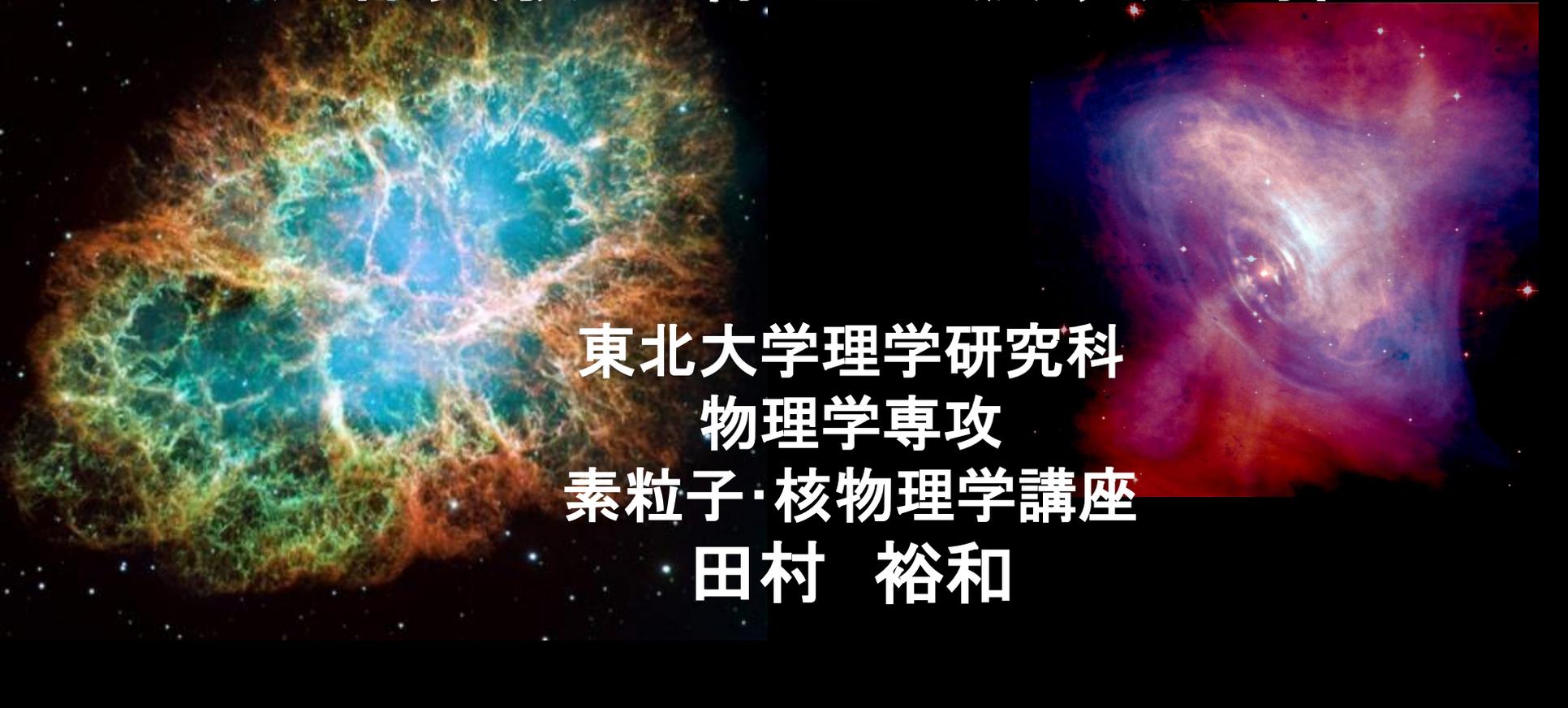


日本物理学会 科学セミナー
「宇宙における物質の起源と進化」
2013.8.22-23, 東京大学小柴ホール

中性子星の奇妙な物質

— 加速器実験とX線・重力波観測で探る —



東北大学理学研究科
物理学専攻
素粒子・核物理学講座
田村 裕和

中性子星の奇妙な物質

— 加速器実験とX線・重力波観測で探る —

1. 中性子星とは
2. 加速器実験で中性子星内部を調べる
(中性子過剰核とハイパー核)
3. 天体観測で中性子星内部を調べる
(X線と重力波)
4. 終わりに



1. 中性子星とは

超新星残骸カシオペアAと、その中心にある中性子星(NASA)

KEK HPより

ビッグバン



宇宙での物質進化の最終形

星の一生 (復習)



NASA

ブラックホール



Wikipwdia より

中性子星



NASA

星間ガス



原始星

$M > 20 M_{\odot}$

$M \sim 8-20 M_{\odot}$

物質進化の“輪廻”

超新星残骸

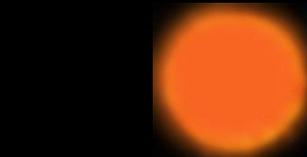


超新星爆発

赤色超巨星



TO 4492

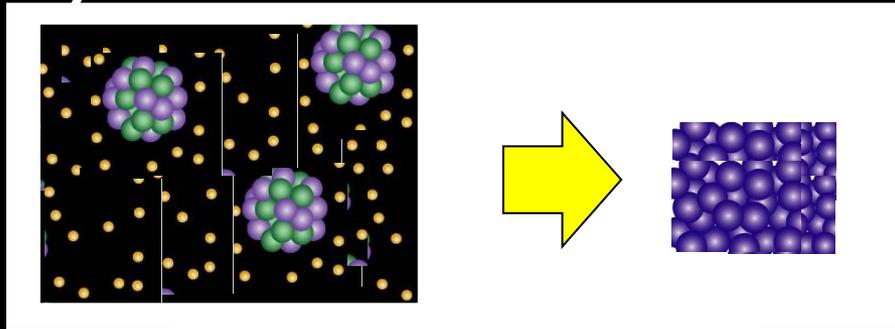
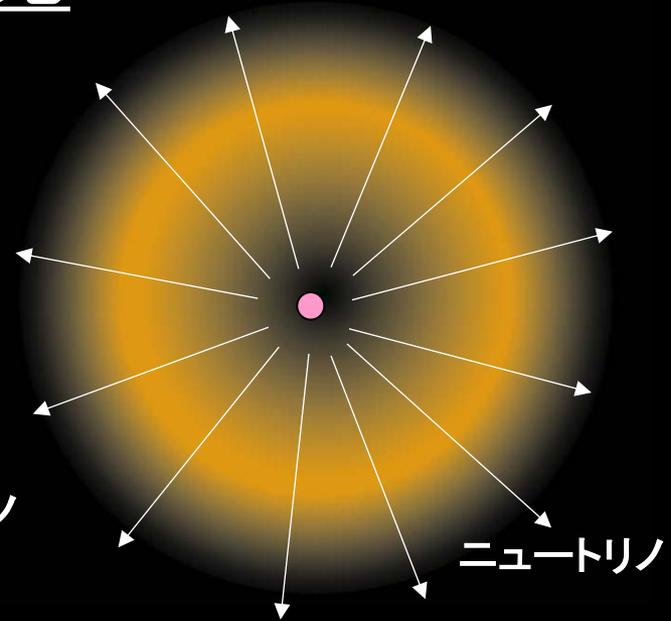
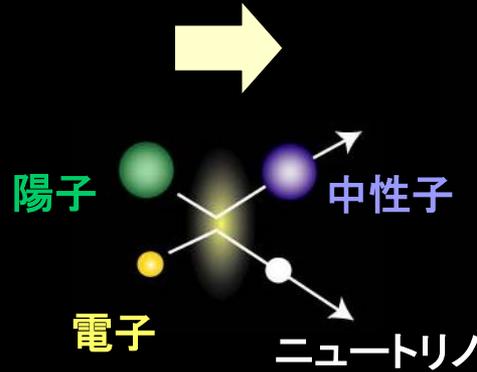
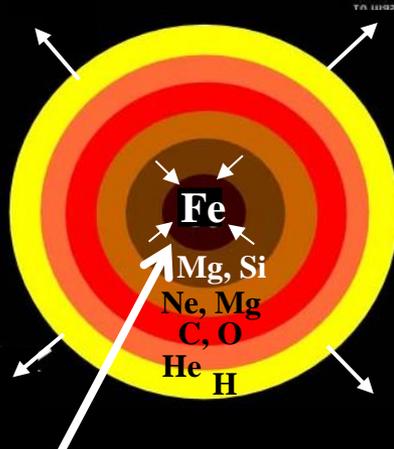


恒星 (主系列星)



超新星爆発

赤色超巨星



圧縮で12桁の密度上昇

量子力学の不確定性関係 $\Delta p \Delta x \sim h$
電子は、核子に比べて $E = p^2/2m$ も m も小さい
→ p が非常に小さい → Δx (占有空間) が大きい

カシオペアA

超新星残骸



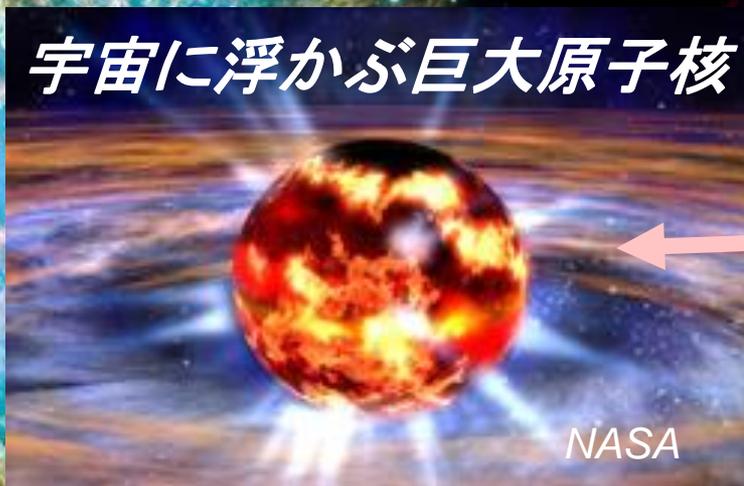
中性子星

中性子星とは？

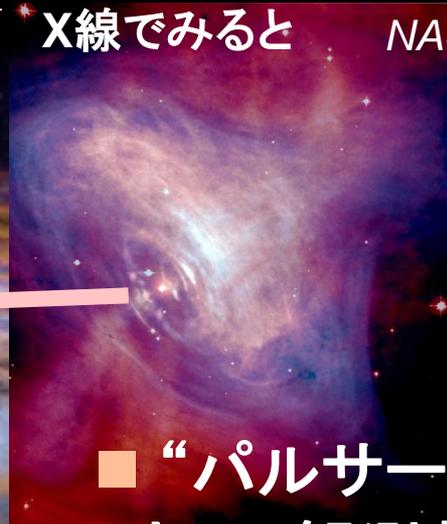
かに星雲
(かに座超新星残骸)
藤原定家「明月記」1054年爆発

可視光で見ると

宇宙に浮かぶ巨大原子核



X線で見ると NASA



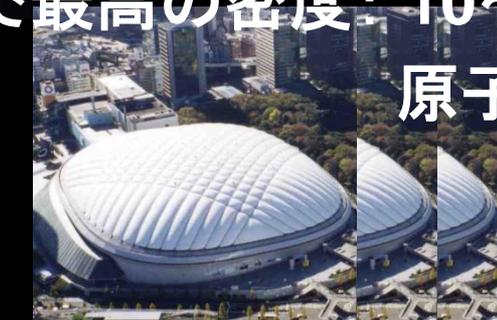
■ “パルサー”
として観測される

■ 質量：太陽の1~2倍

■ 宇宙で最高の密度：10~30億トン/cm³

原子核密度の数倍

■ 半径：約10~15 km



東京ドーム2000杯分の土を角砂糖1個の大きさに圧縮

NASA

中性子星の発見

1933年 理論的に予測 (ツビッキー、バーデ)

1967年 「パルサー」発見 (ベル、ヒューイッシュ)

電波 (80MHz) で正確な周期的パルス ($T=1.337301$ 秒) を観測

ヒューイッシュはノーベル賞



PSR1919+21



アンテナのアレイ
(電波望遠鏡)

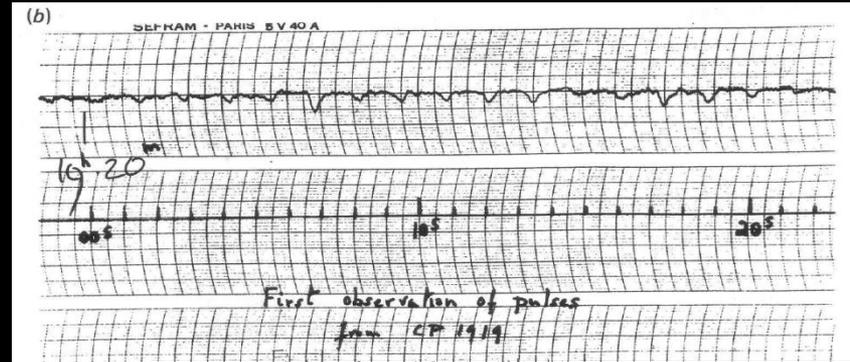
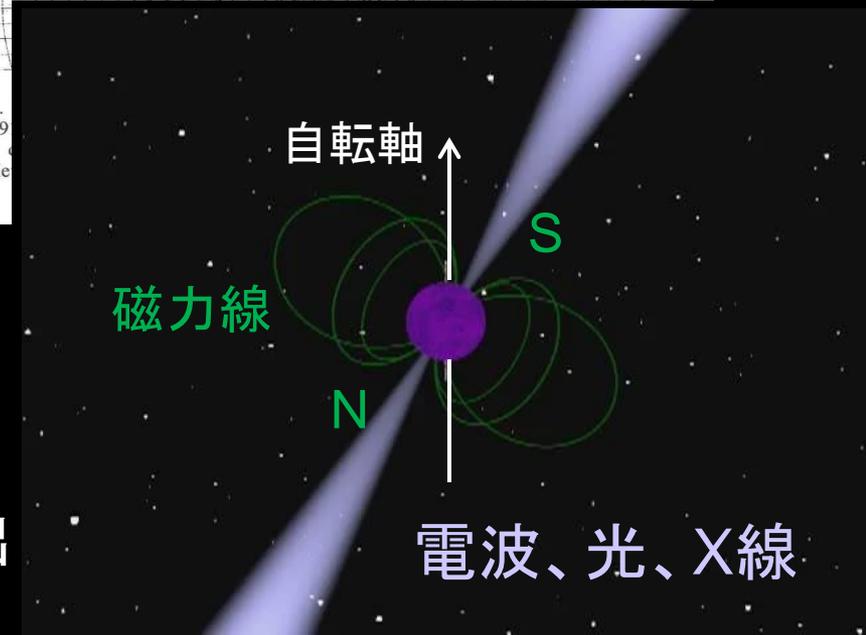


Fig. 1.1.
PSR B1919+21
(b) Fast
trace (He



宇宙人からの信号？

→ 高速で自転する中性子星が放出

電波、光、X線

「中性子星」は中性子だけでできている？



地上実験、天体観測、理論を武器に
調べよう！



皮と中身が違うかも？

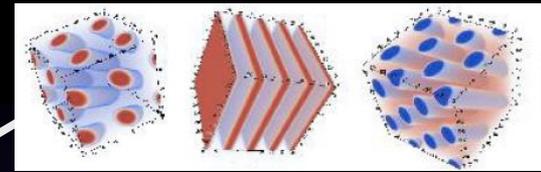


変なものはいっているかも？

up 0.003 (~0.3)	charm 1.3 (1.5)	top 172
down 0.005 (~0.3)	strange 0.1 (~0.5)	bottom 5

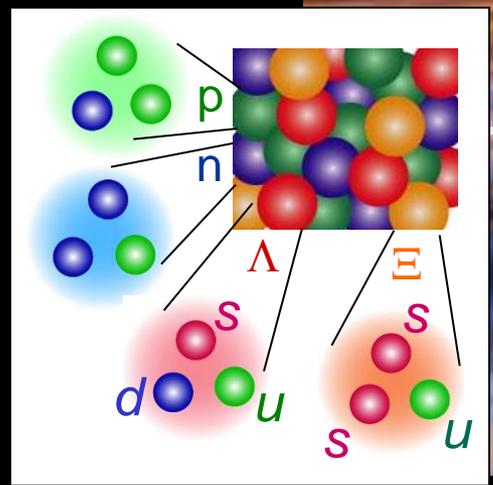
中性子星内部の 未知物質(予想)

[地殻] パスタ原子核



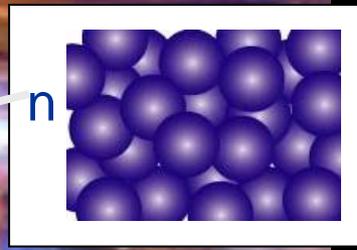
原子核と中性子物質が
さまざまな形で混在

内核には、3番目のクォーク
(ストレンジ・クォーク)が
安定に存在するらしい。



[内核] ストレンジ核物質 ?

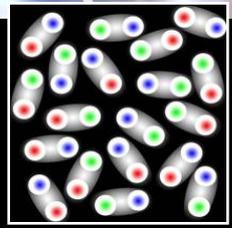
3種のクォーク (u,d,s) からなる粒子
(陽子、中性子、ラムダ、グザイなど)
が高密度に集まった物質



[外核] 中性子物質

ほとんど中性子だけで
できた物質
超流動状態か

中性子星の
想像図: NASA



[中心部] ストレンジ・クォーク物質

3種のクォークが
ばらばらになった物質
超伝導状態となっている ??

人類が知らなかった (太陽系に存在しない) まったく新しい姿の物質たち



理研RIBームファクトリー
超伝導サイクロトロン
(埼玉県和光)

2. 加速器実験で 中性子星内部を調べる (中性子過剰核とハイパー核)



大強度陽子加速器 J-PARC(茨城県東海)

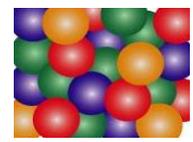
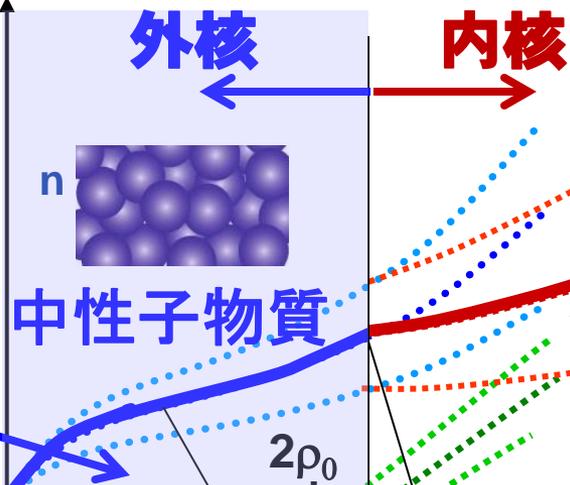
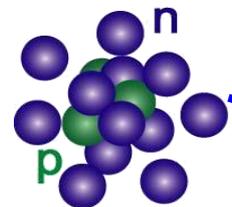
実験室で

中性子星の“硬さ”「核物質の状態方程式」を調べる

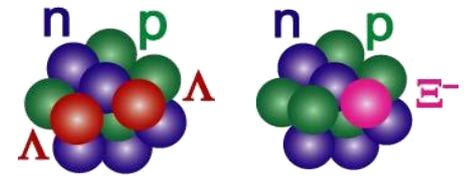
粒子あたりのエネルギー E vs 密度 ρ

密度 粒子存在比 $E = F(\rho, (n_n, n_p, n_\Lambda, \dots), T \sim 0)$

中性子過剰核

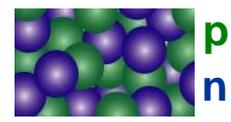


ストレンジ物質

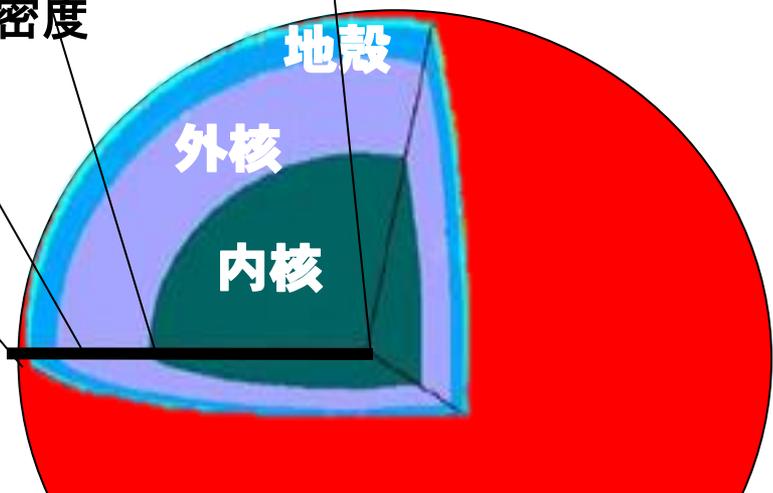


ハイパー核

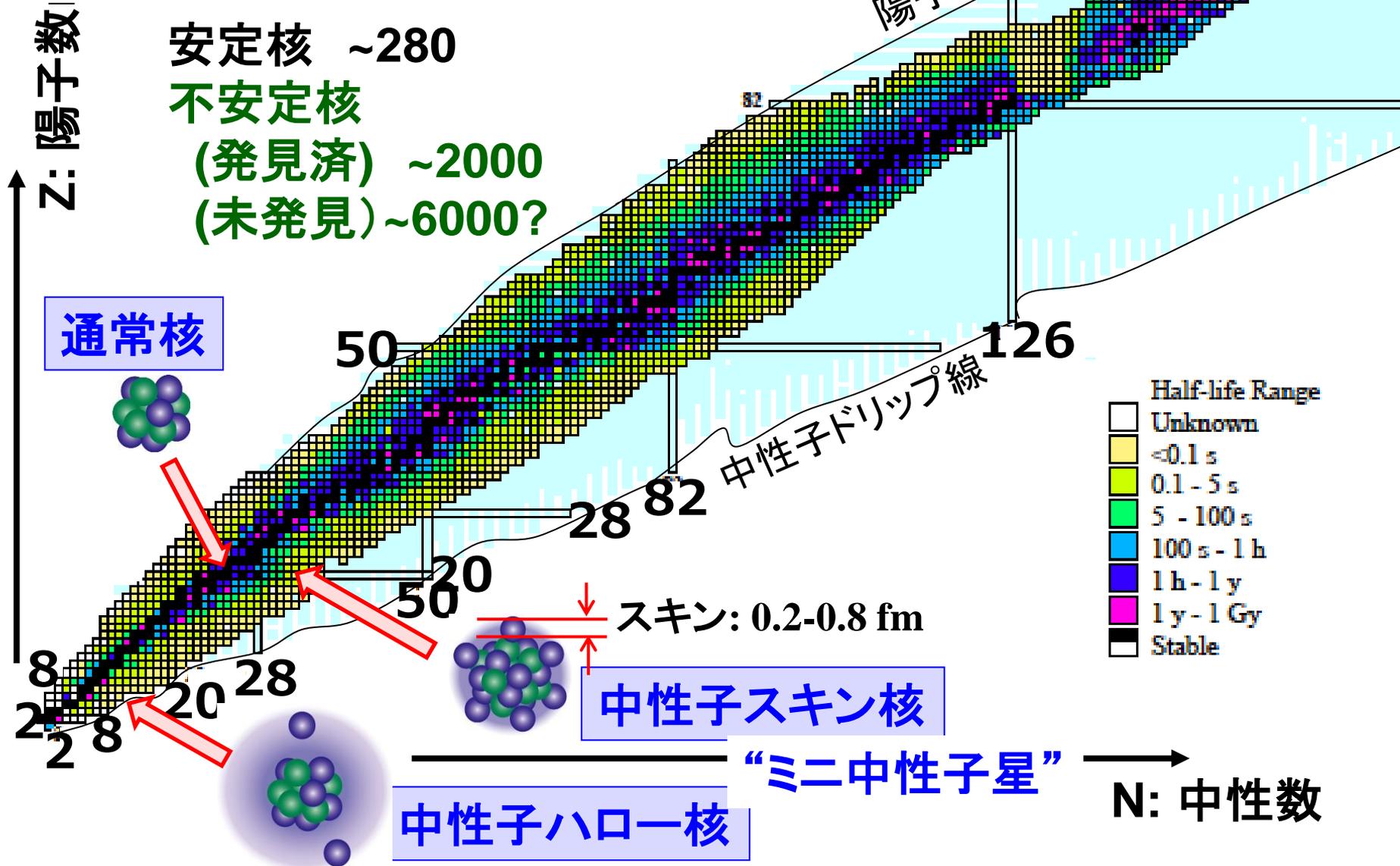
対称核物質



通常核



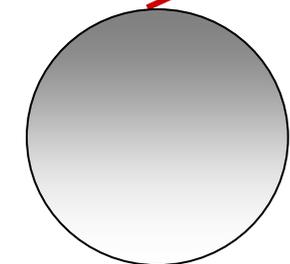
核図表と中性子過剰核



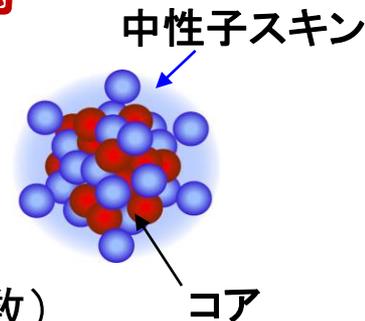
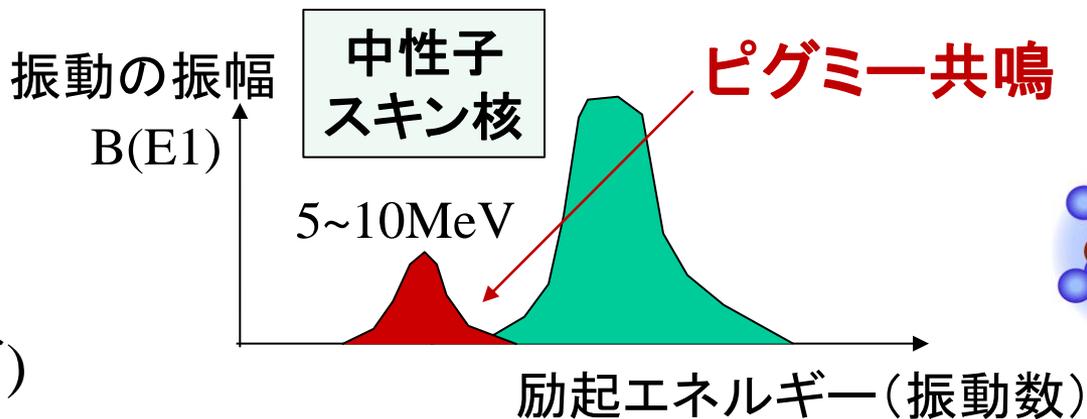
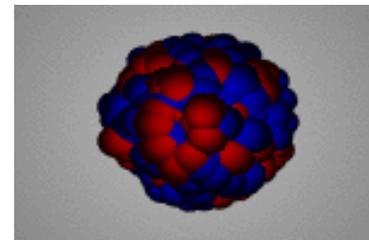
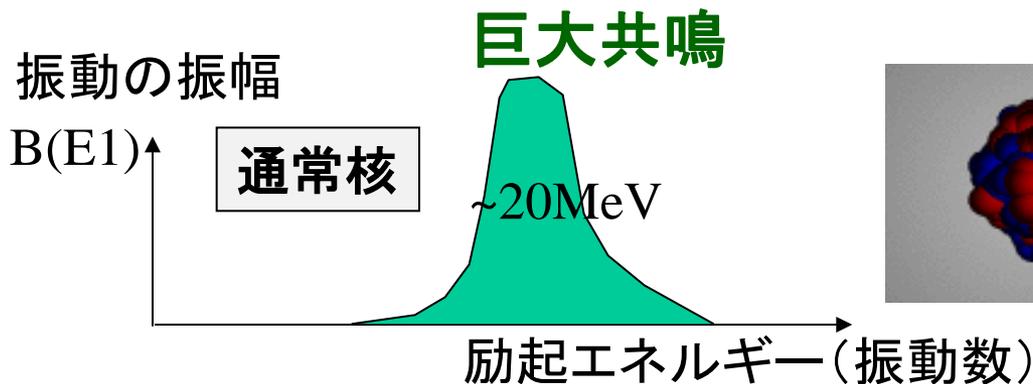
中性子スキン核の振動



強い電場 (光子)



重い核 (Pbなど)



ピグミー共鳴:強い → 中性子スキン:厚い → 中性子物質:硬い

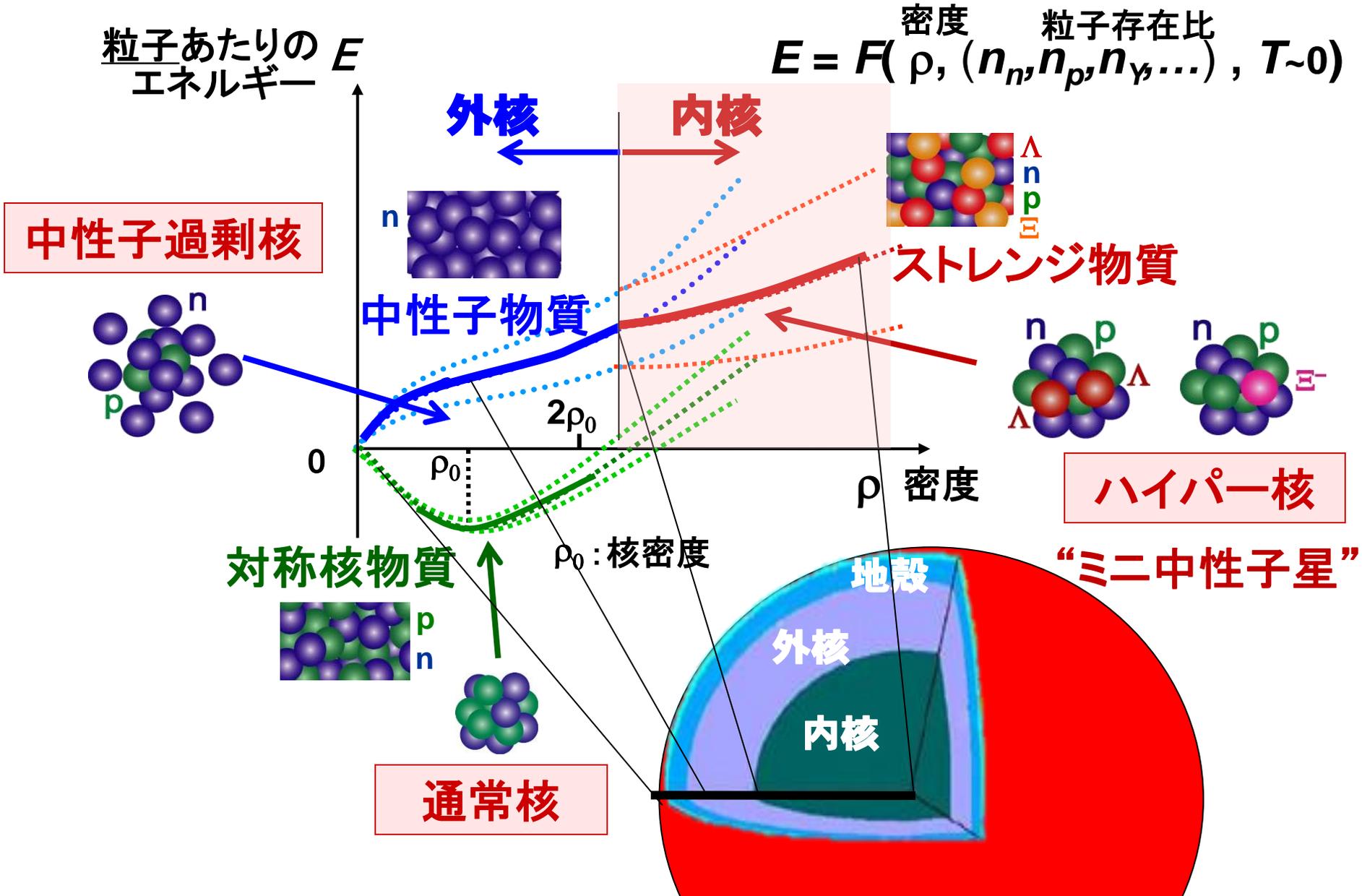
理研 RI ビームファクトリー (RIBF)

SAMURAI超伝導電磁石

荷電粒子検出器



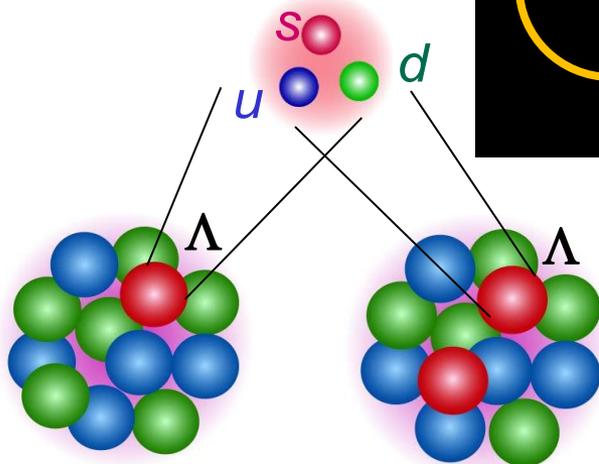
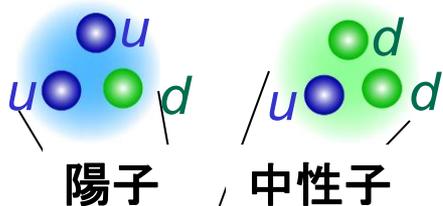
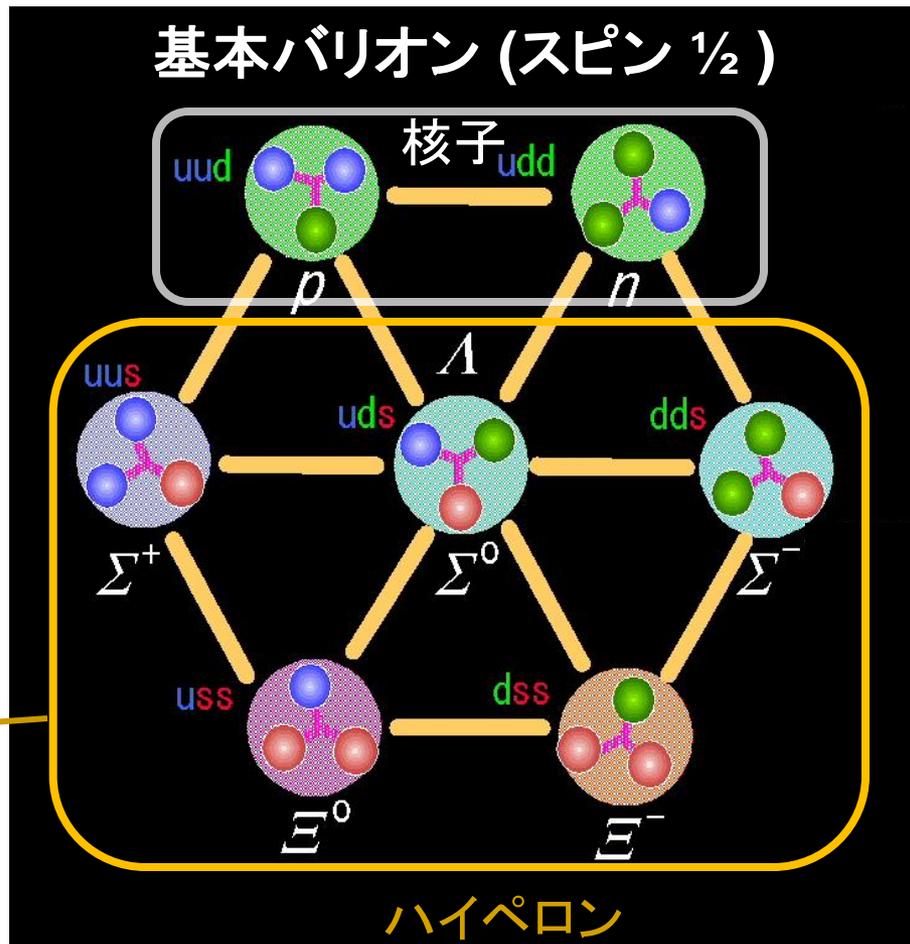
中性子星の硬さを表す「核物質の状態方程式」



ストレンジクォークと ハイパー核

		Mass (GeV/c ²)
安定		
up	charm	top
0.003 [0.3]	1.3 [1.5]	173
down	strange	bottom
0.005 [0.3]	0.1 [0.5]	4.2

比較的長い寿命 ($\sim 10^{-10}$ s)、
かなり容易に作れる



通常核

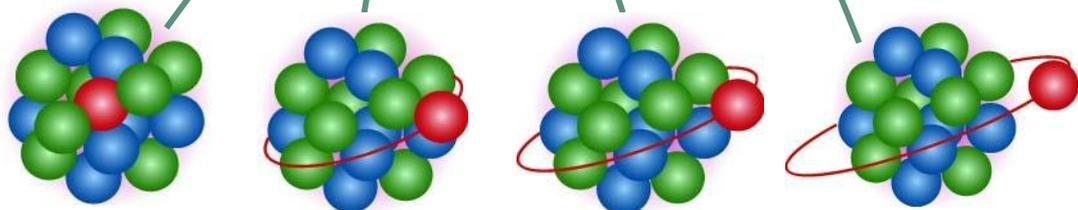
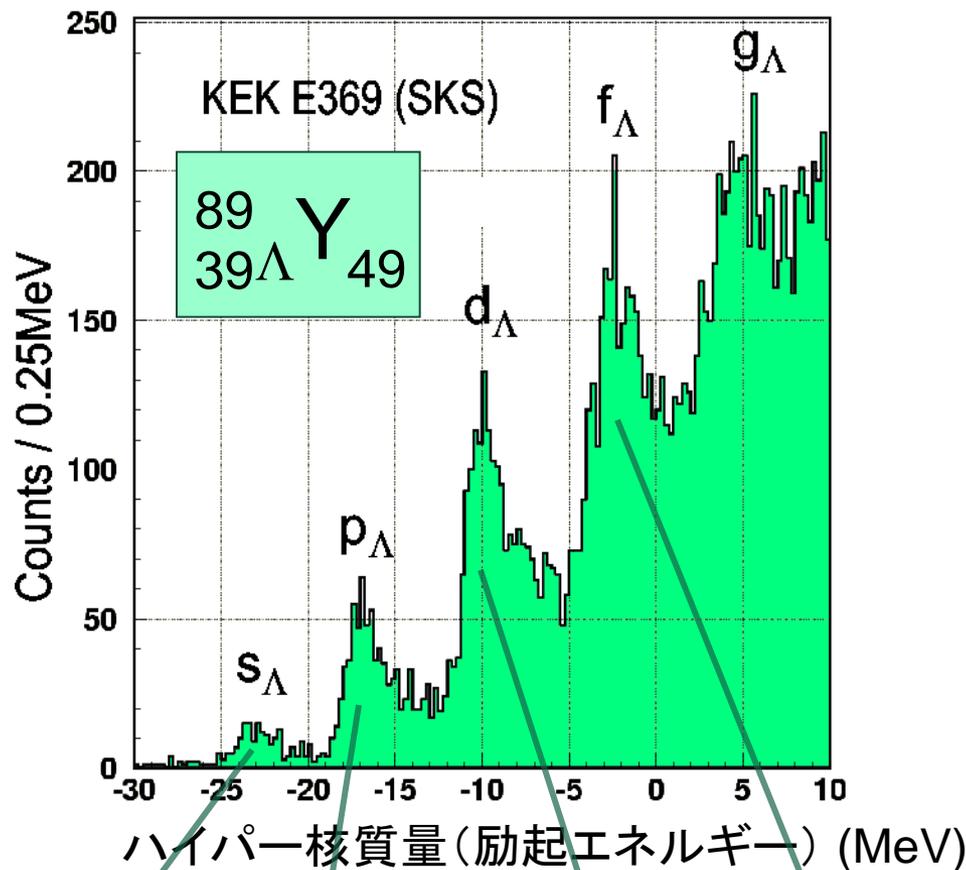
Λハイパー核

ΛΛハイパー核

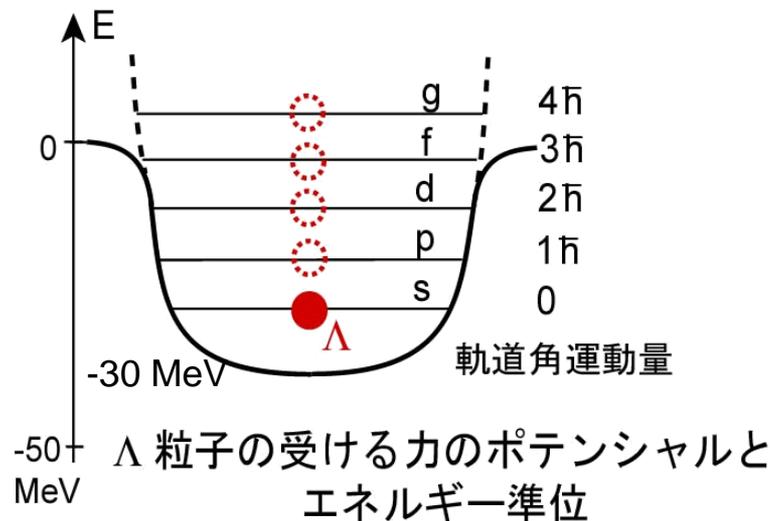
Σハイパー核

Ξハイパー核

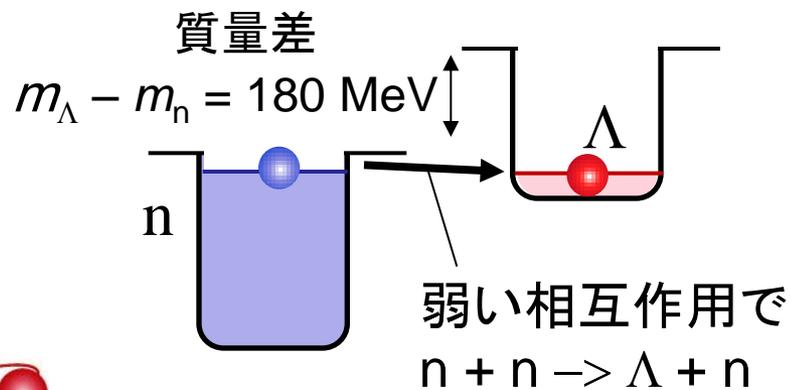
Λ ハイパー核から中性子星内での Λ の発生がわかる



Λ 粒子は核子からパウリ排他律を受けない

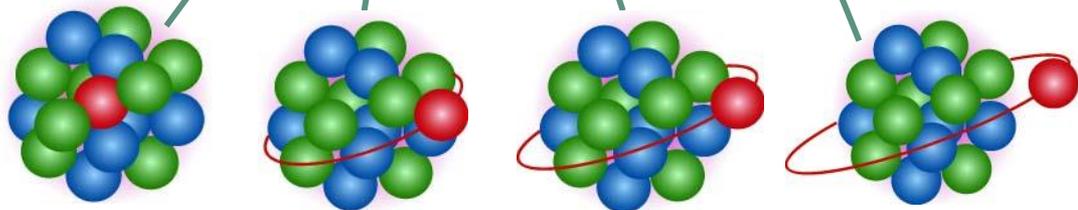
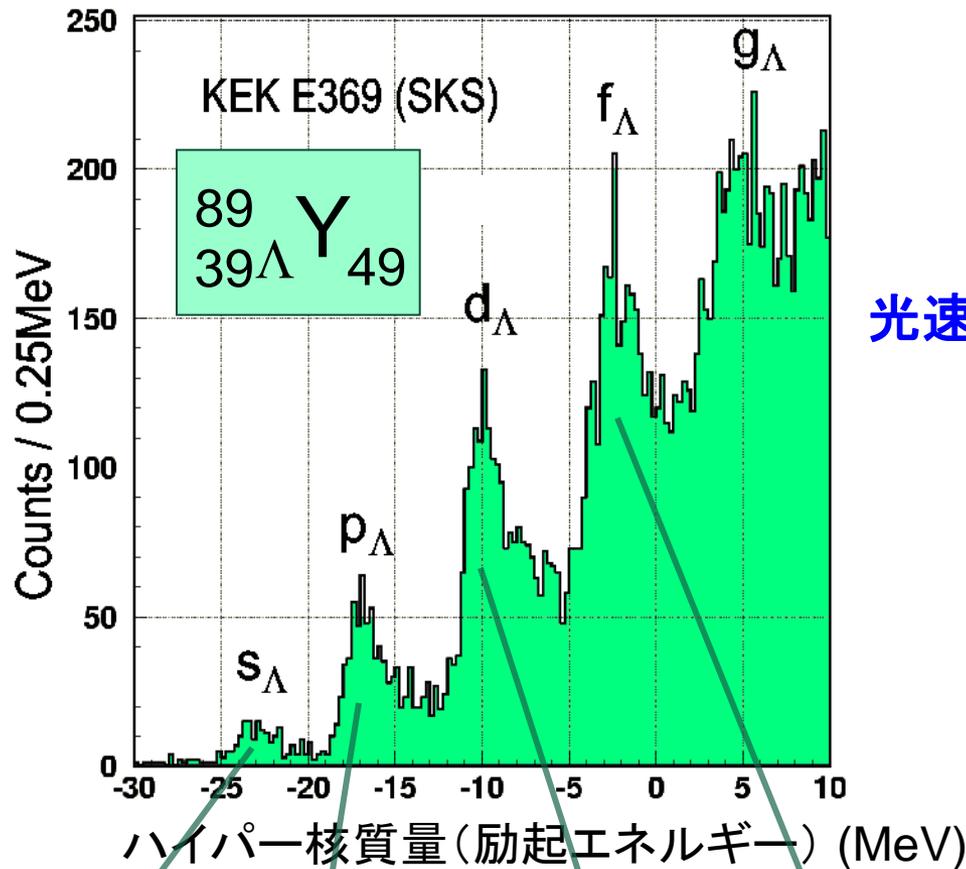


核内 Λ は引力を受けて軌道を描く

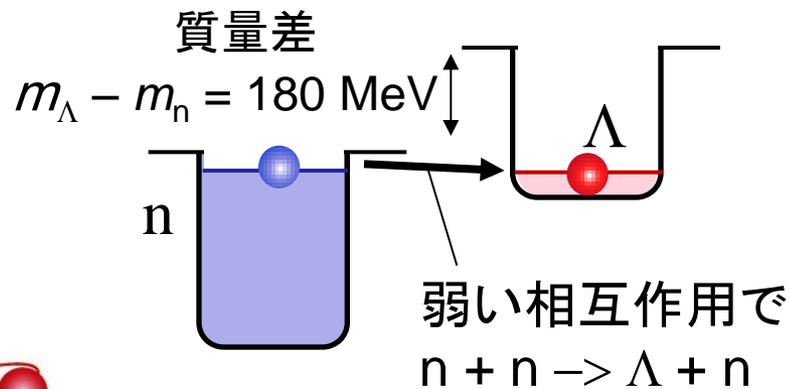
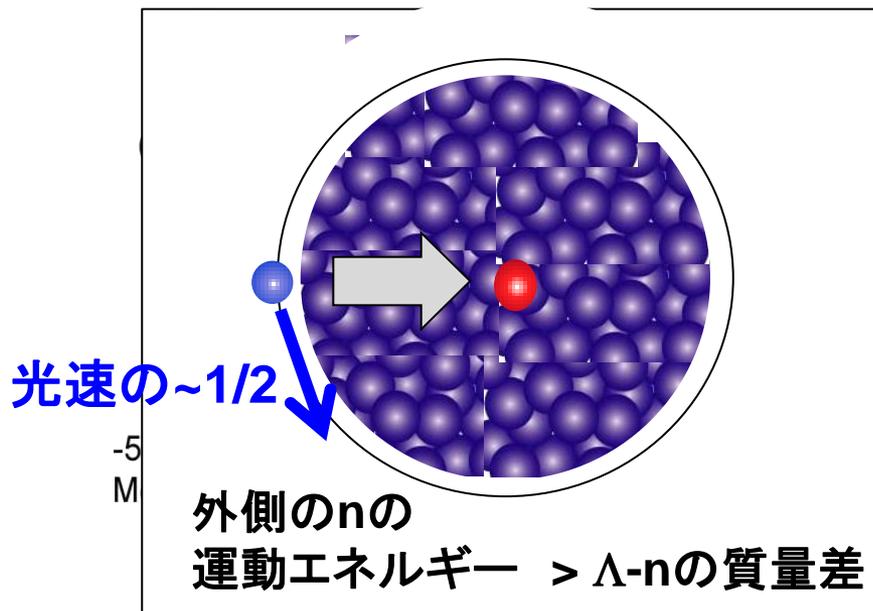


中性子星では、 Λ が密度 $2\sim 3 \rho_0$ で発生するはず

Λ ハイパー核から中性子星内での Λ の発生がわかる

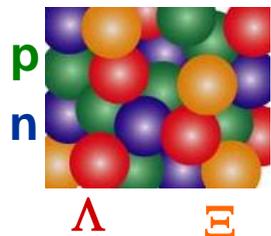


Λ 粒子は核子からパウリ排他律を受けない



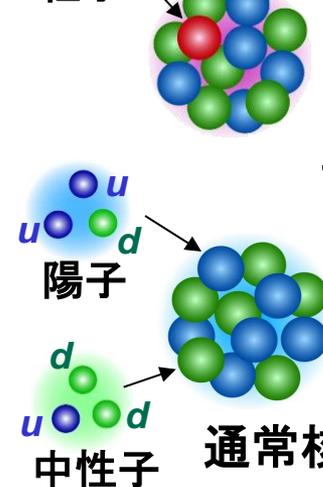
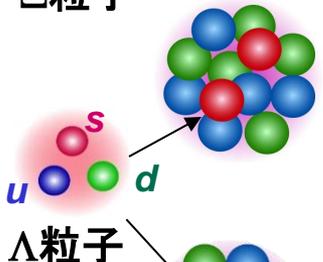
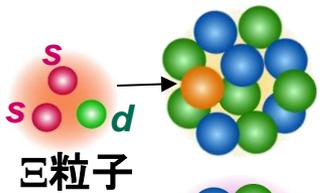
中性子星では、 Λ が密度 $2\sim 3 \rho_0$ で発生するはず

ストレンジ核物質

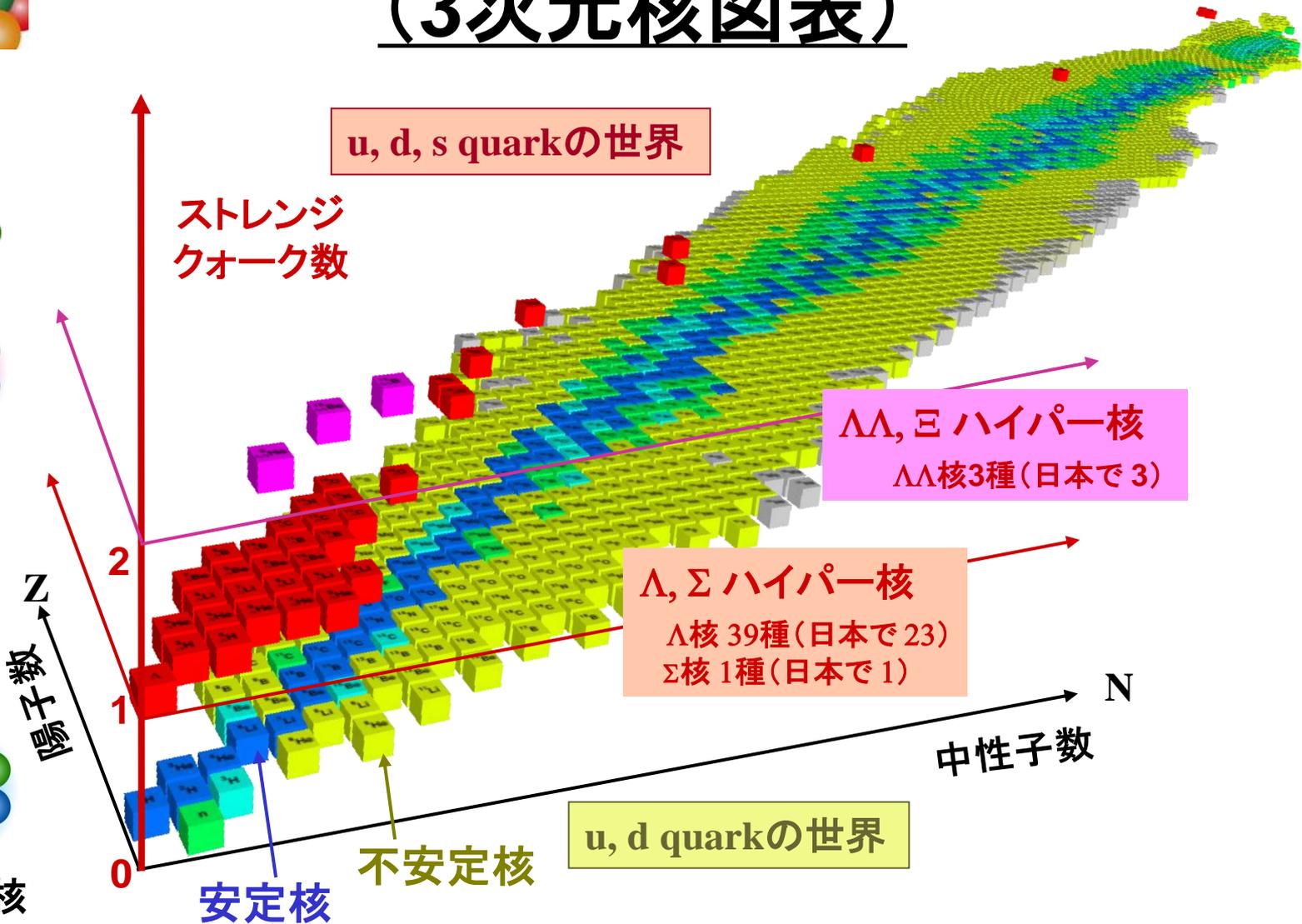


ハイパー核の世界 (3次元核図表)

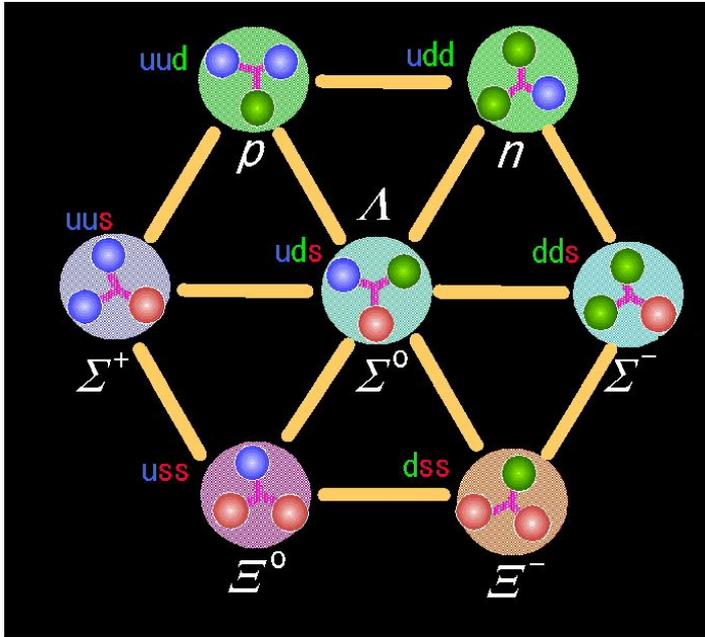
ハイパー核



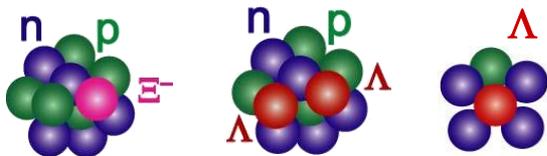
通常核



内核でのハイペロン(sクォーク)の出現を予測

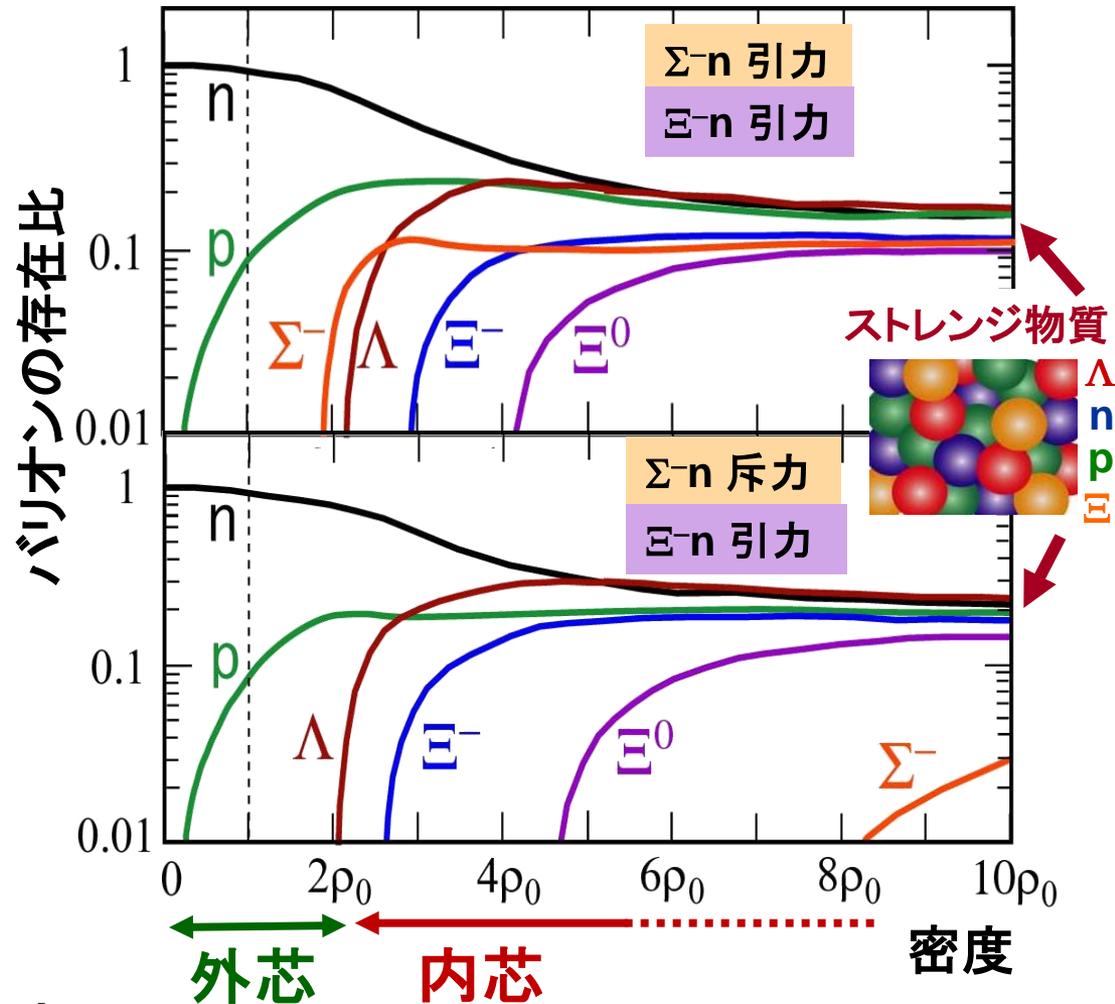


さまざまなハイパー核を作って、
バリオン間力（核力を拡張した
もの)をすべて調べる必要あり



→ J-PARCで実験が進行中

Ishizuka, Ohnishi et al.



大強度陽子加速器施設: J-PARC

(Japan Proton Accelerator Research Complex) 茨城県東海

物質・生命科学実験施設

50 GeV
シンクロトロン

3 GeV
シンクロトロン

400 MeV
線形加速器 (350m)

ニュートリノ実験施設

原子核素粒子実験施設
(ハドロン・ホール)

60m x 56m

世界最大のビーム強度(陽子数)
従来の加速器の 10~100倍

ハイパー核研究の世界の中心



重い中性子星発見の衝撃

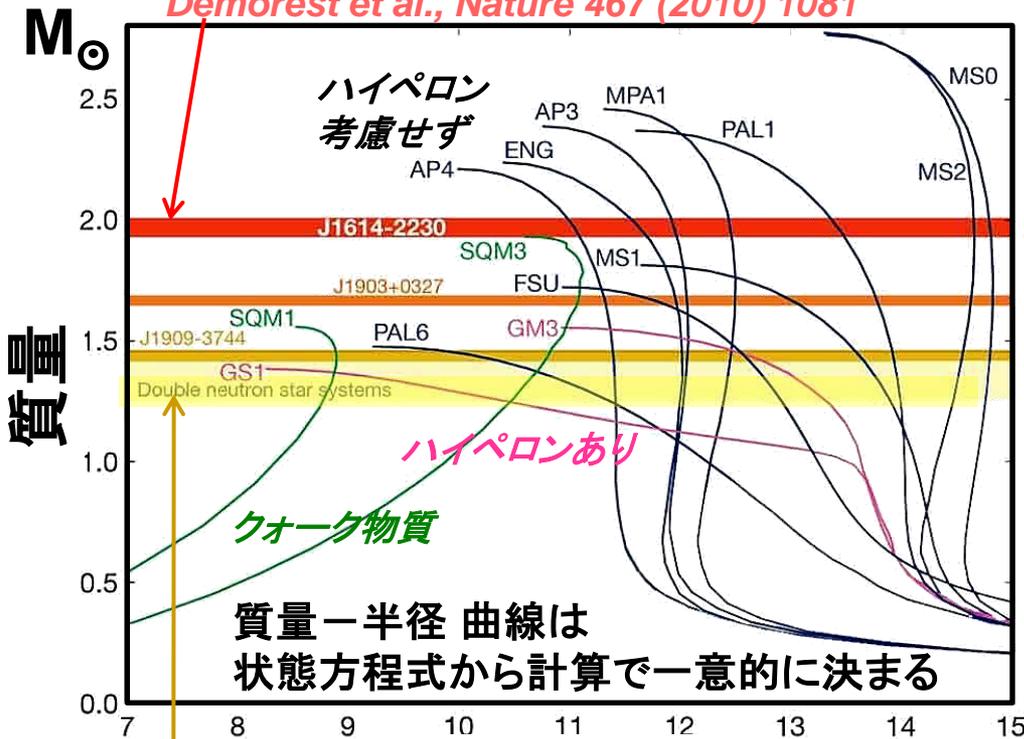
ハイペロン (sクォーク)が $\rho = 2\sim 3 \rho_0$ で発生

→ 密度が上がりにすぎて小質量でもブラックホールになる (軟かい中性子星)

= $1.5 M_{\odot}$ より重い中性子星は存在できない

1.97 ± 0.04 M_{\odot} の重い中性子星の発見

Demorest et al., Nature 467 (2010) 1081

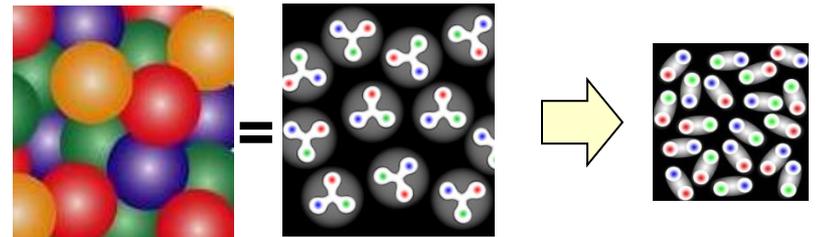


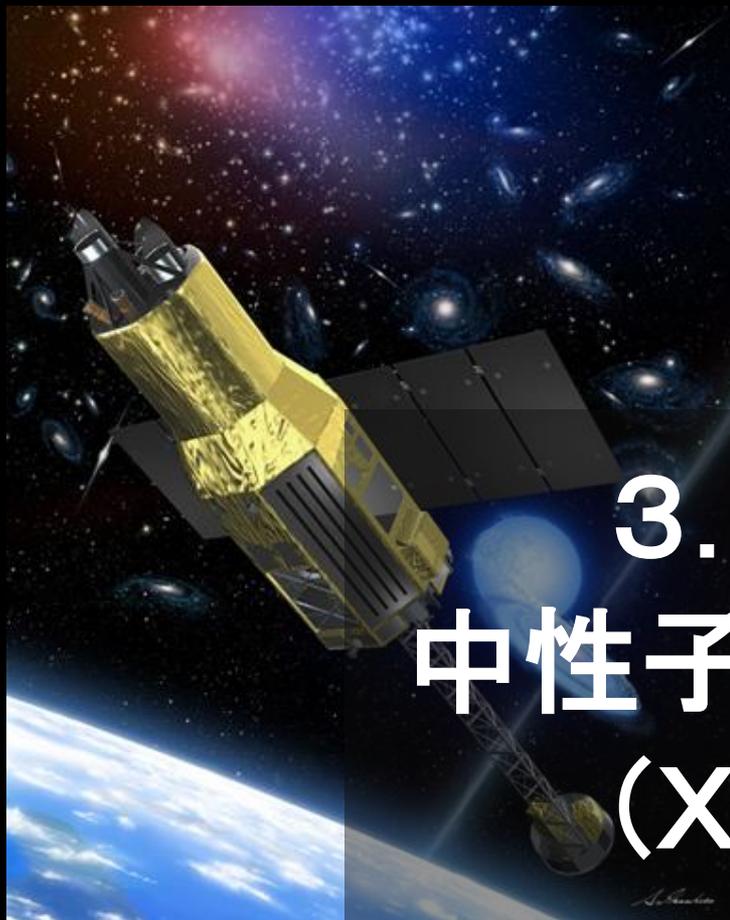
多数の観測値が
 $1.4 M_{\odot}$ に集中

半径 (km) 直接測定なし

高密度での原子核理論を
抜本的に変更する必要あり

- ・バリオンの構造や核力(バリオンの力)は高密度で変化している?
- ・中心部が相転移してクォーク物質になっている?





X線天文衛星
ASTRO-H

重力波検出器
KAGRA

3. 天体観測で 中性子星内部を調べる (X線と重力波)

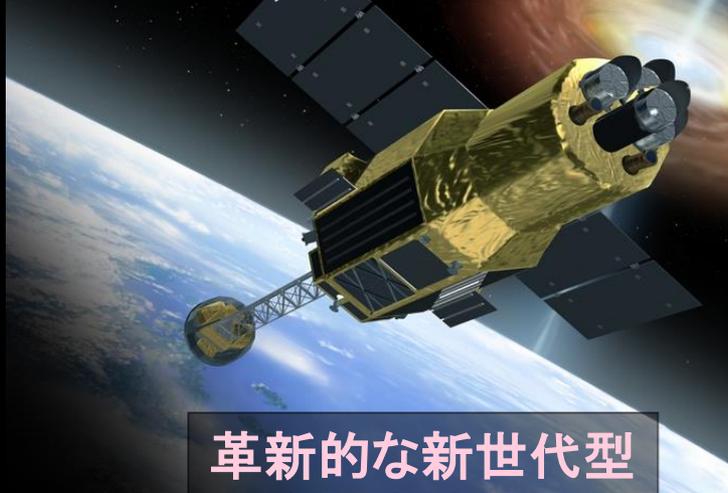


X線天文衛星 ASTRO-H

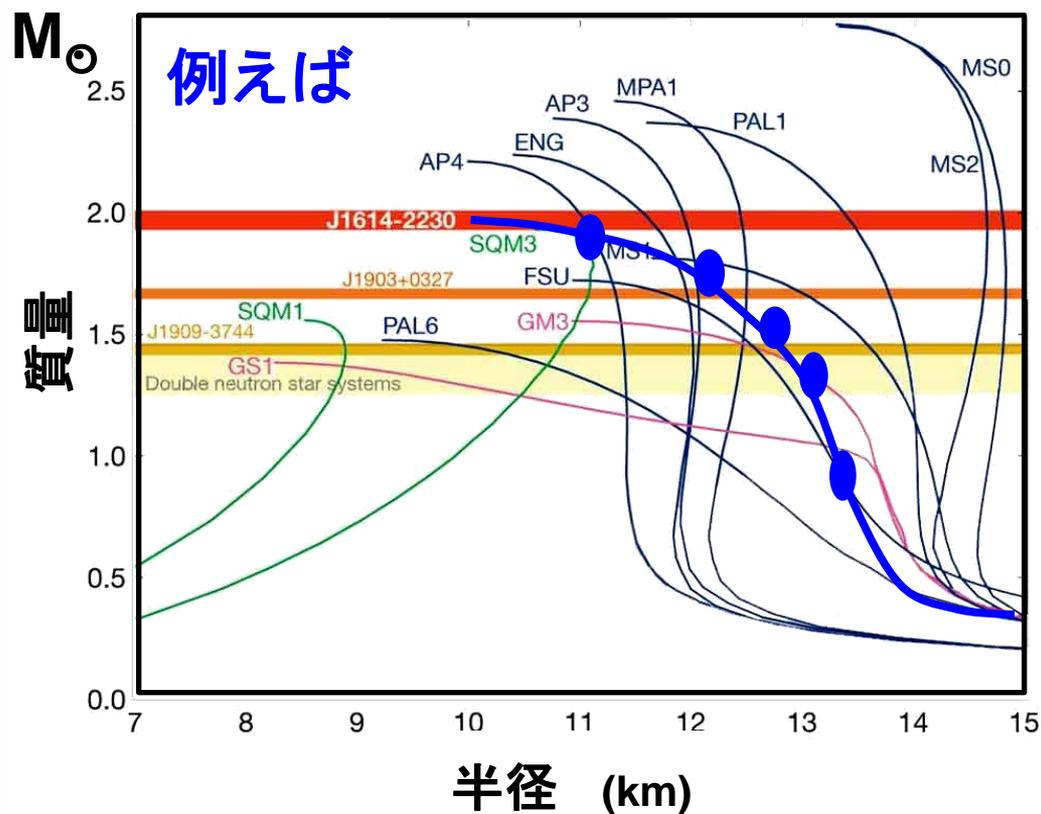
JAXA, 2015年打ち上げ

ブラックホール、中性子星、超新星爆発などでの
落ち込む／吹き出す高温物質が出すX線を観測

中性子星半径の
精密決定も可能
→ 状態方程式(硬さ)
が決まる



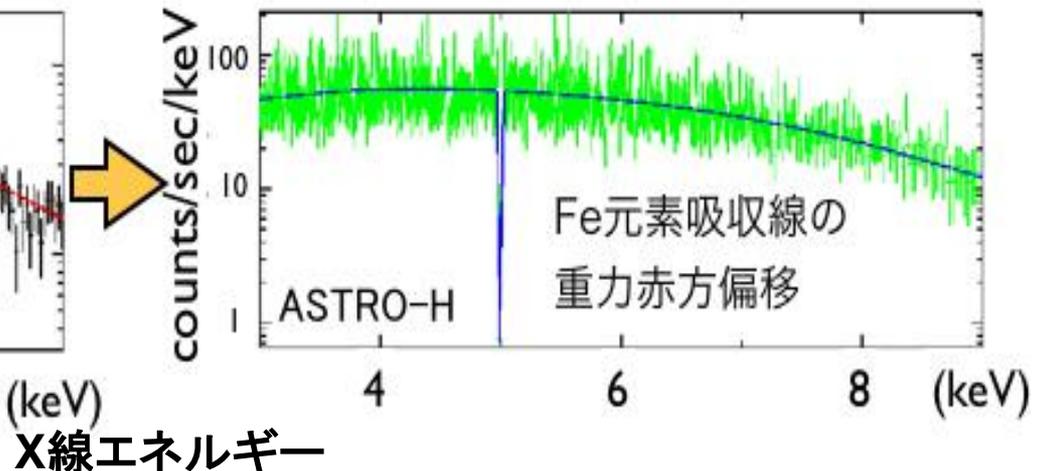
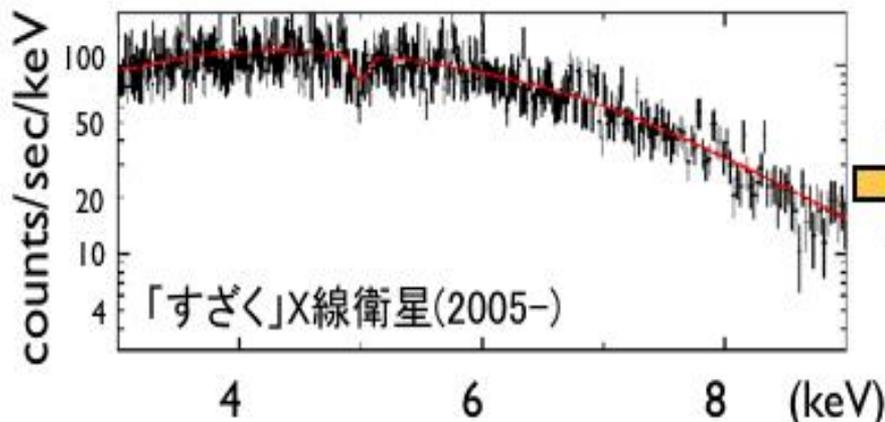
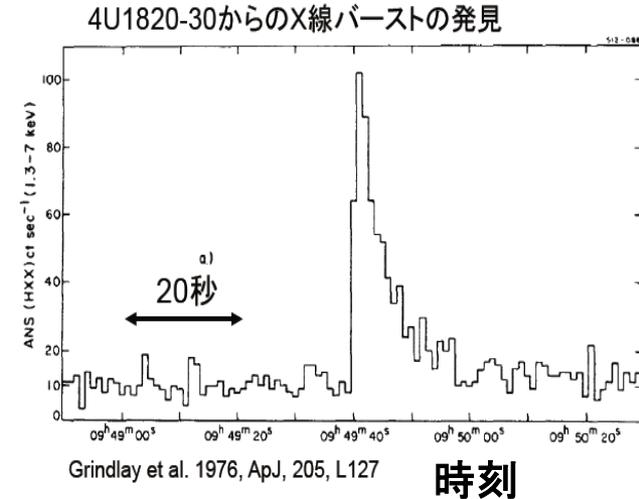
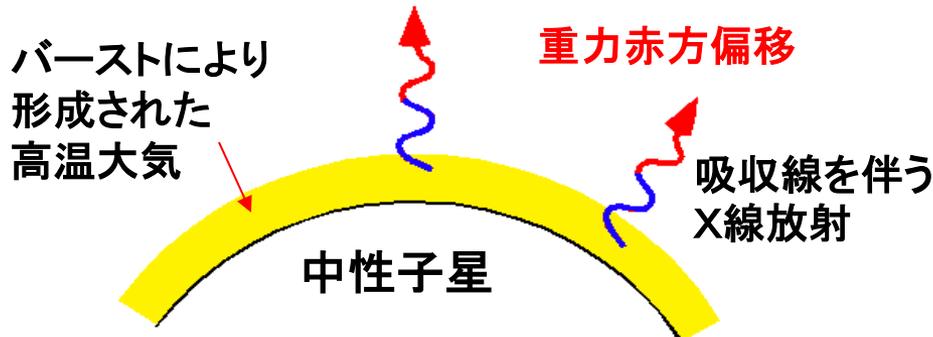
革新的な新世代型
X線望遠鏡を搭載



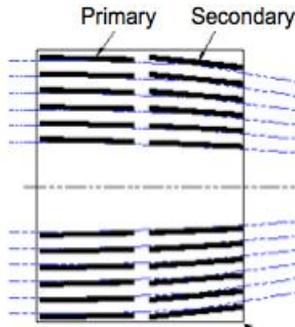
中性子星半径の直接測定

従来は、中性子星の明るさと距離,温度から推定(黒体輻射を仮定)

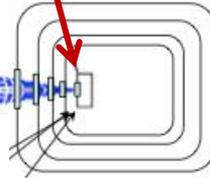
中性子星表面で発生するX線バーストの
重元素吸収線の赤方偏移 \rightarrow 重力 \rightarrow 半径



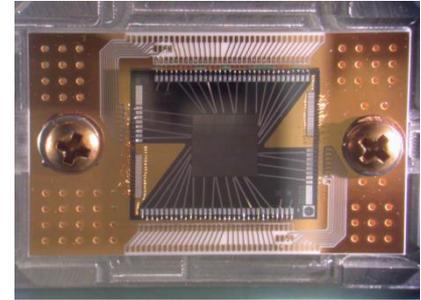
革新的な新世代X線望遠鏡



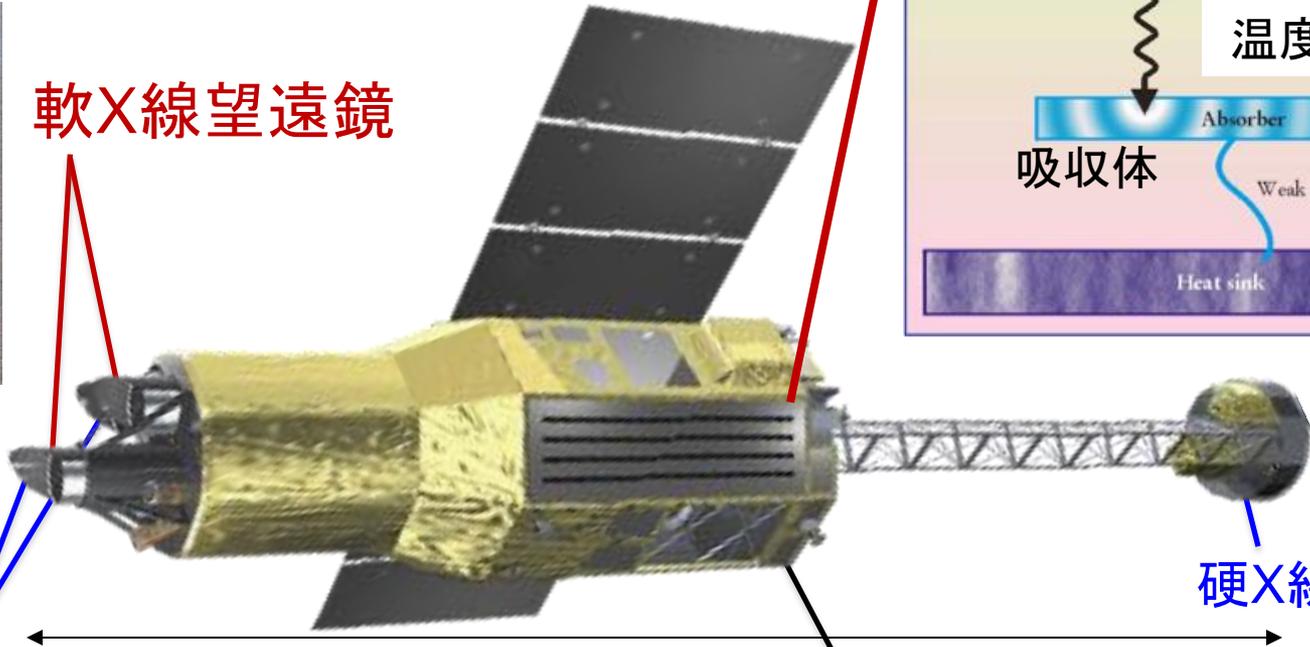
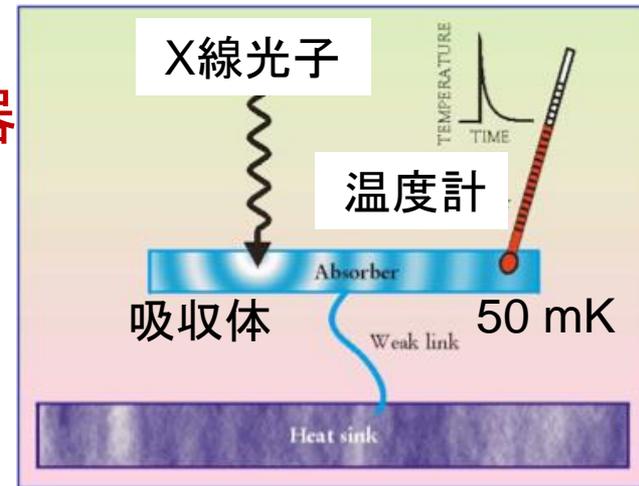
マイクロカロリメータ
(熱量計)



軟X線分光器



軟X線望遠鏡



硬X線検出器

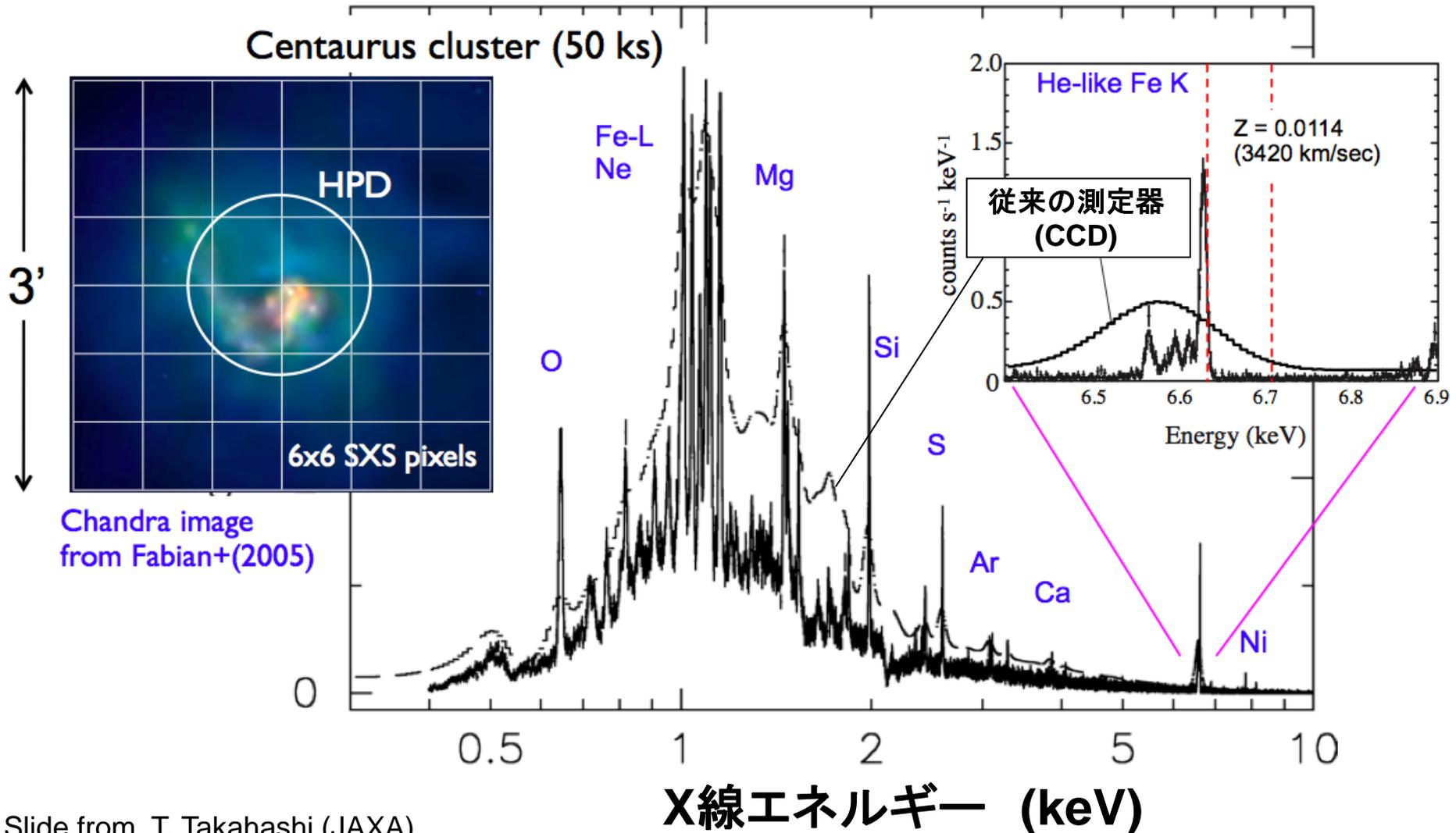
硬X線望遠鏡

全長 14 m

軟X線撮像器
軟ガンマ線検出器

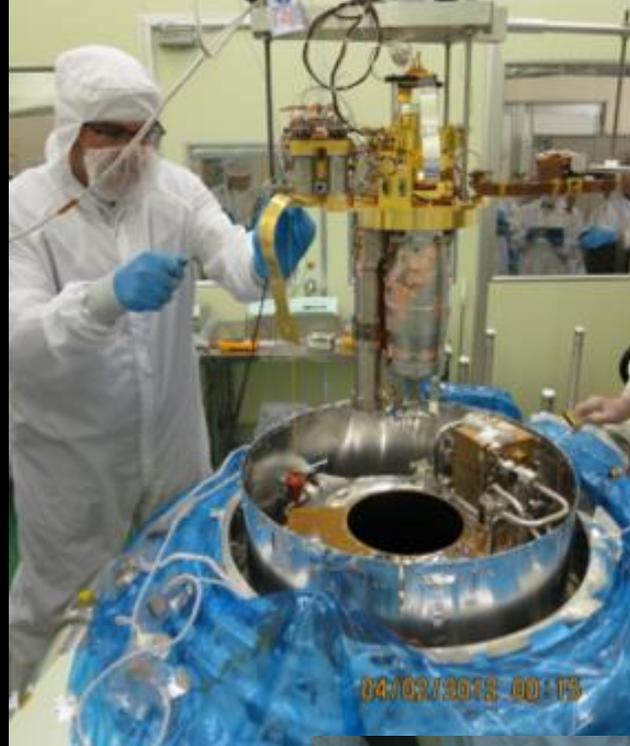
画期的なエネルギー分解能

<7 eV (FWHM) @ 6 keV



ASTRO-H の準備状況

振動テスト



マイクロカロリメータ
を50mKに冷やす
液体ヘリウム容器

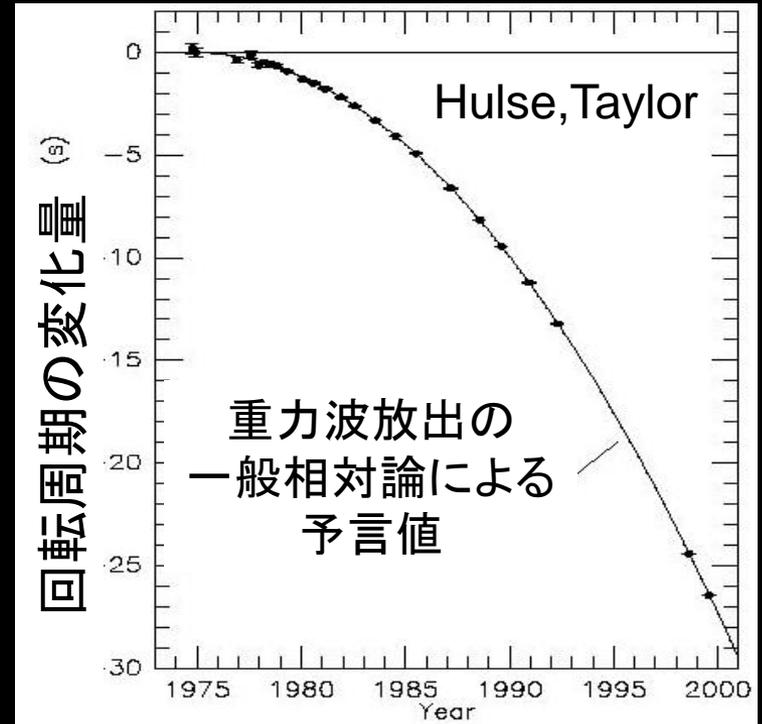
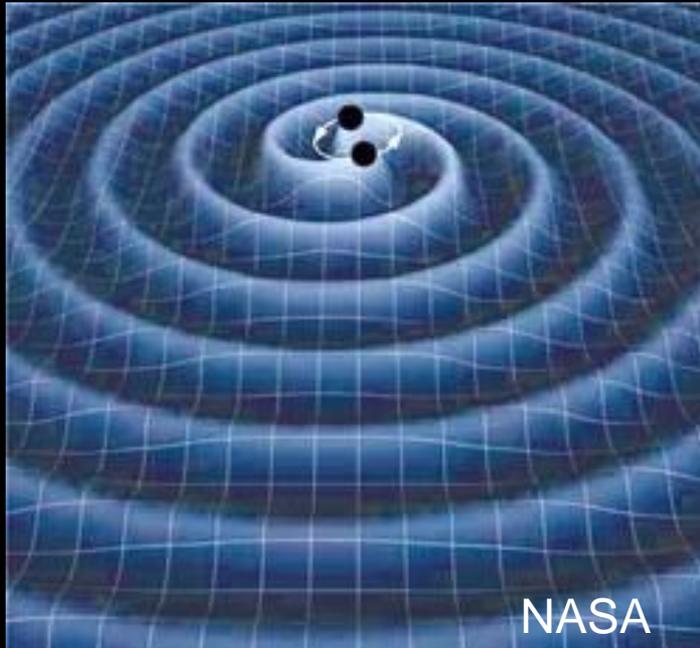


マイクロカロリメータの組み立て

重力波とは

アインシュタインの一般相対論で予言
大質量天体の振動で生ずる時空のゆがみが波として広がる

重い星(ブラックホールや中性子星)の連星系の回転や合体
重い星の非対称な振動、非対称な超新星爆発



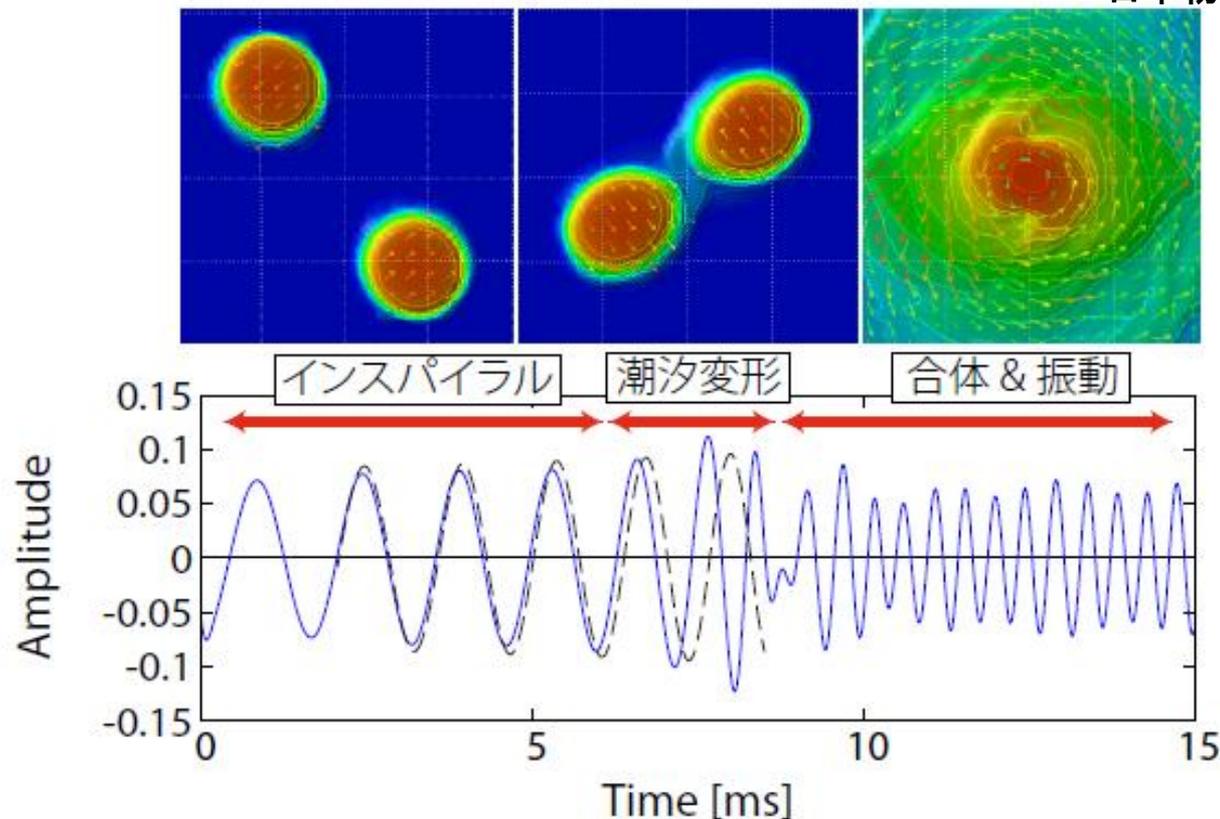
- ・まだ直接観測はされていない
- ・中性子星連星系の回転周期の変化から間接的に存在が証明された (Hulse, Taylor : ノーベル賞)

重力波で中性子星の中身を調べる

中性子星-中性子星連星の合体は、
観測が最も期待される重力波源

一般相対論シミュレーション

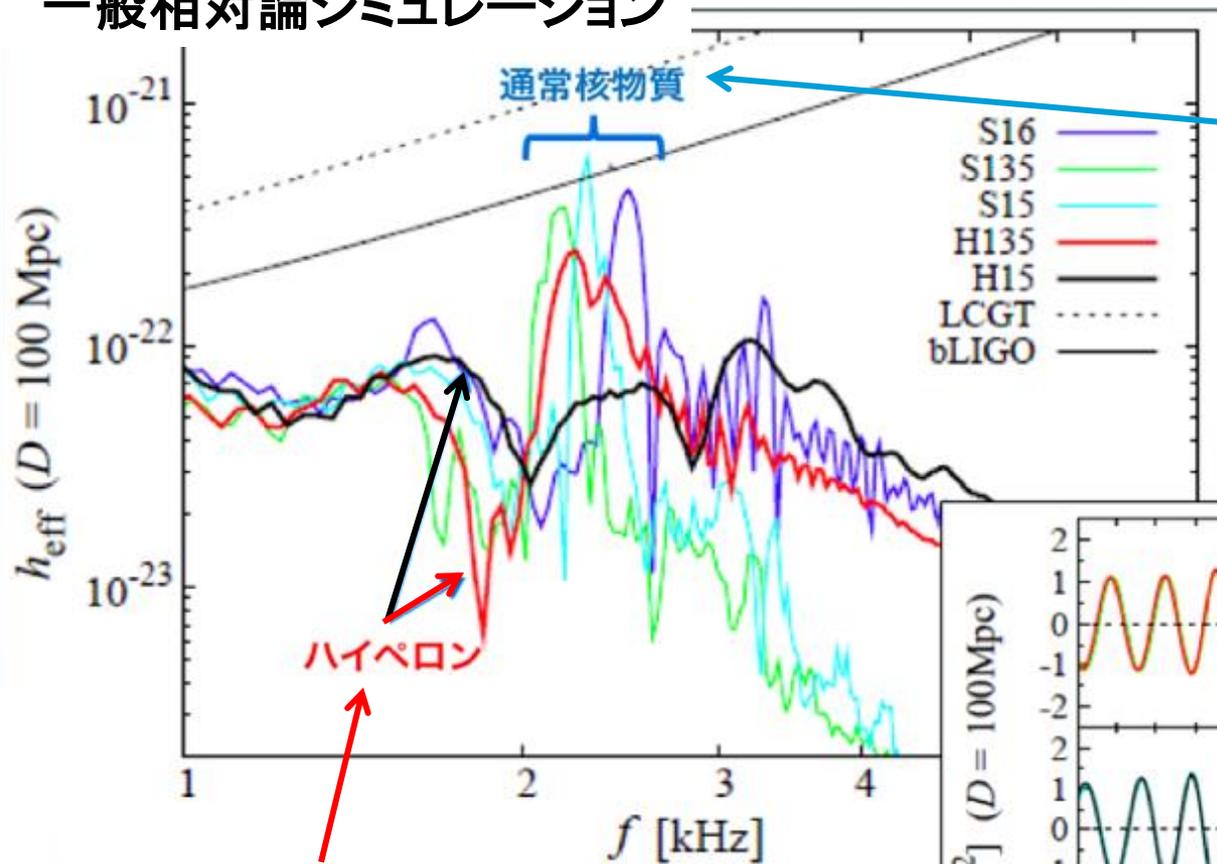
木内、関口(京大基研)
日本物理学会誌 62 (2007) 785より



波形から
中性子星の
硬さがわかる

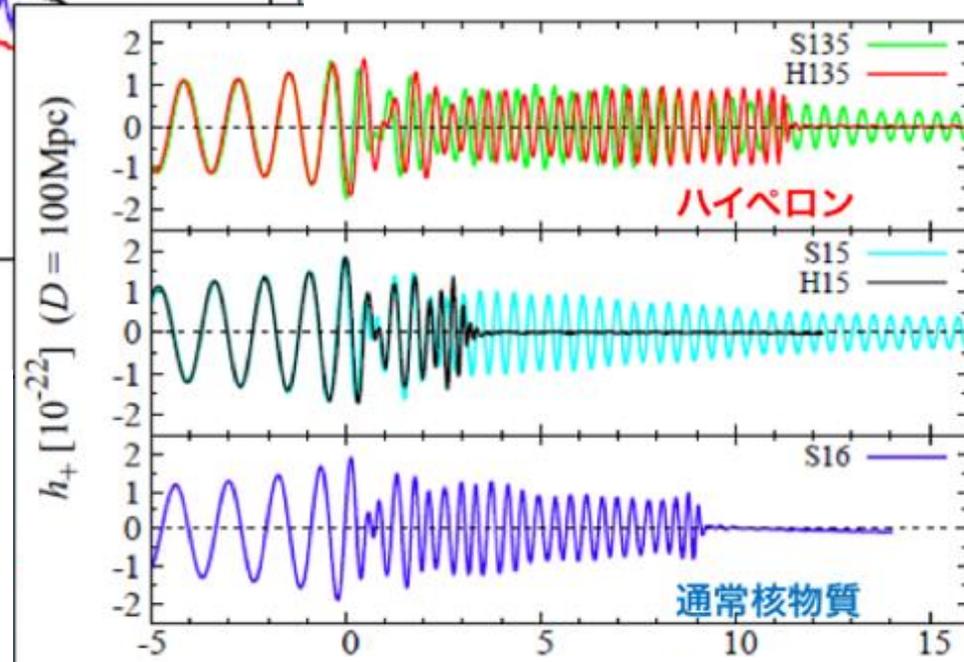
振動数分布と中性子星の硬さ

一般相対論シミュレーション



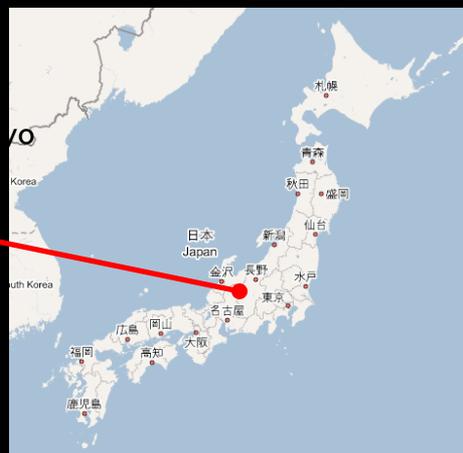
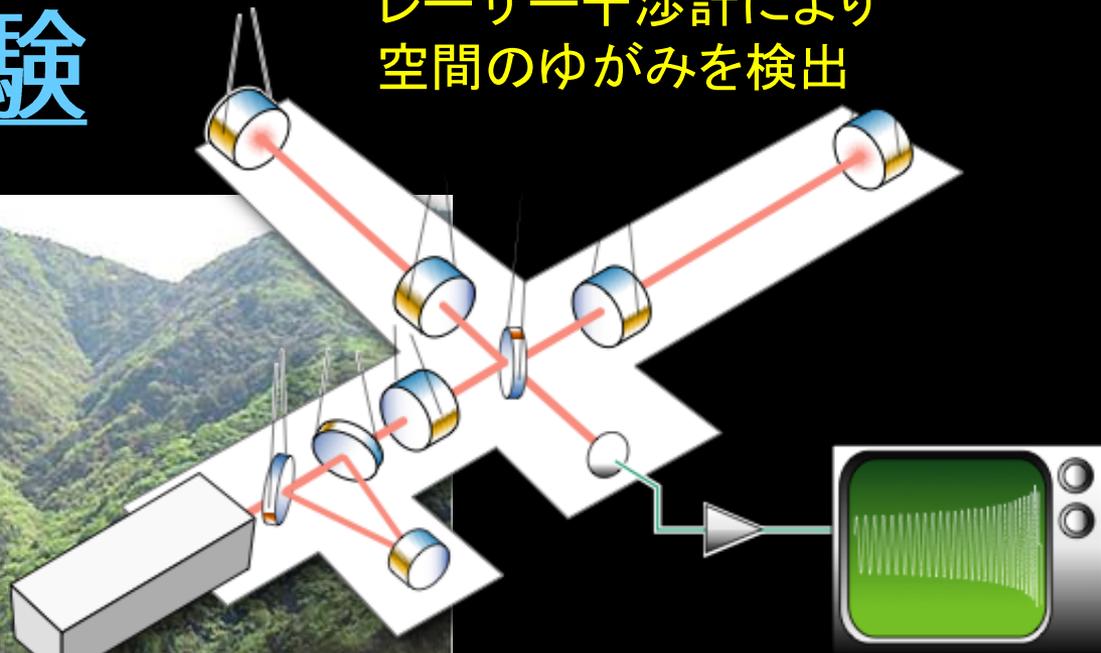
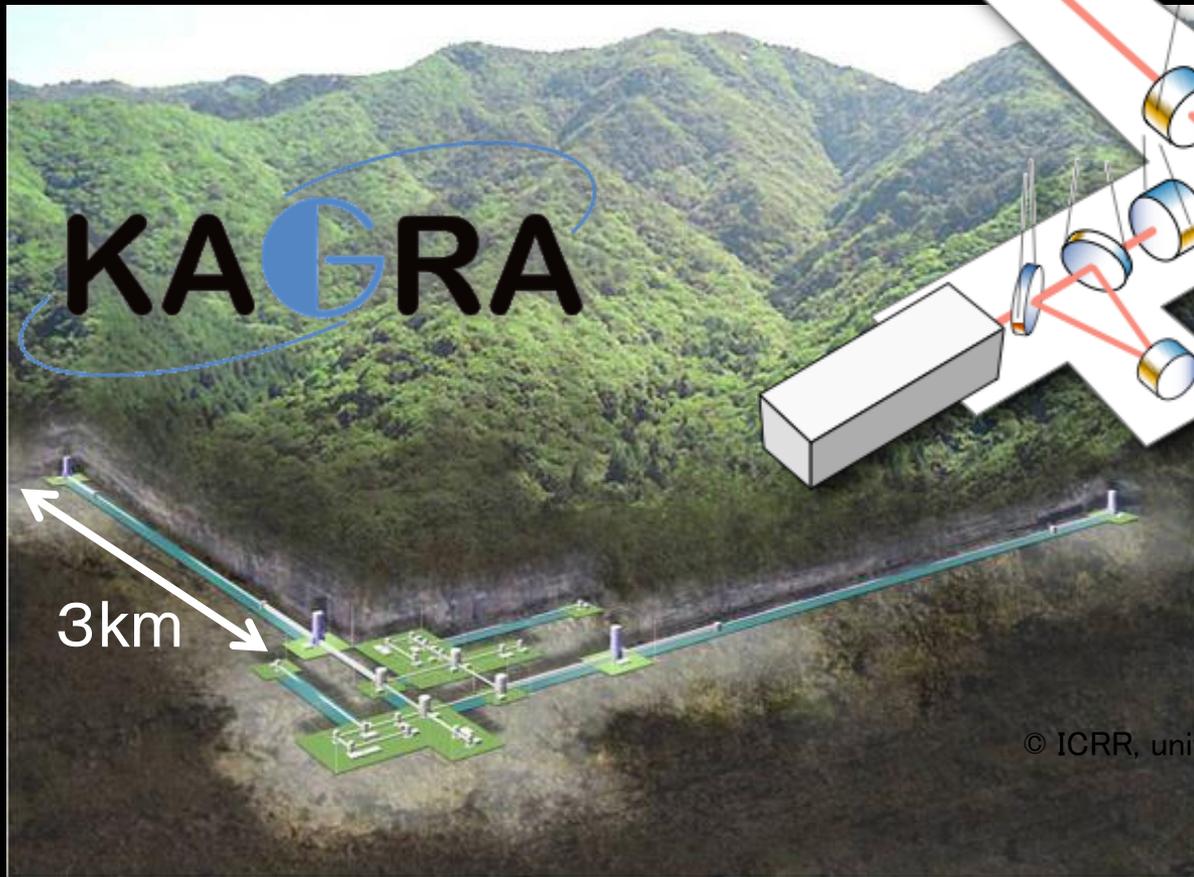
ハイペロンの出現を許さない
と、合体後もつぶれずに
一定の回転を保つ。
(硬い中性子星)

ハイペロンの出現を許すと、
合体後、急にハイペロンが増加し、
つぶれながら回転が速くなる
(軟らかい中性子星)



KAGRA実験

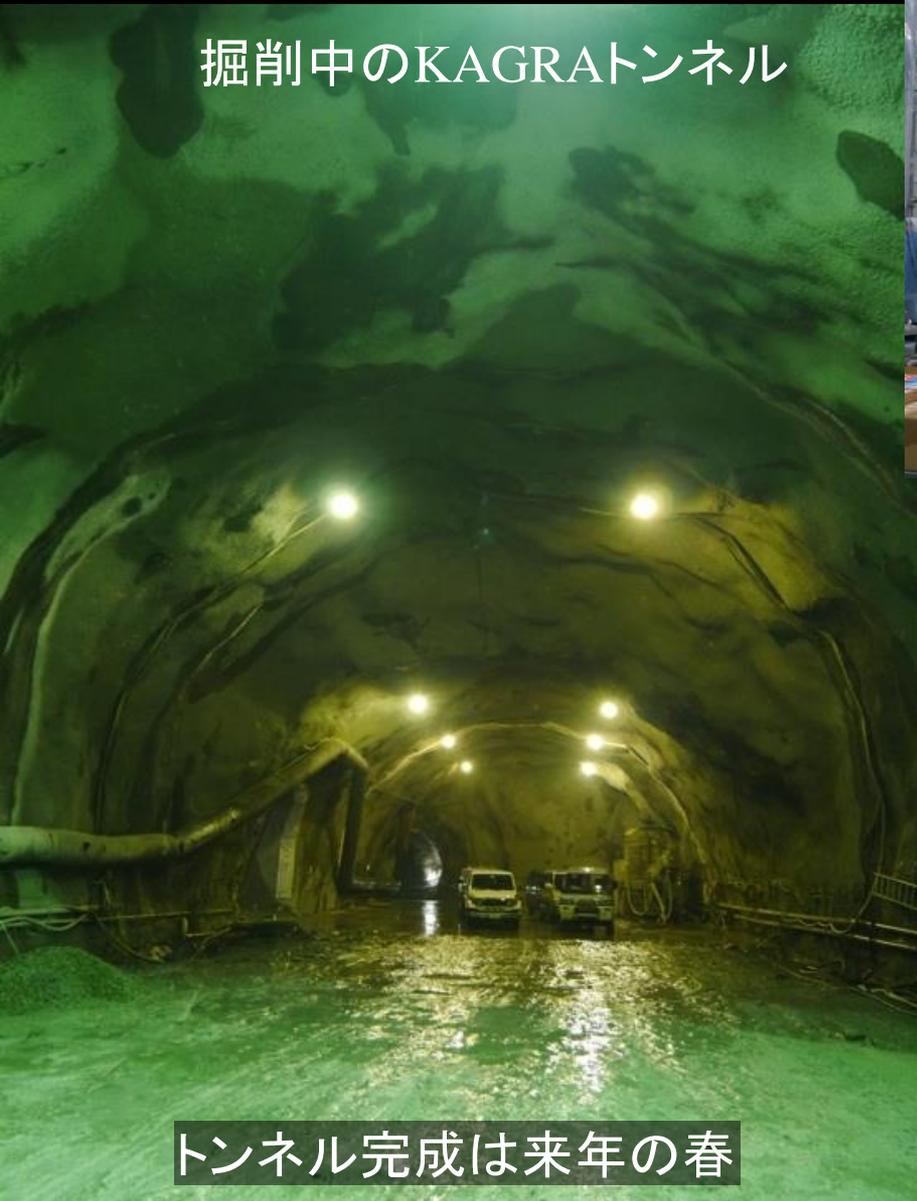
レーザー干渉計により
空間のゆがみを検出



岐阜県神岡鉦山内に、
3 km x 3 km の大型干渉計 KAGRA (かぐら) を
建設中

KAGRAの建設状況

掘削中のKAGRAトンネル



トンネル完成は来年の春

鏡を冷やす低温装置

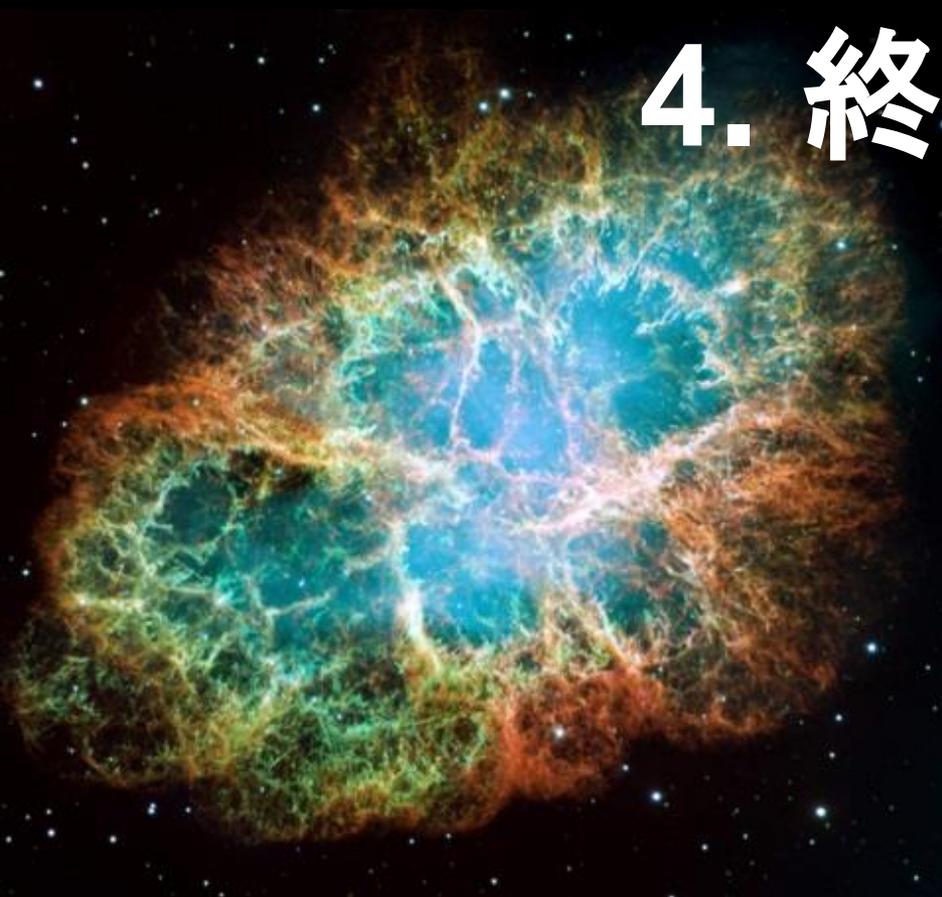


ビームパイプの輸送



Slide from N. Kanda (Osaka City U.)

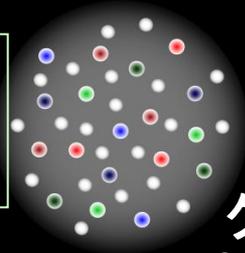
4. 終わりに



宇宙における物質 (クォーク多体系)の 起源と進化

温度

ビッグバン
(初期宇宙)



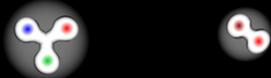
クォーク・
グルーオン・
プラズマ (QGP)

膨張による冷却

相転移

ハドロン

バリオン(重粒子) メソン(中間子)



“気体”-> 完全流体

元素合成

恒星

“液体(液滴)”

超伝導状態

$H, He \rightarrow Fe$

$Fe \rightarrow U$

超新星爆発?

中性子星

重力圧縮

重力圧縮

相転移

クォーク星?

0

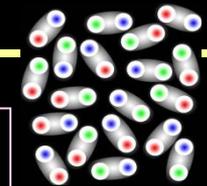
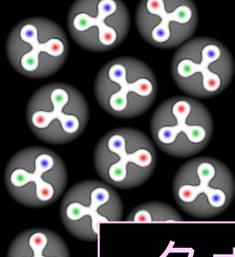
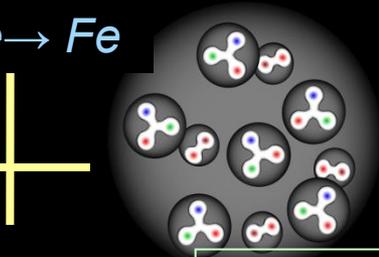
通常の原子核

高密度核物質

sクォーク出現?

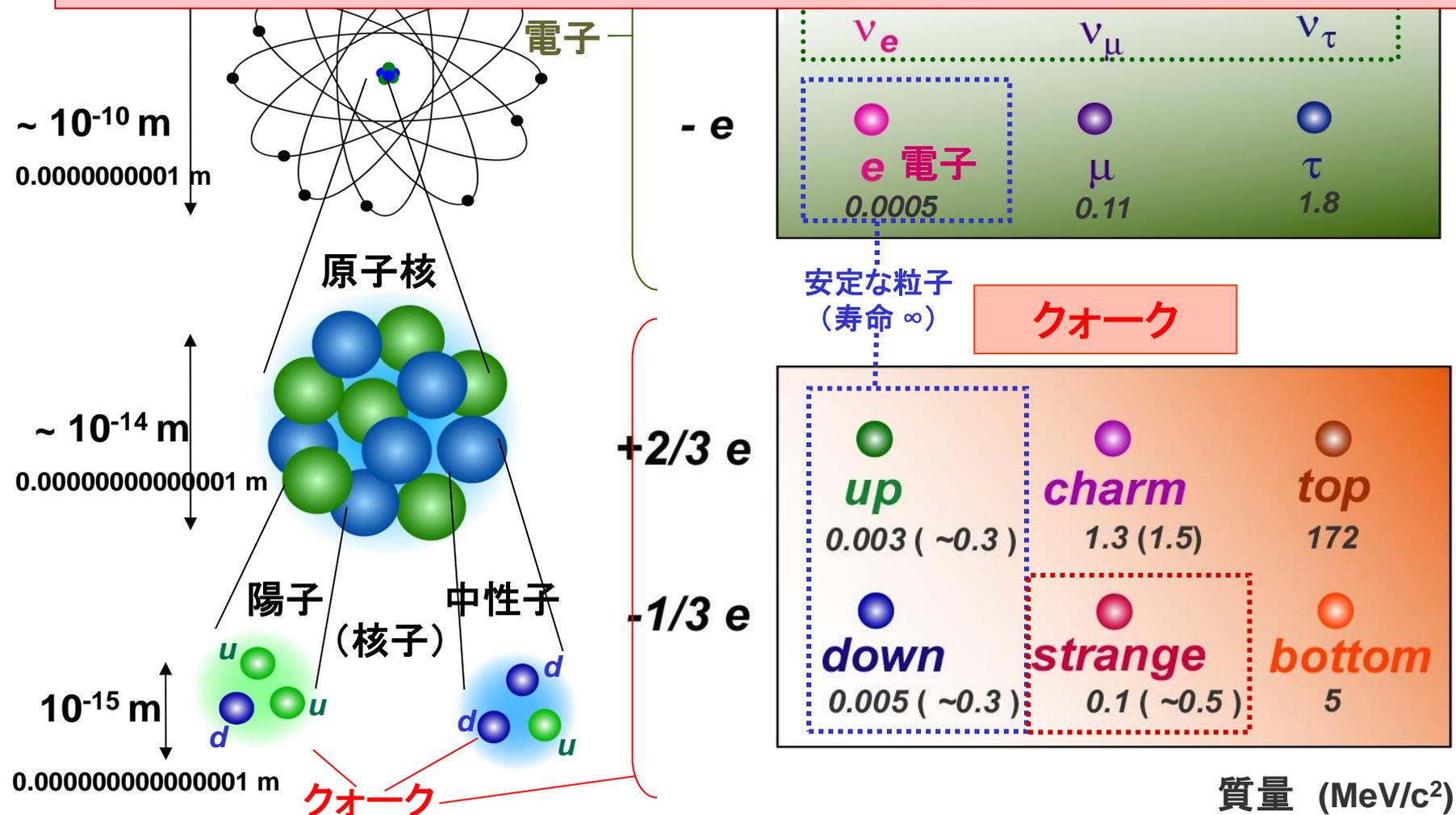
クォーク物質

密度



現在この宇宙に存在する“物質”は、

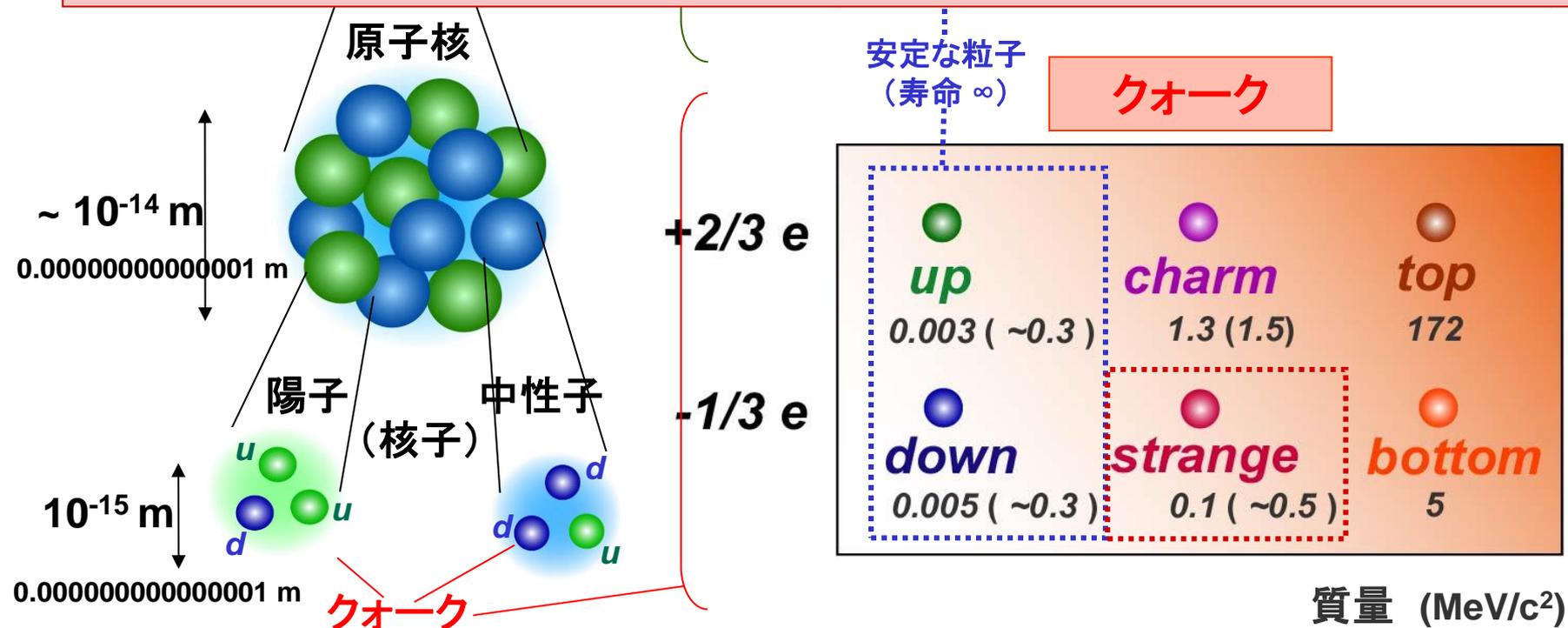
- 原子(+プラズマ)から成る。
- 陽子・中性子(=up, down クォーク)と電子で出来ている。
(20世紀の常識)



現在この宇宙に存在する“物質”は、

- 原子(+プラズマ)から成る。
- 陽子・中性子(=up, down クォーク)と電子で出来ている。
(20世紀の常識)

- 原子(+プラズマ)で出来ていない物質(電子のない物質)もある。
- up, down, strange クォークと電子でできている。(?)
(21世紀の常識へ)



実験と観測で解き明かす中性子星の核物質

Nuclear matter in neutron stars investigated by experiments and astronomical observations

連携プロジェクト
(H24~H28)を推進中

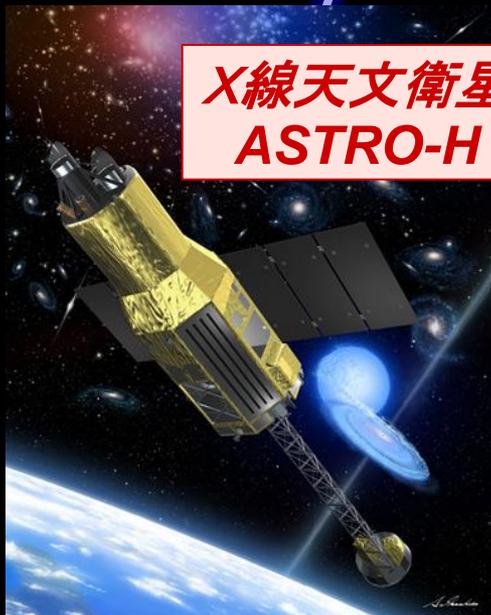


大強度陽子加速器
J-PARC

理論研究

**Neutron
Star
Matter**

X線天文衛星
ASTRO-H



不安定原子核工場
RIビームファクトリー



日本が誇る
世界最高の2大加速器
と天文衛星