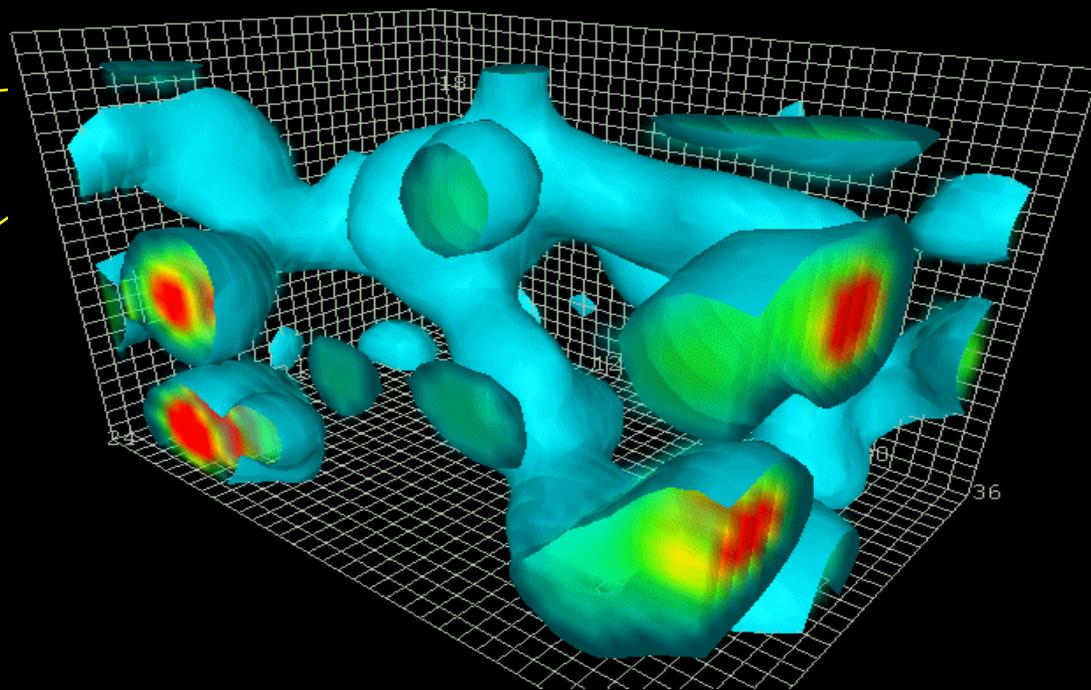
その数値計算

# 格子QCDによる物質構造



クォーク  $q(n)$

グルーオン  $U_\mu(n)$



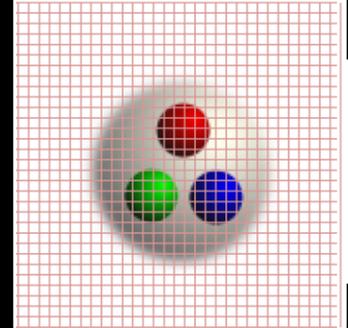
$$\langle O \rangle = \frac{1}{Z} \int_V [dU] e^{-S_g(U)} \cdot \det F(U, m) \cdot Q(U, m)$$

- 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



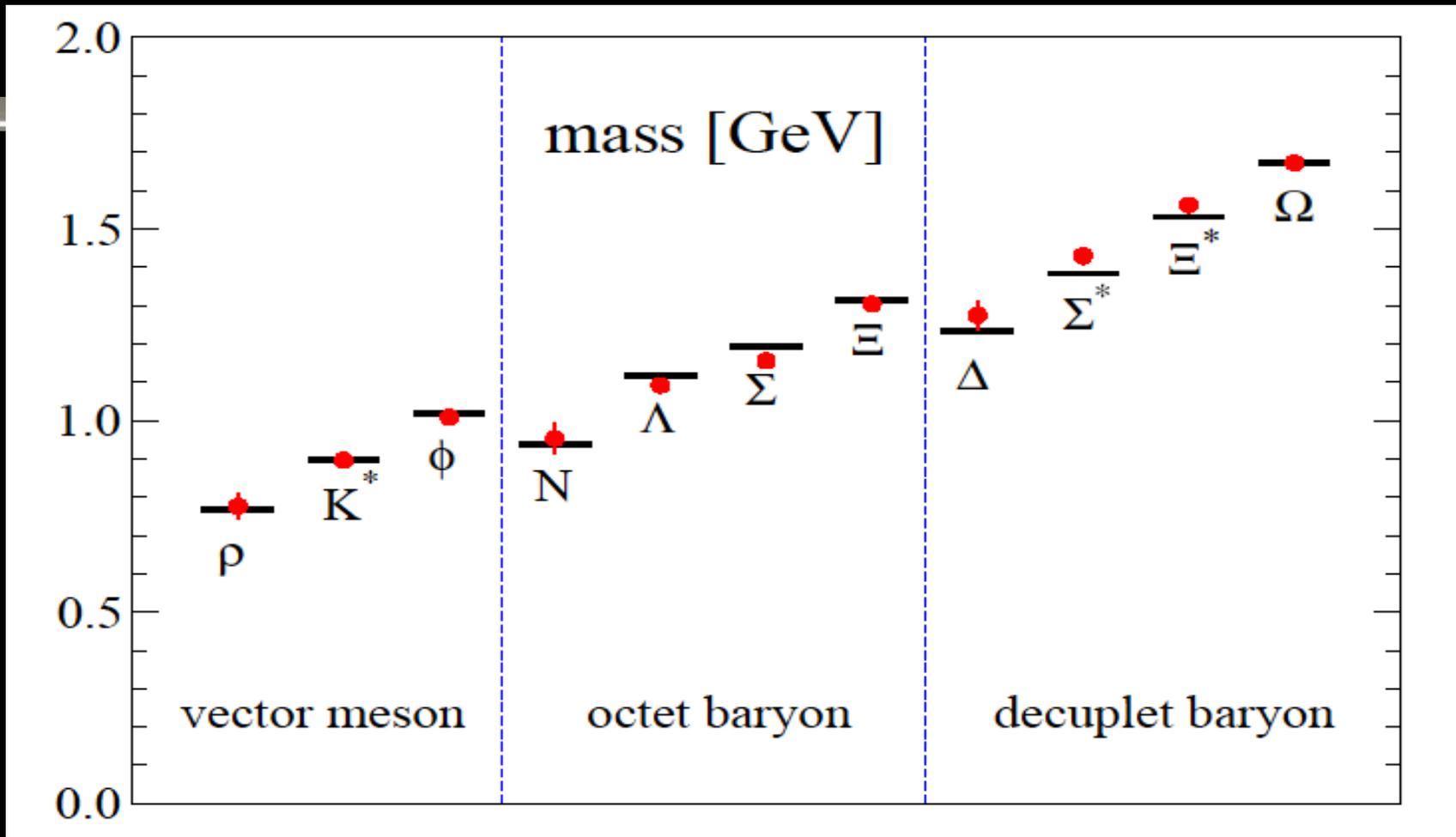
数値シミュレーション

# 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

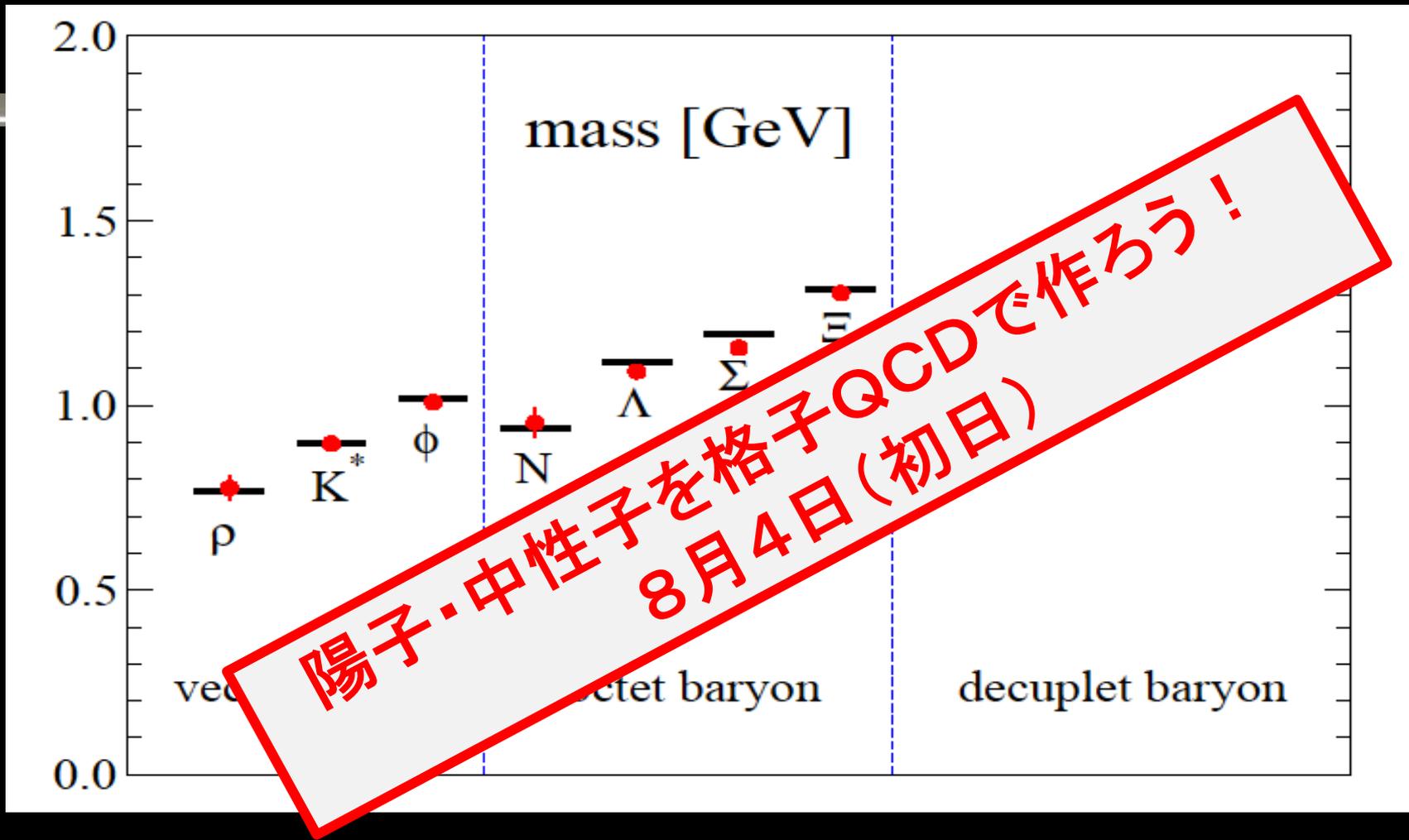
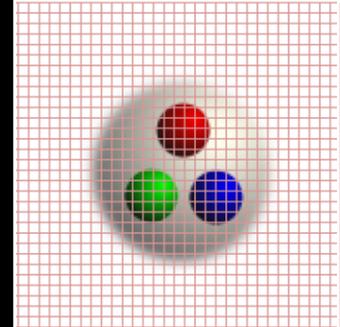
最も軽い $\pi$  中間子質量  $m_\pi = 156$  MeV



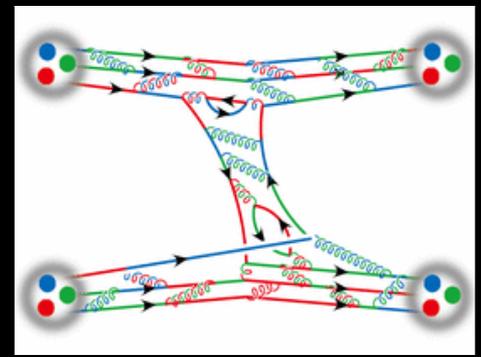
# 格子QCDによるハドロン質量の計算

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 $\pi$  中間子質量  $m_\pi = 156$  MeV



# 核力とハイペロン力

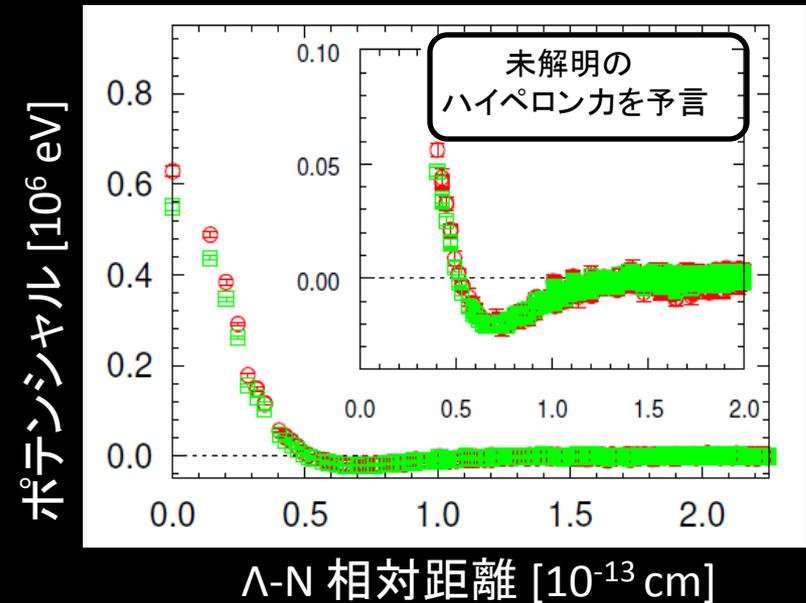
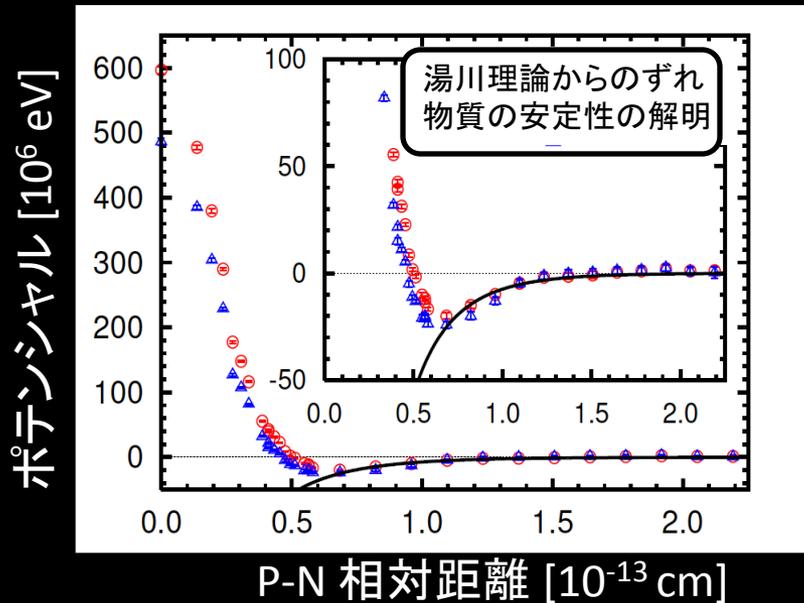


1935年 湯川秀樹博士による核力の中間子論の提唱

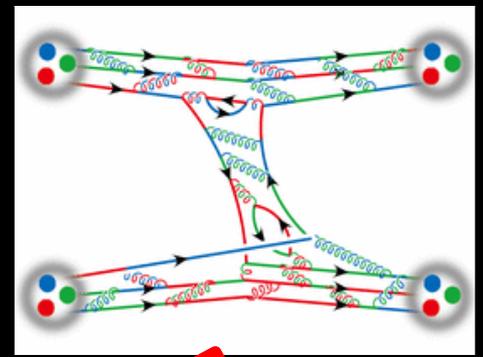
1965年 南部陽一郎博士によるQCD(量子色力学)の提唱

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

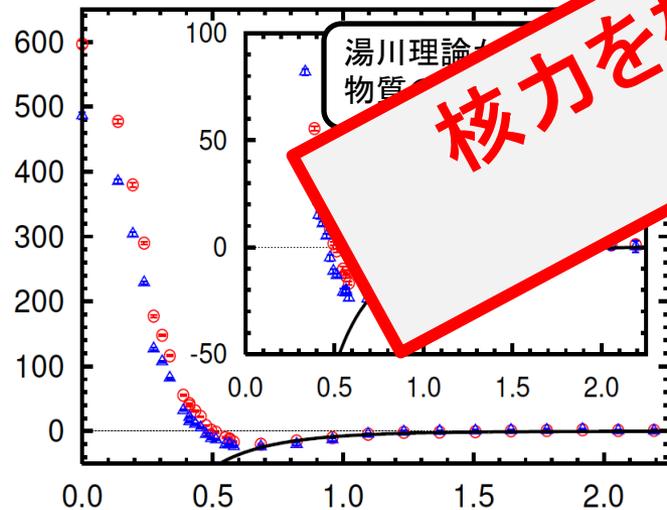
1997年 南部陽一郎 “クォーク” 第2版 より

“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で解き出す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**

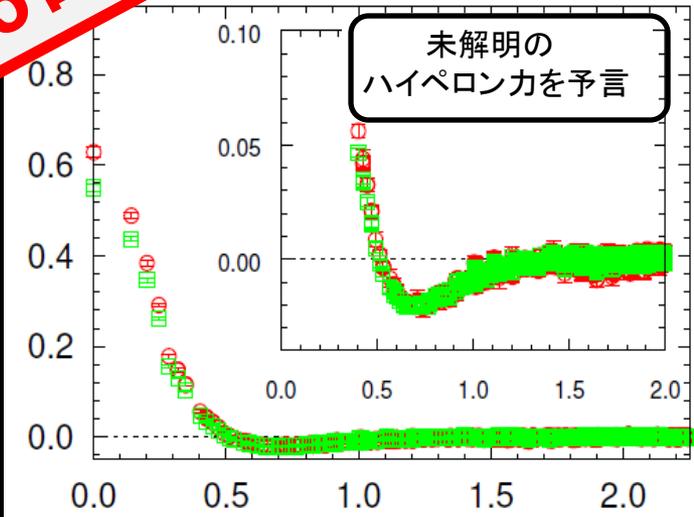
**核力を格子QCDで計算しよう**  
**8月5日(2日目)**

ポテンシャル [ $10^6$  eV]



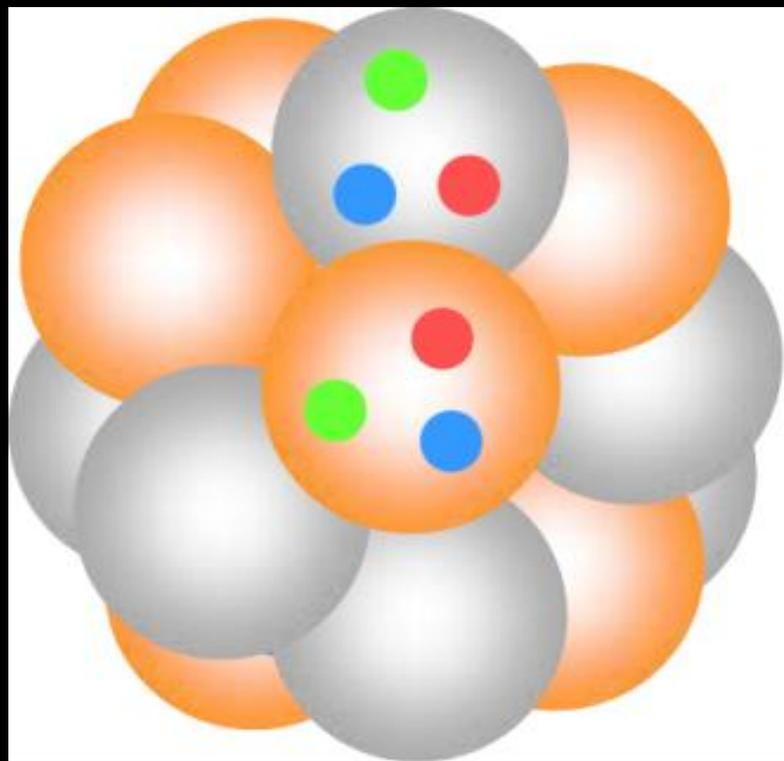
P-N 相対距離 [ $10^{-13}$  cm]

ポテンシャル [ $10^6$  eV]

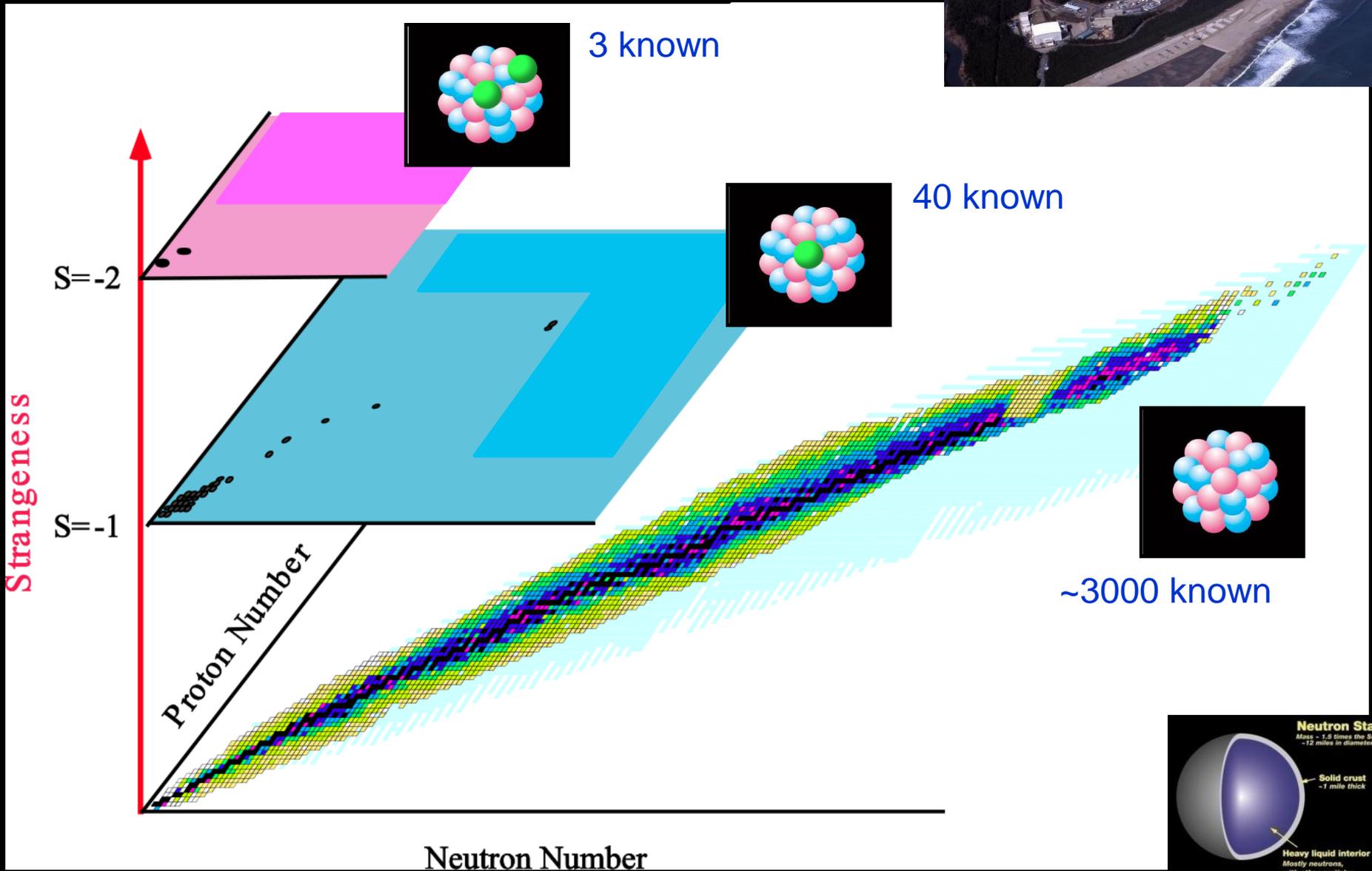


$\Lambda$ -N 相対距離 [ $10^{-13}$  cm]

# 原子核

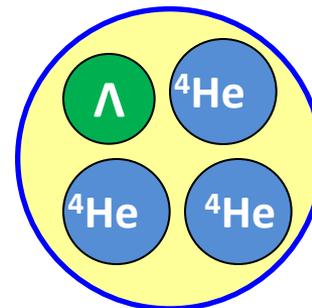


# 3次元核図表



# 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

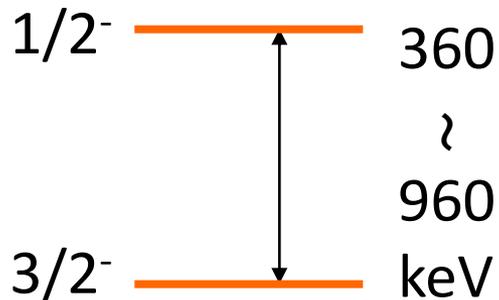
$^{13}_{\Lambda}\text{C}$  炭素のハイパー同位体



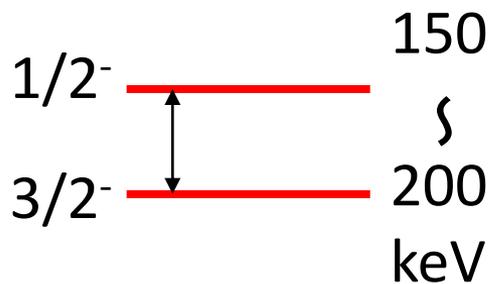
未知のハイペロン核以外の不定性を  
精密計算(無限小ガウスローブ法)で排除



精密計算の予言

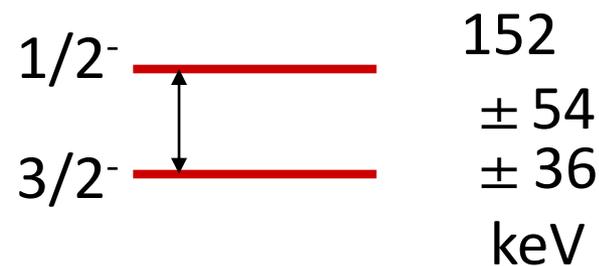


ハイペロン核  
モデルA

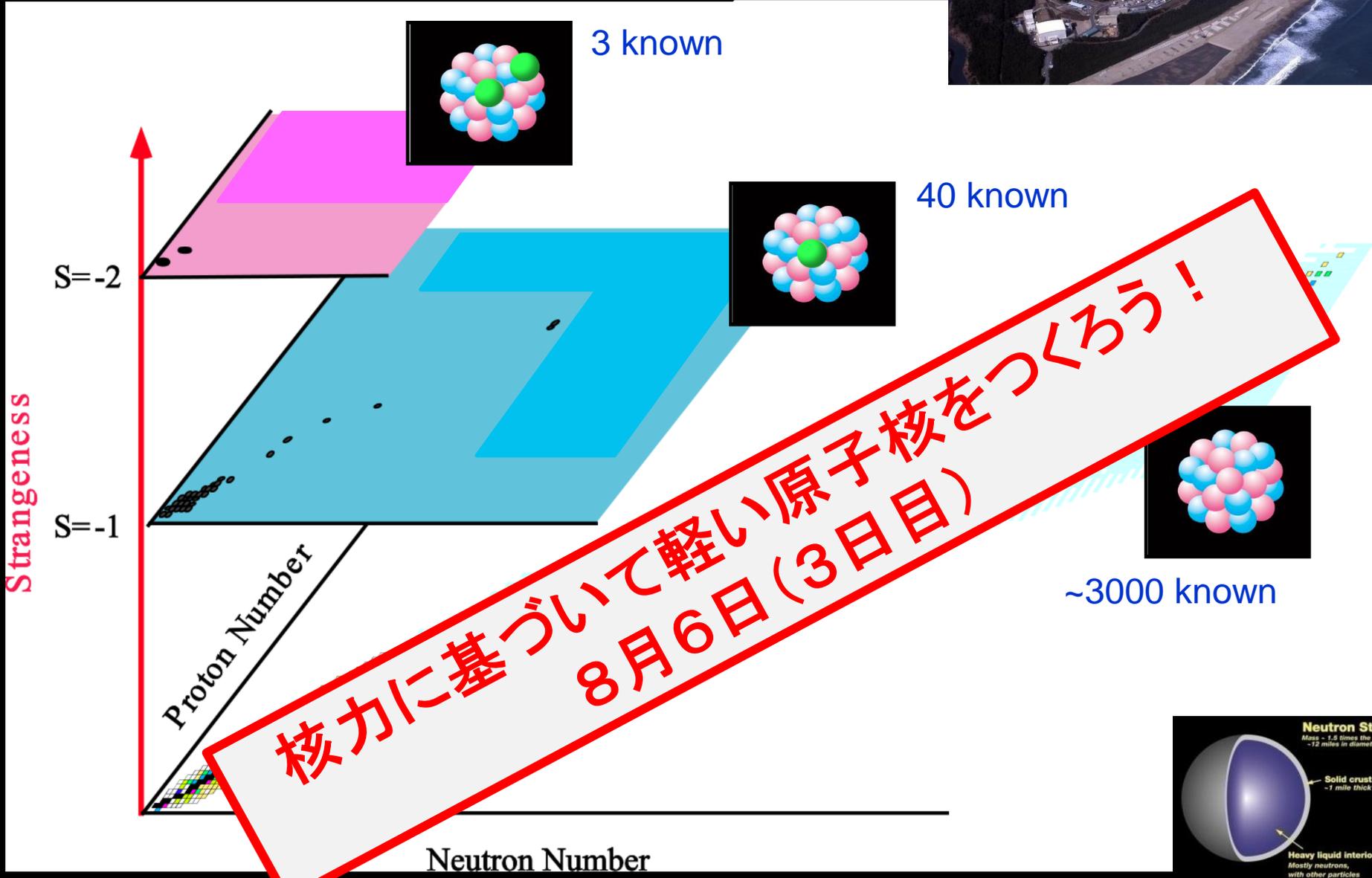


ハイペロン核  
モデルB

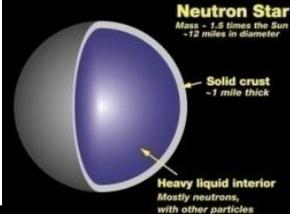
後の実験結果(BNL-E929)



# 3次元核図表



核力に基づいて軽い原子核をつくらう!  
8月6日(3日目)



# 中性子星

半径  $\sim 10$  km

重さ  $\sim$  太陽

中心密度  $\sim 10^{12}$  kg/cm<sup>3</sup>

## 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)

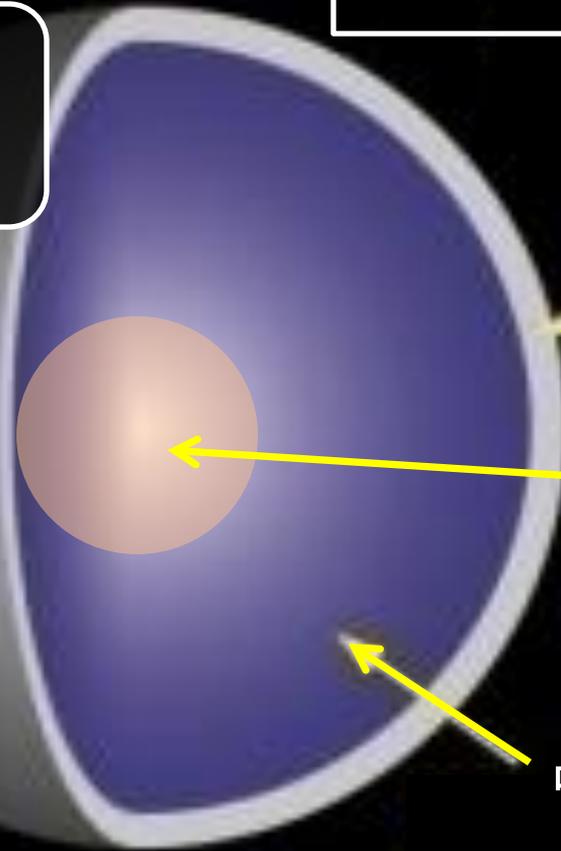
少数量子系厳密計算  
高密度状態方程式

## 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



固体

未知の状態:  
ハイペロン物質?  
クォーク物質?

中性子の液体

# 中性子星

半径  $\sim 10$  km

重さ  $\sim$  太陽

中心密度  $\sim 10^{12}$  kg/cm<sup>3</sup>

## 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!  
8月7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

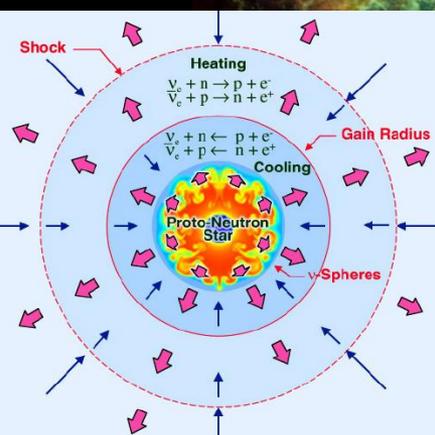
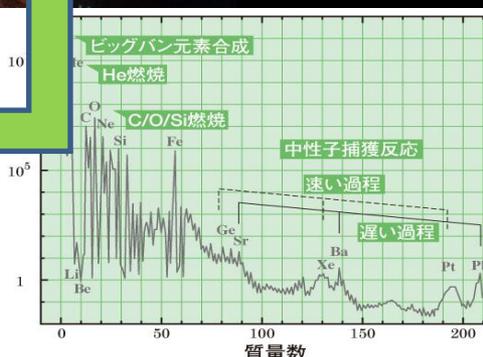
## 原子核物理 (理論)

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

太陽系の相対



# 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)

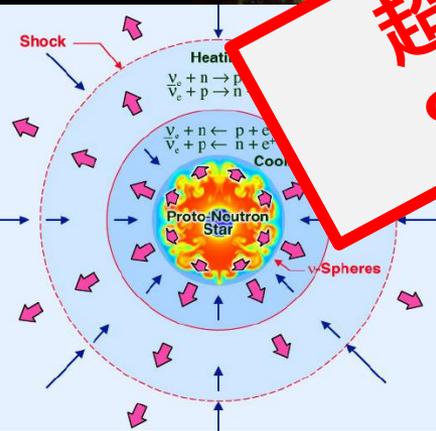
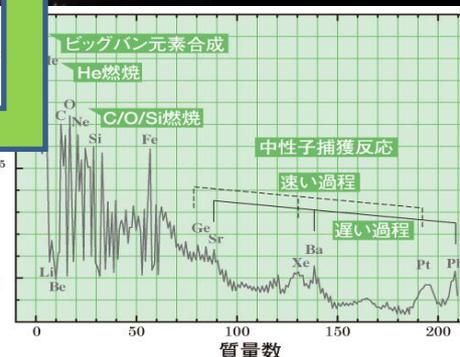
核計算による核種の性質  
崩壊率の予言

超新星爆発をおこしてみよう!  
8月7、8日 (4, 5日目)

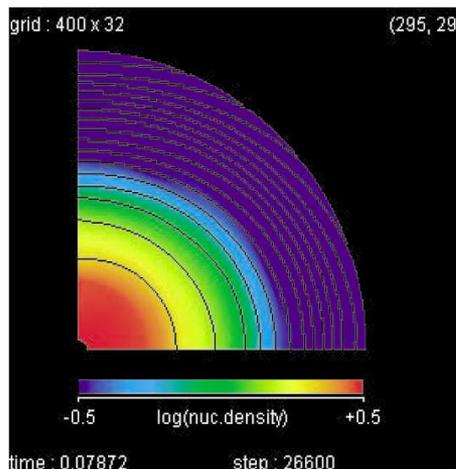
## 原子核物理 (理論)

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

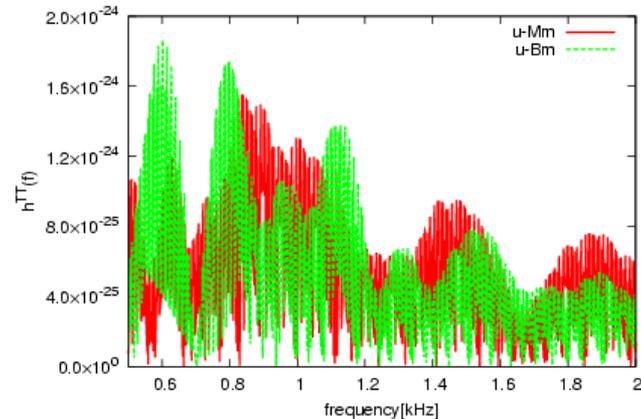
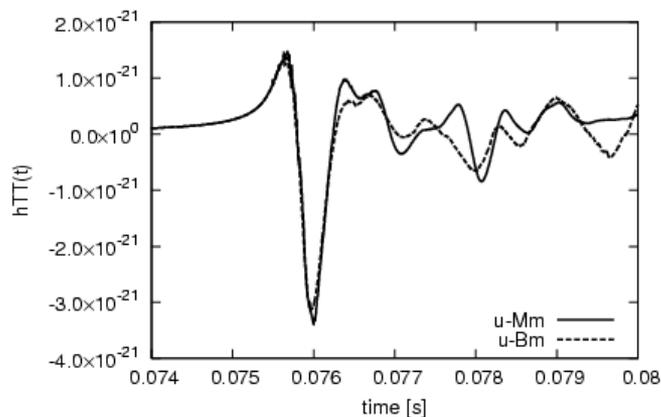
太陽系の相対



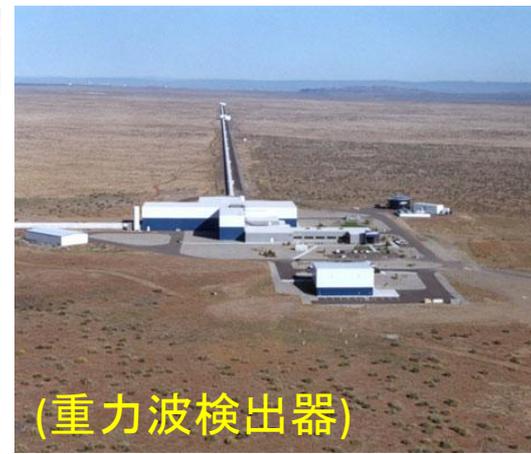
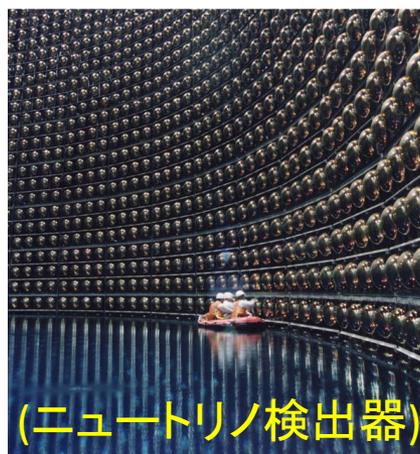
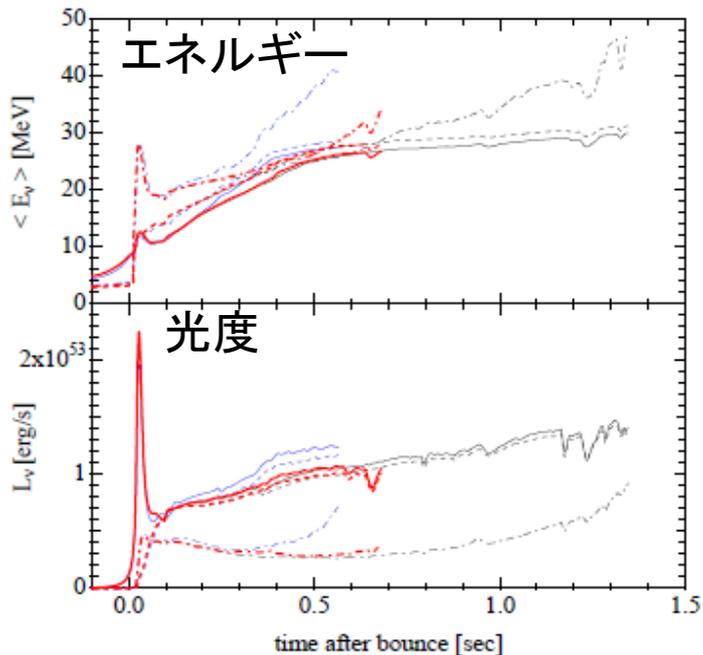
# ニュートリノ/重力波 核物理学 (大規模シミュレーション<->観測)



## 超新星爆発時の重力波の計算 (波形とスペクトル)



## ブラックホール形成時のニュートリノ放出の計算

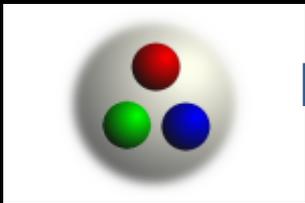


これからの5年

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

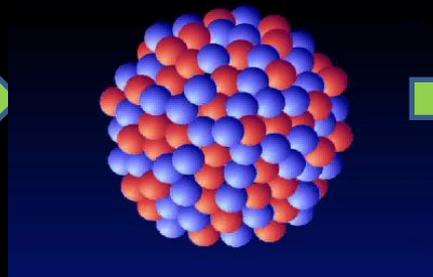
$r < 10^{-13}$  [cm]



大規模  
QCD計算

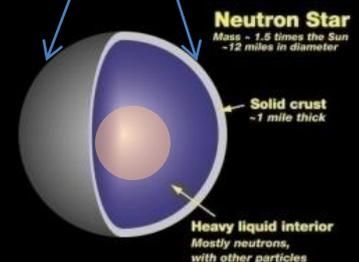
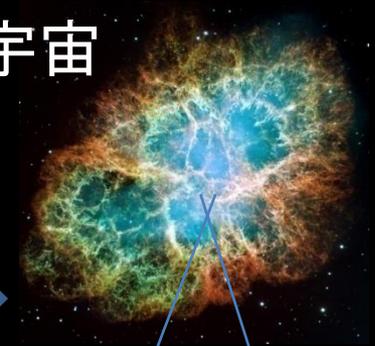
原子核

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

Enjoy !