

# J-PARC加速器で “ミニ中性子星”を作る —最先端の原子核物理学—

東北大学 理学研究科  
物理学専攻  
田村 裕和

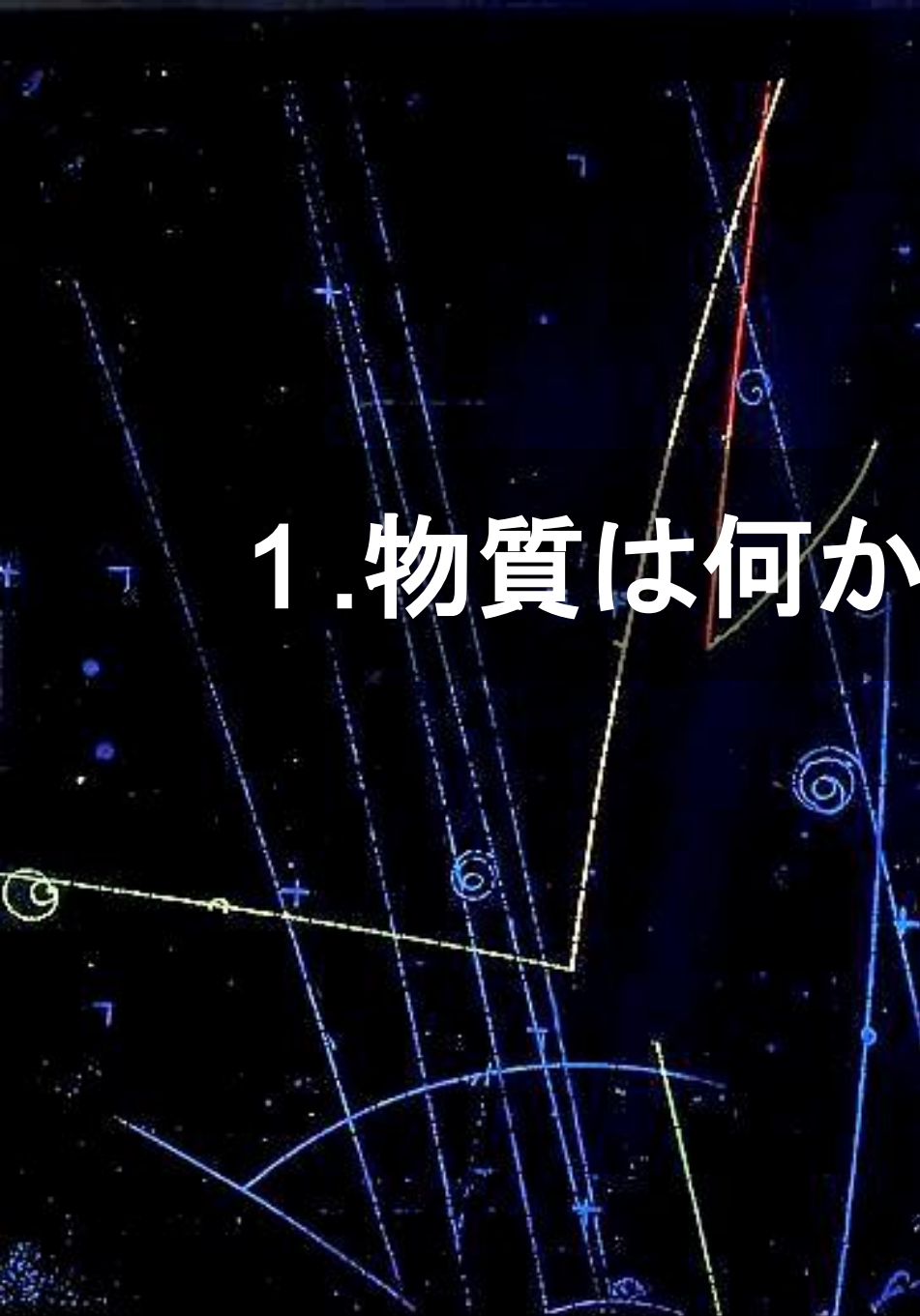
宇宙にあるすべての物質が、素粒子から  
どのように作られたのかを知りたい

# J-PARC加速器で “ミニ中性子星”を作る —最先端の原子核物理学—

## 内容

1. 物質は何からできている？
2. 中性子星とは？ その中身の物質は？
3. J-PARCで“ミニ中性子星”を作る！
4. 今後は？ —重力波観測との連携
5. おわりに

# 1.物質は何からできている？



素粒子反応の軌跡

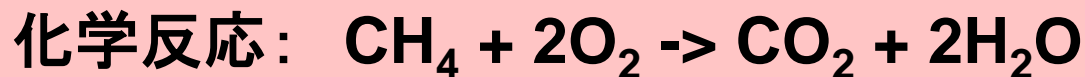
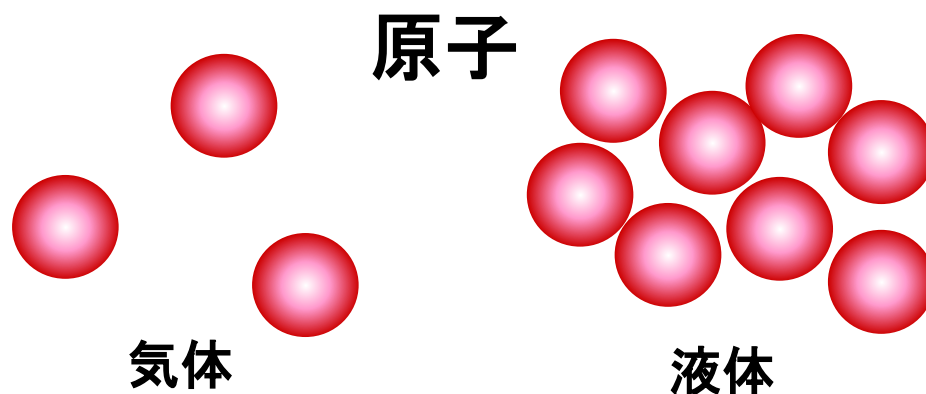


宇宙の大規模構造(銀河団の分布)

# 原子と周期表

(19世紀の物質観)

原子番号 — 2



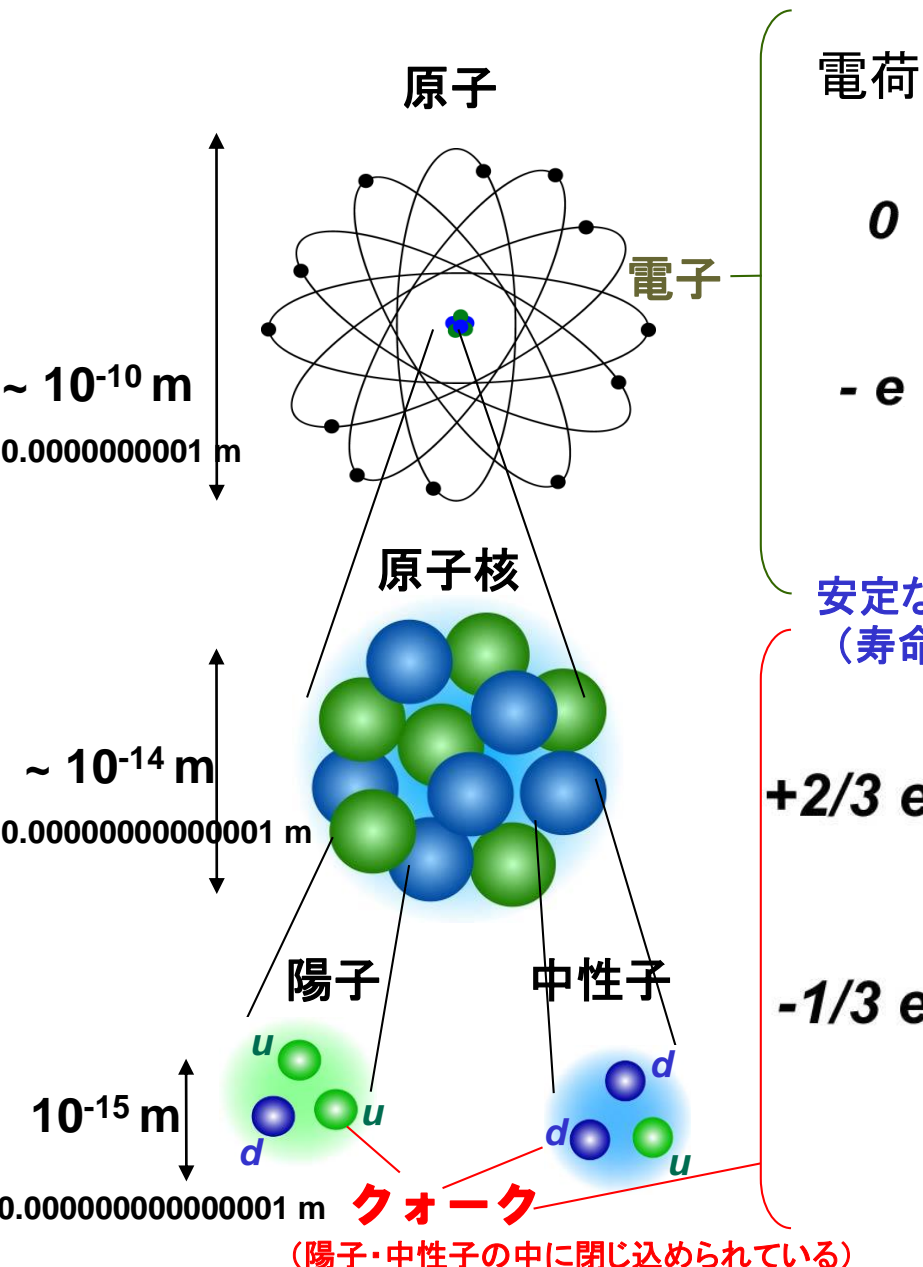
元素＝原子の種類 は、決して変化しない(19世紀の常識)

→ 変化することもある(放射性物質、原子核反応)

ベクレル、キュリー夫妻 1998

→ 原子には“中身”がある

# 原子は何からできている？ “素粒子”のお話

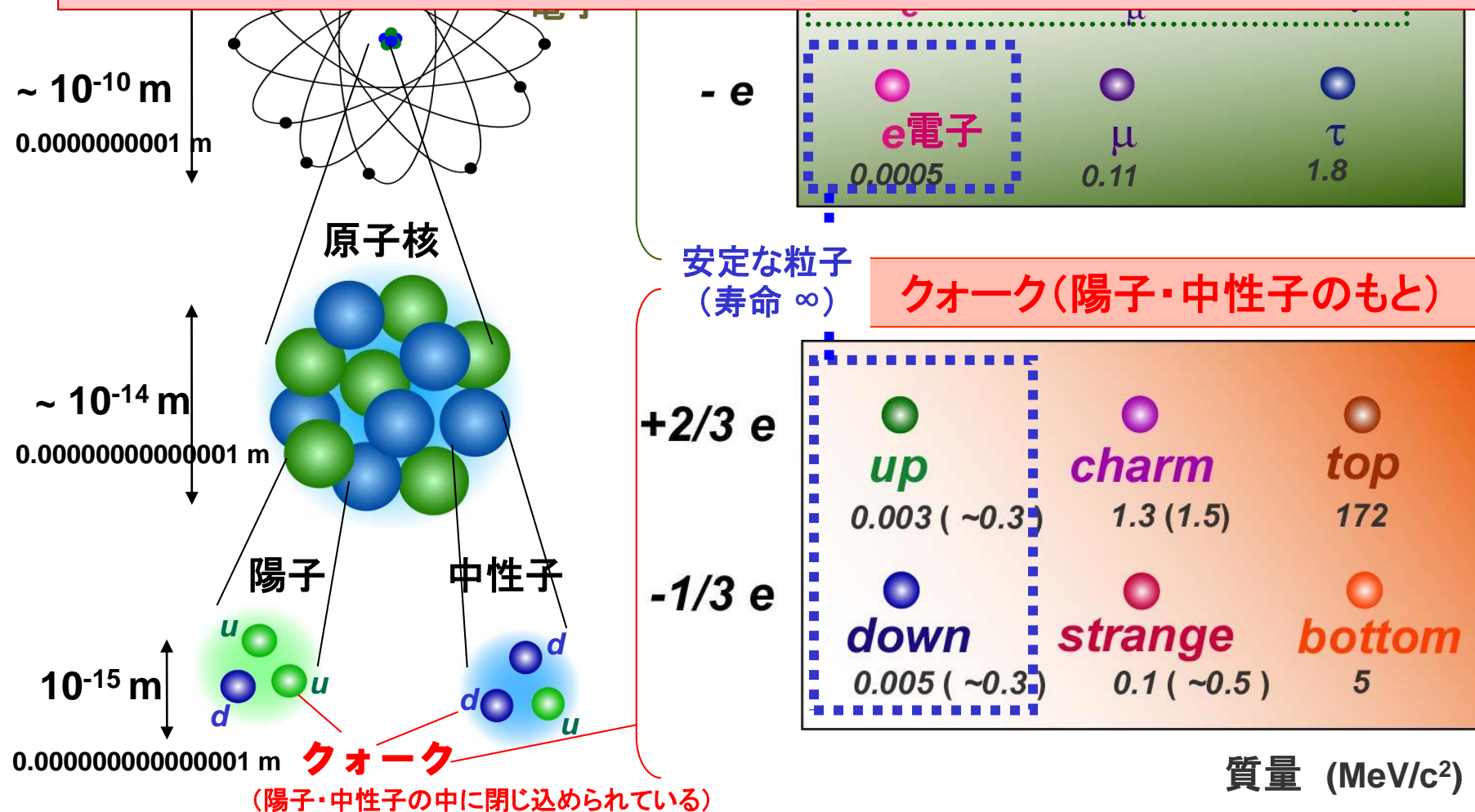


		レプトン(電子の仲間)		
電荷	0	<< 0.000002 ニュートリノ		
		$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$
	- e	e 電子 0.0005	$\mu$ 0.11	$\tau$ 1.8
安定な粒子 (寿命 ∞)		クォーク(陽子・中性子のもと)		
	+2/3 e	up 0.003 (~0.3)	charm 1.3 (1.5)	top 172
	-1/3 e	down 0.005 (~0.3)	strange 0.1 (~0.5)	bottom 5
		質量 (MeV/c <sup>2</sup> )		

現在この宇宙に存在する“物質”は、すべて  
原子から成る。

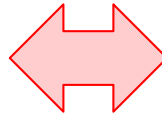
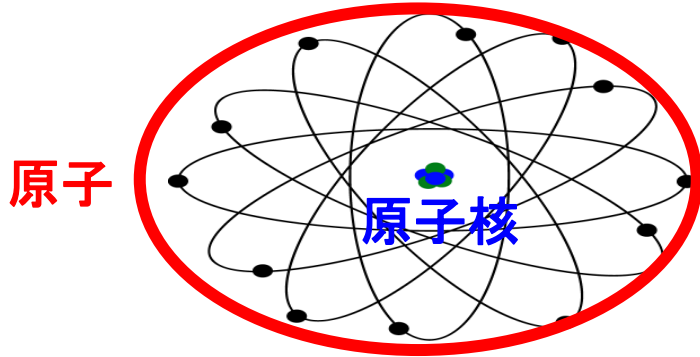
= up, down クォークと電子で出来ている。

## 「20世紀の物質観」



# 原子核の大きさと密度

鉄原子核は、鉄原子の  
約1/30000の大きさ

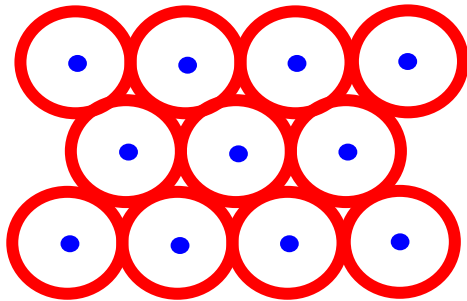


東京ドーム  
(直径200m)



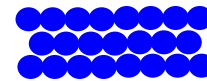
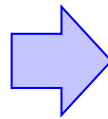
電子はめちゃくちゃ軽いので、原子の質量は、ほぼ原子核の質量と同じ

物質 (固体)



鉄の密度  $\sim 8 \text{ g/cm}^3$

もし原子核だけ  
集めたら



空想の世界?

密度は  $30000 \times 30000 \times 30000 \sim 3 \times 10^{13}$  倍  
 $\therefore$  原子核密度  $\sim 2 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$  (2億トン/cm<sup>3</sup>)

## 2. 中性子星とは？ その中身の物質は？

超新星残骸カシオペアAと、その中心にある中性子星



# 宇宙での<sup>9</sup>物質の進化

ビッグバン 素粒子(クォーク)の誕生

陽子(ハドロン)の誕生

水素原子の誕生

物質進化の最終形

中性子星

ブラックホール

物質進化の最後の姿を我々は知らない

星間ガス

原始星

物質進化の“輪廻”

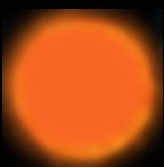
原子核(元素)の合成

恒星 (主系列星)

赤色超巨星

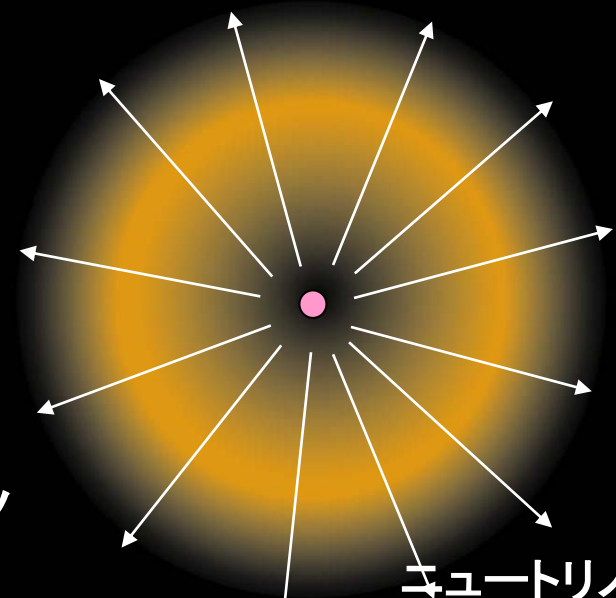
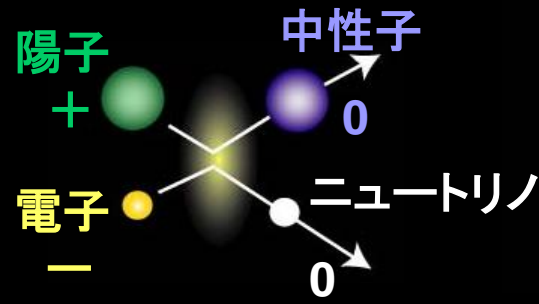
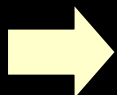
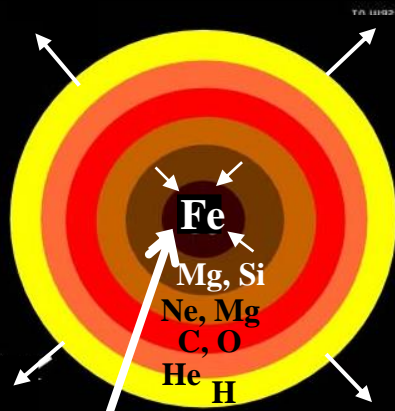
超新星爆発

超新星残骸



# 超新星爆発

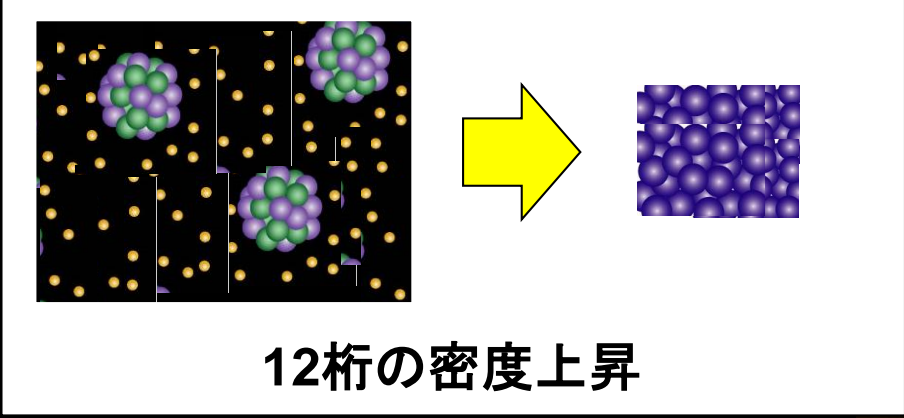
## 赤色超巨星



ニュートリノ (小柴先生が観測)



## カシオペアA



## 超新星残骸



## 中性子星

# 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)

正確な周期的 ( $T=1.337301$ 秒) パルス電波を観測

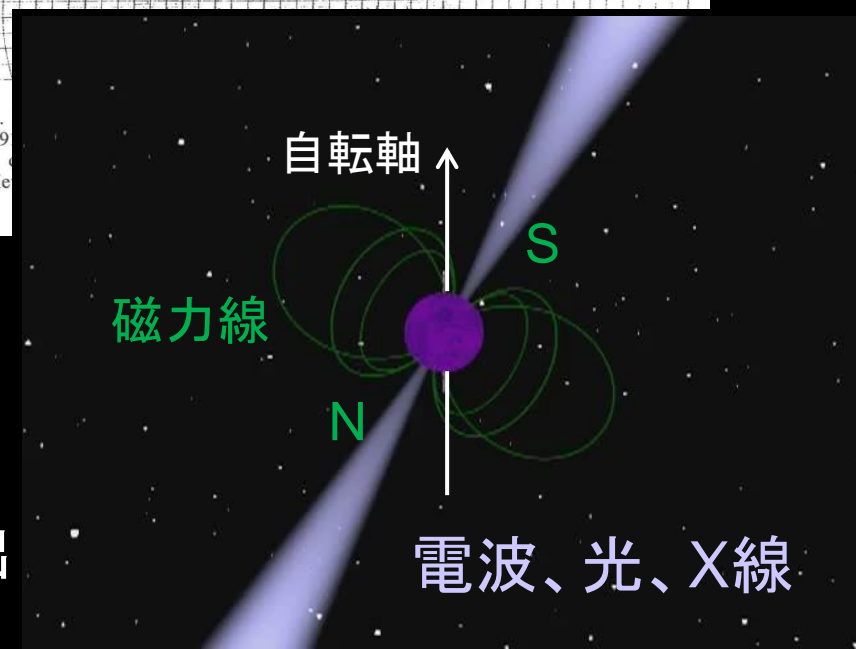
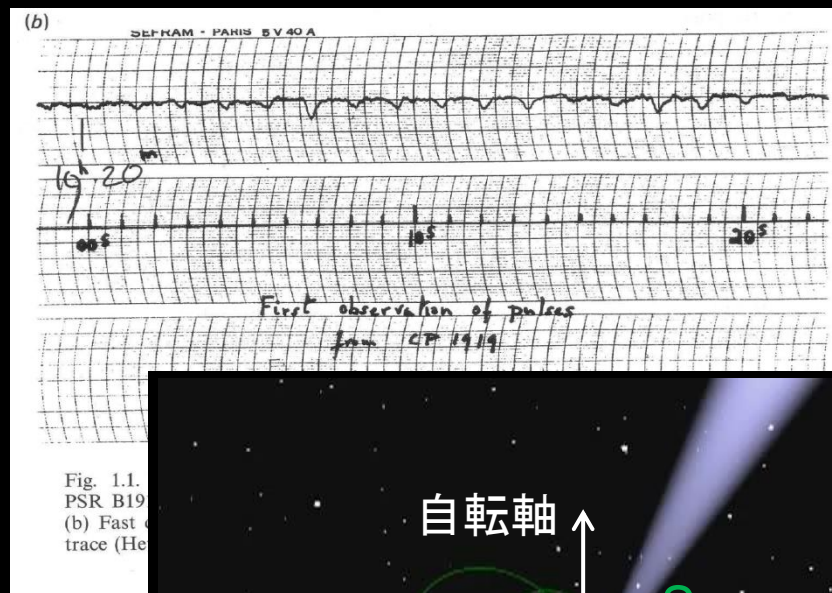
ヒューイッシュはノーベル賞



PSR1919+21



アンテナのアレイ  
(電波望遠鏡)



宇宙人からの信号？

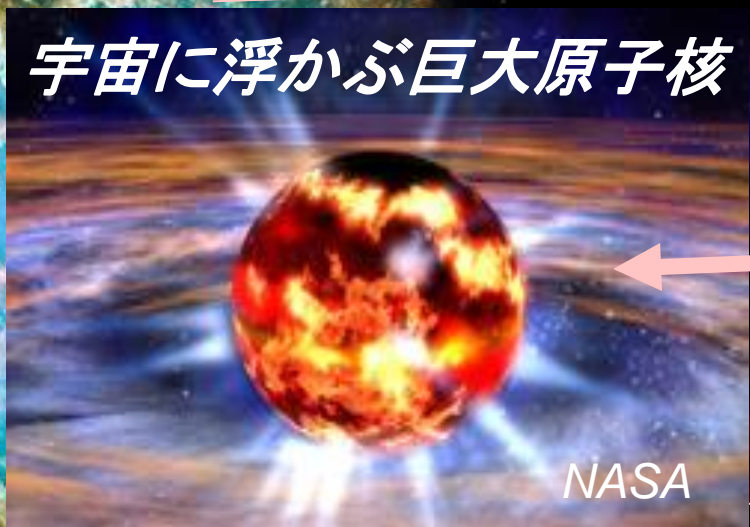
→ 高速で自転する中性子星が放出

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



X線で見ると NASA



■ “パルサー”  
として多数観測

- 質量: 太陽の1~2倍
- 半径: 約10~15 km

- 宇宙で最高の密度: 10~30億トン/cm<sup>3</sup> 原子核密度の数倍~10倍

東京ドーム2000杯分の土を角砂糖1個の大きさに圧縮

中性子星とは、巨大原子核が、重力でさらに圧縮されたもの  
 ただし、陽子がたくさんあると反発して壊れるので、ほぼ中性子だけのはず  
 (陽子+電子 => 中性子に変化できる)

# 「中性子星」は中性子だけでできている？

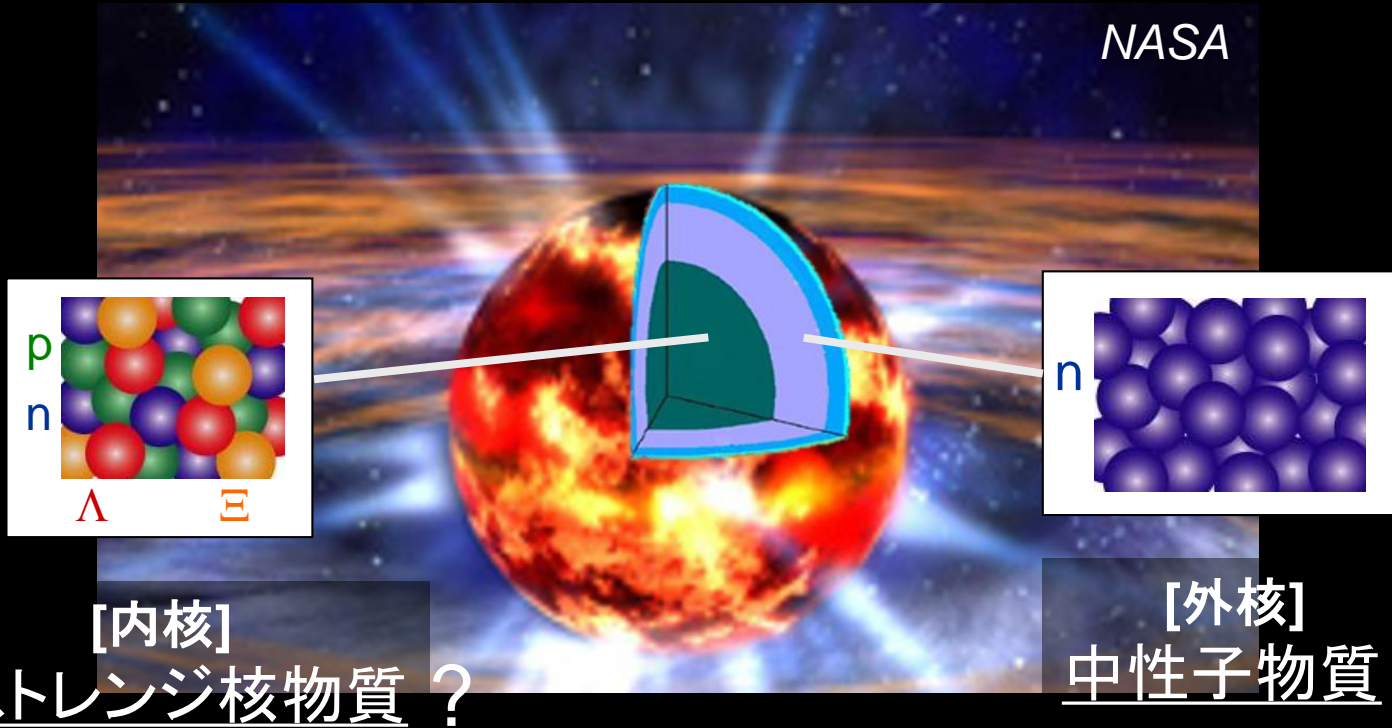


皮と中身が違うかも？

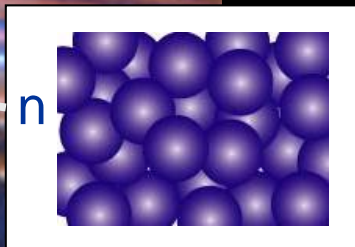
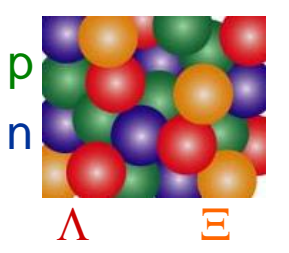


さらに変なものはいっている？

# 中性子星内部の 世にも不思議な未知物質(現在の予想)



NASA



[内核]

スレンジ核物質 ?

[外核]

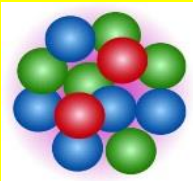
中性子物質

3番目のクォーク (スレンジクォーク) を含む粒子  
( $\Lambda$  粒子、 $\Xi$  粒子) と陽子・中性子の集合体

ほぼ中性子だけでできた物質  
超流動状態か

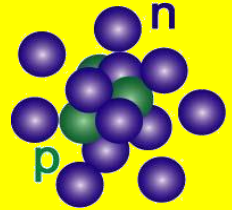
人類が知らなかった (太陽系に存在しない)  
まったく新しい姿の物質たち

# 中性子星内部の 世にも不思議な未知物質(現在の予想)

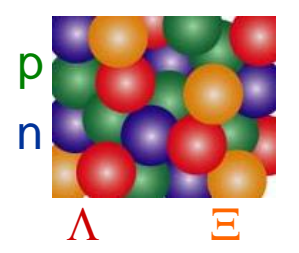


ハイパー核

“ミニ中性子星”  
を作って調べよう

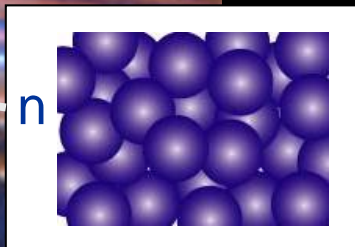


中性子過剰核



[内核]  
ストレンジ核物質 ?

3番目のクォーク(ストレンジクォーク)を含む粒子  
( $\Lambda$ 粒子、 $\Xi$ 粒子)と陽子・中性子の集合体



[外核]  
中性子物質

ほぼ中性子だけでできた物質  
超流動状態か

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

# 3. J-PARCで ≡二中性子星を作る！



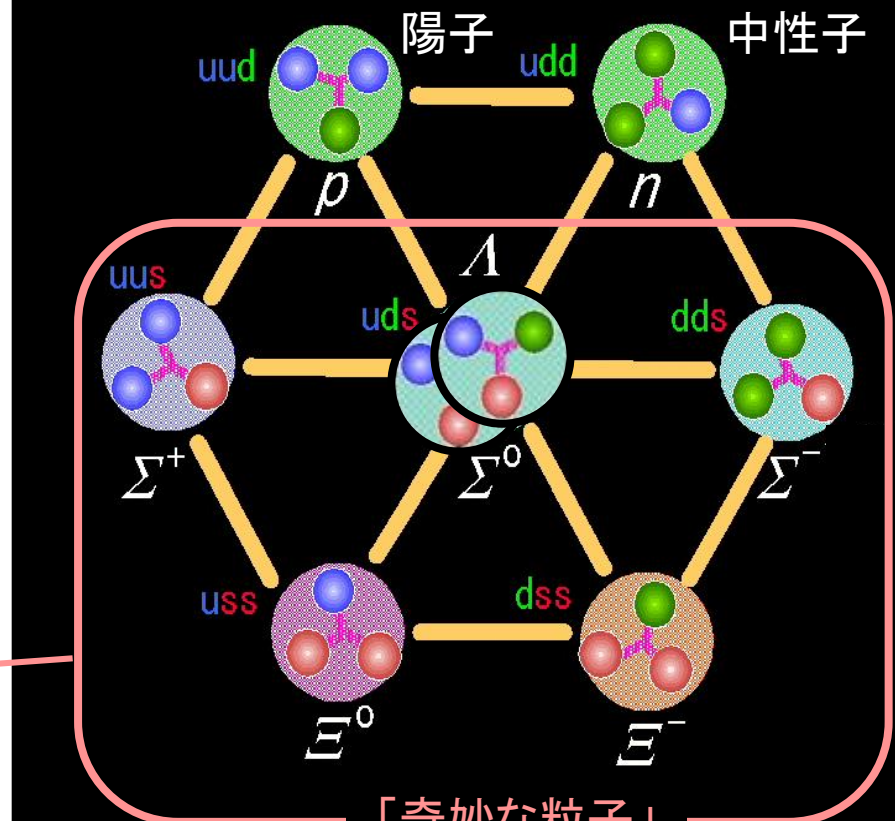
大強度陽子加速器 J-PARC



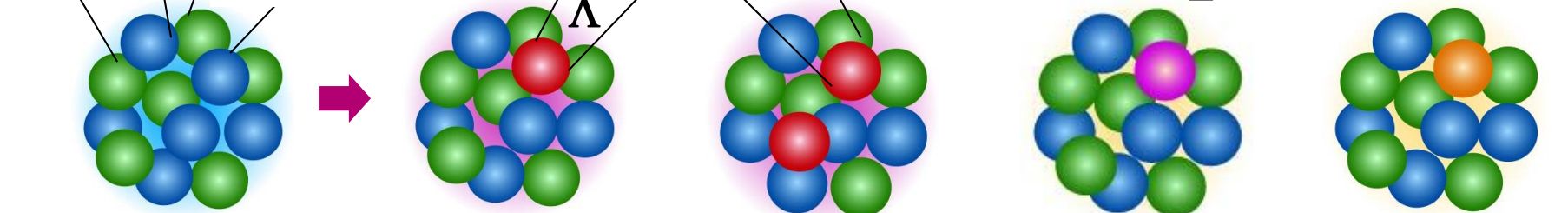
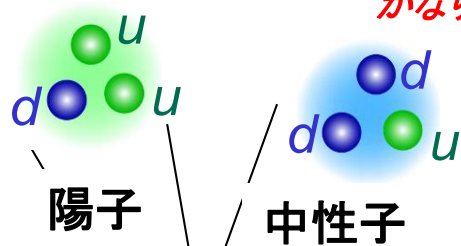
# ストレンジ・クォークと ハイパー核

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

比較的長い寿命 (~10<sup>-10</sup>s)、  
かなり容易に作れる



「奇妙な粒子」  
2割くらい重いので、陽子・中性子からこれらに変化できない

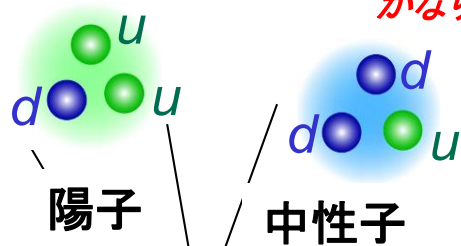
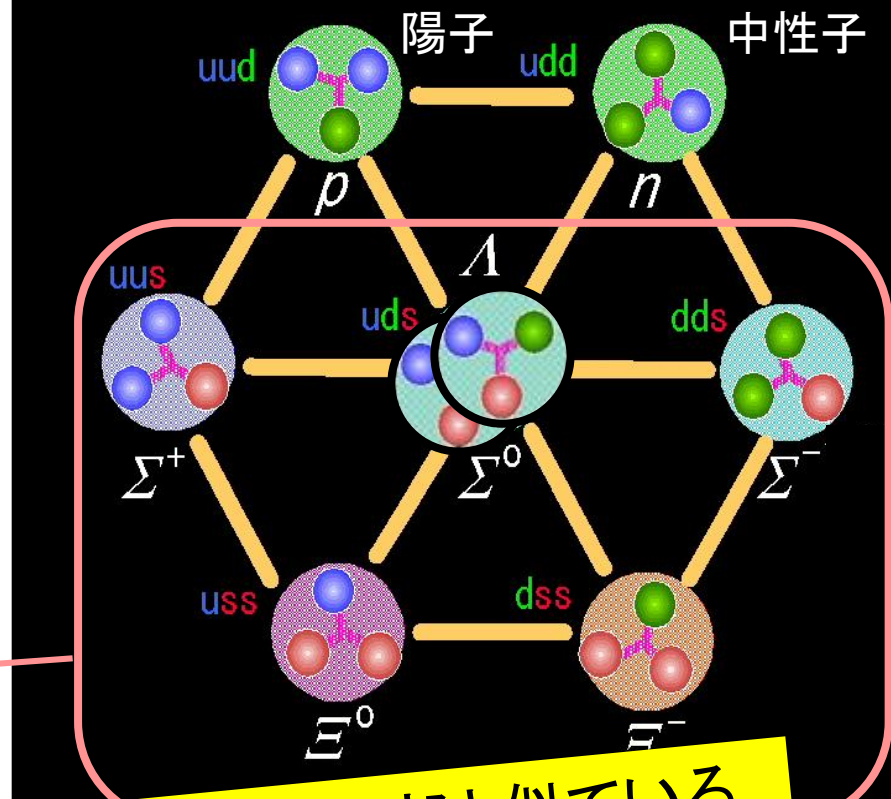


通常核      Λハイパー核      ΛΛハイパー核      Σハイパー核      Ξハイパー核

# ストレンジ・クォークと ハイパー核

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

比較的長い寿命 (~10<sup>-10</sup>s)、  
かなり容易に作れる



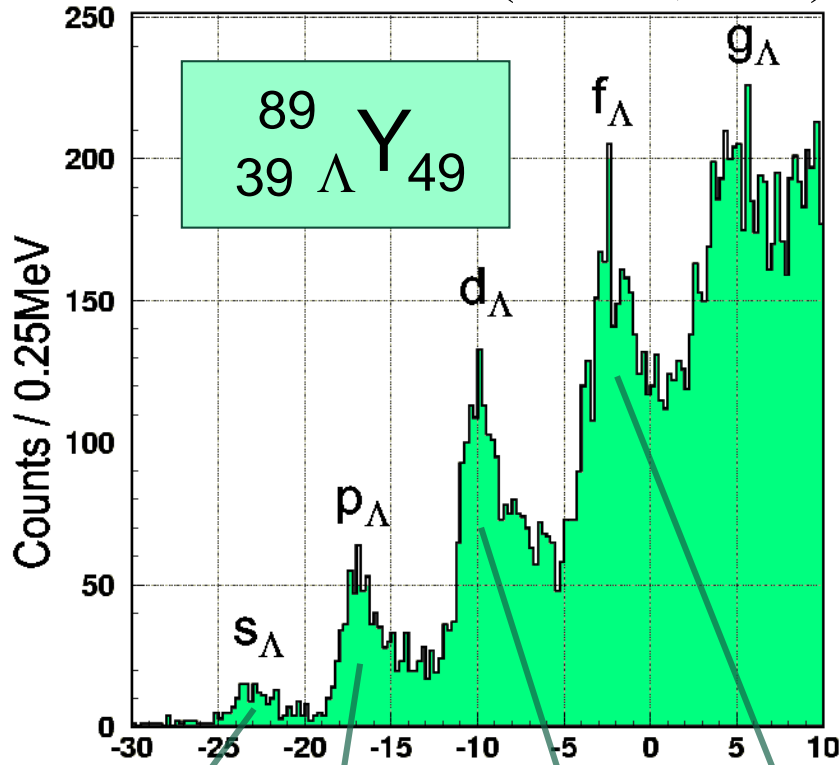
これらは中性子星中心部と似ている  
ハイパー核 = “ミニ中性子”



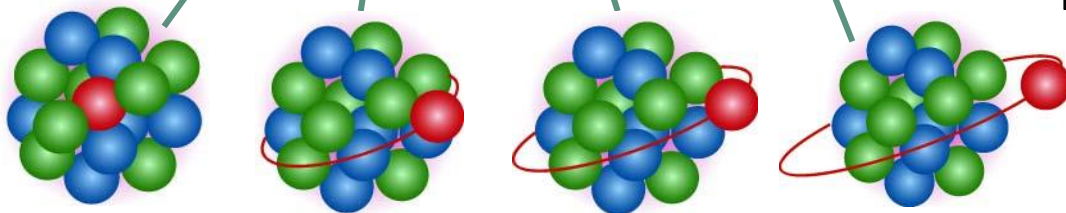
できない

# ハイパー核で中性子星を調べる

われわれのデータ (2001年, KEK)



ハイパー核質量 (励起エネルギー) (MeV)



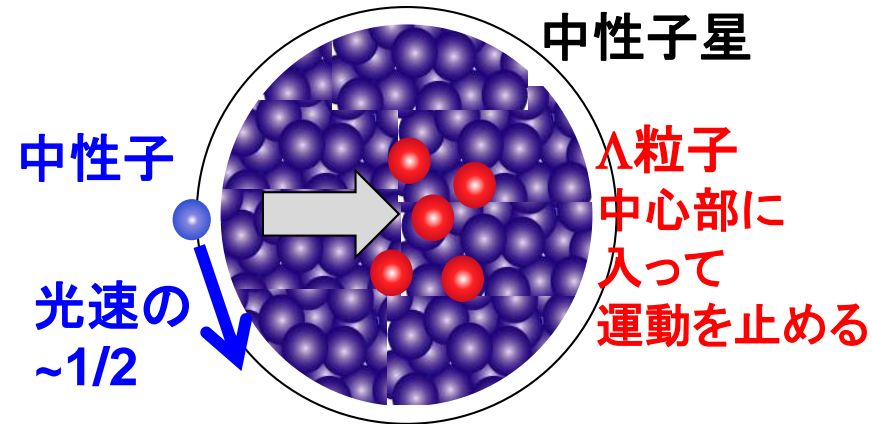
核内で陽子・中性子は引力を受けてそれぞれの軌道を回っている。

Λ粒子も引力を受けて回る → エネルギーから引力の強さがわかる

Λ粒子は中性子より質量が2割も重い

通常の世界では: 中性子 → Λ粒子 ×

中性子星内部では: 中性子 → Λ粒子 ○



中性子は、回転の運動エネルギー  $E$  を質量に変えることで

$E = Mc^2$  の質量  $M$  だけ重くなれる:

中性子 → Λ粒子

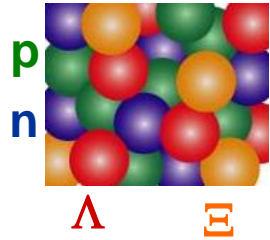
変化の度合いは  
Λ粒子・中性子の間の  
引力の強さによる

→ 詳しい研究が必要

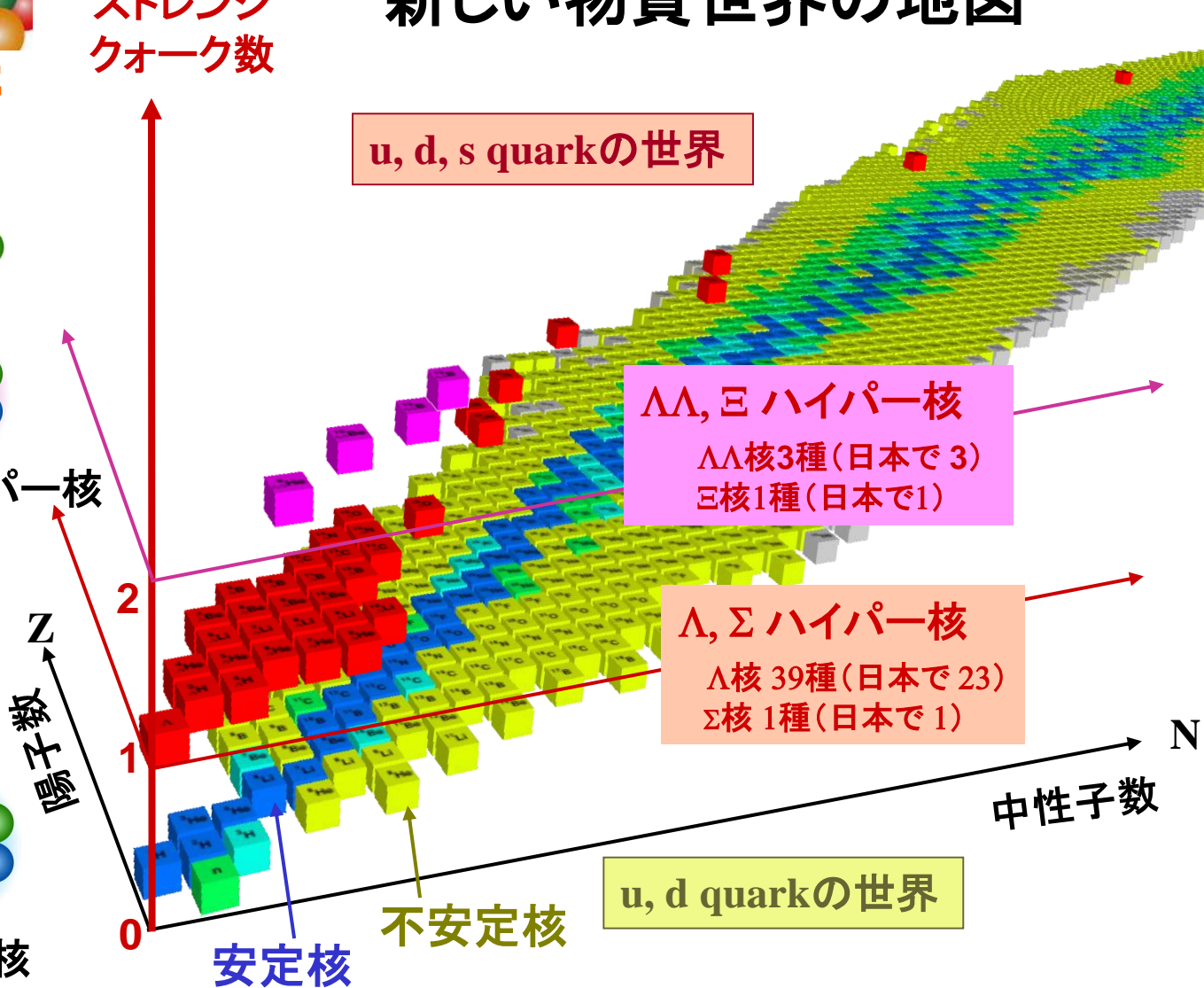
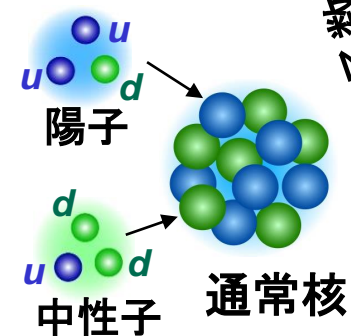
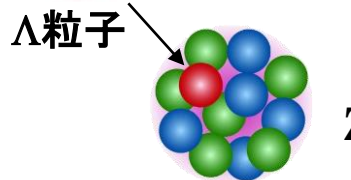
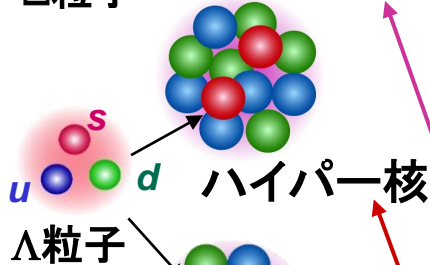
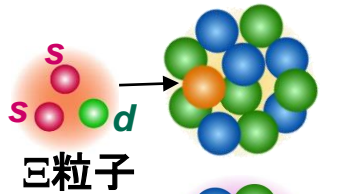
# 3次元核図表

## 新しい物質世界の地図

ストレンジ核物質



ストレンジ  
クォーク数



u, d, s quarkの世界

ΛΛ, Ξ ハイパー核

ΛΛ核3種(日本で3)  
Ξ核1種(日本で1)

Λ, Σ ハイパー核

Λ核 39種(日本で23)  
Σ核 1種(日本で1)

u, d quarkの世界

安定核

不安定核

Z  
陽子数

N  
中性子数

# 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

30 GeV  
シンクロトロン

3 GeV  
シンクロトロン

原子核素粒子実験施設  
(ハドロン施設)

400 MeV  
線形加速器 (350m)

ニュートリノ実験施設



60m x 56m

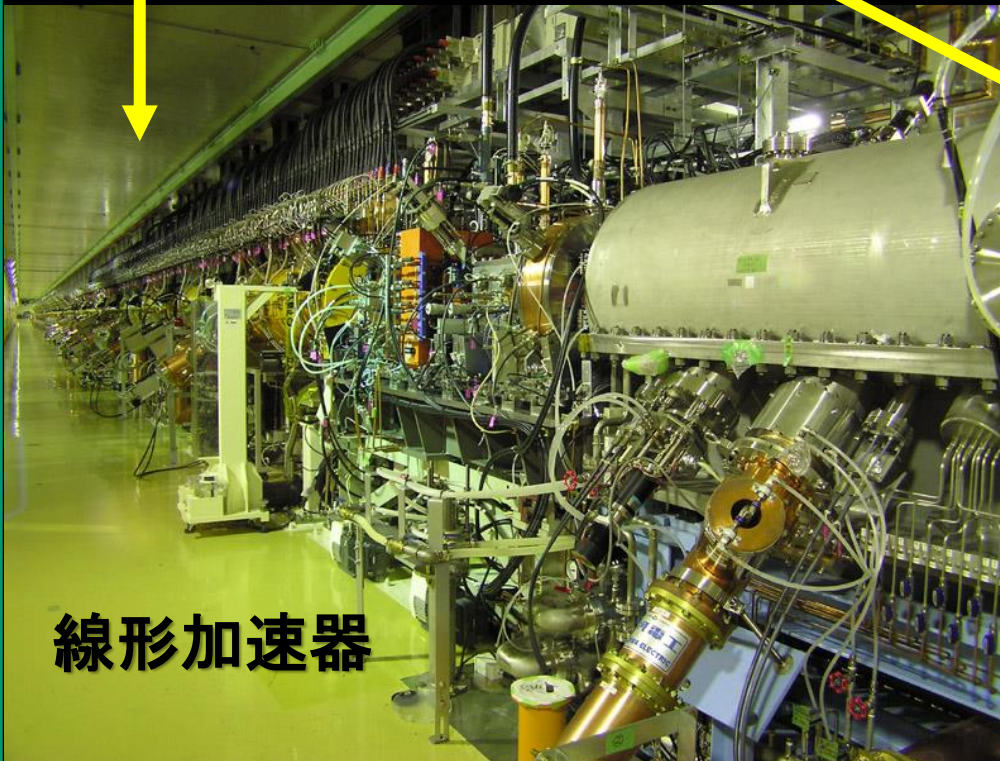
世界最大のビーム強度(陽子数)  
従来の加速器の 10~100倍

中性子星内部の物質を  
調べる実験が進行中

# J-PARCの加速器



30 GeV  
シンクロトロン

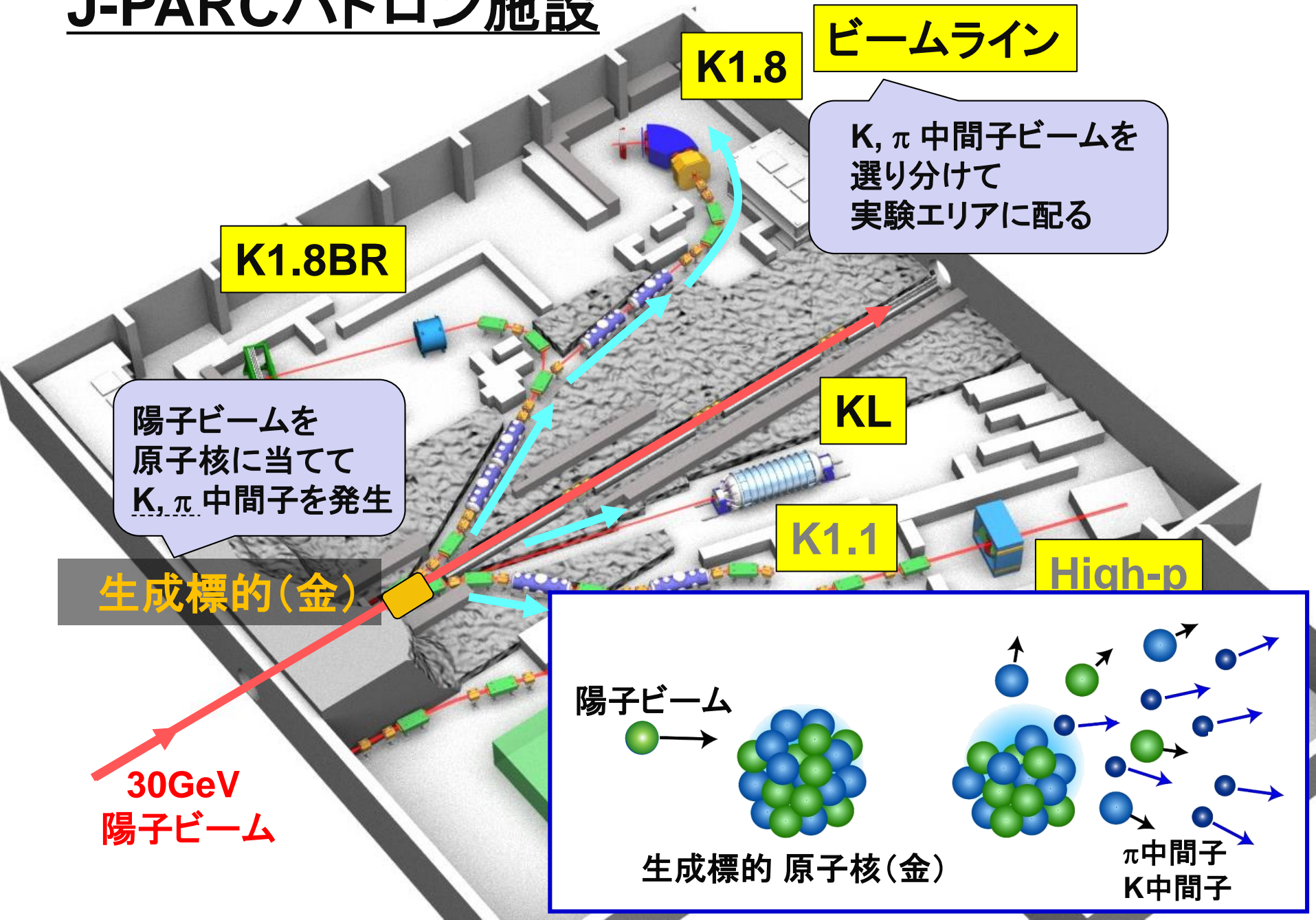


線形加速器

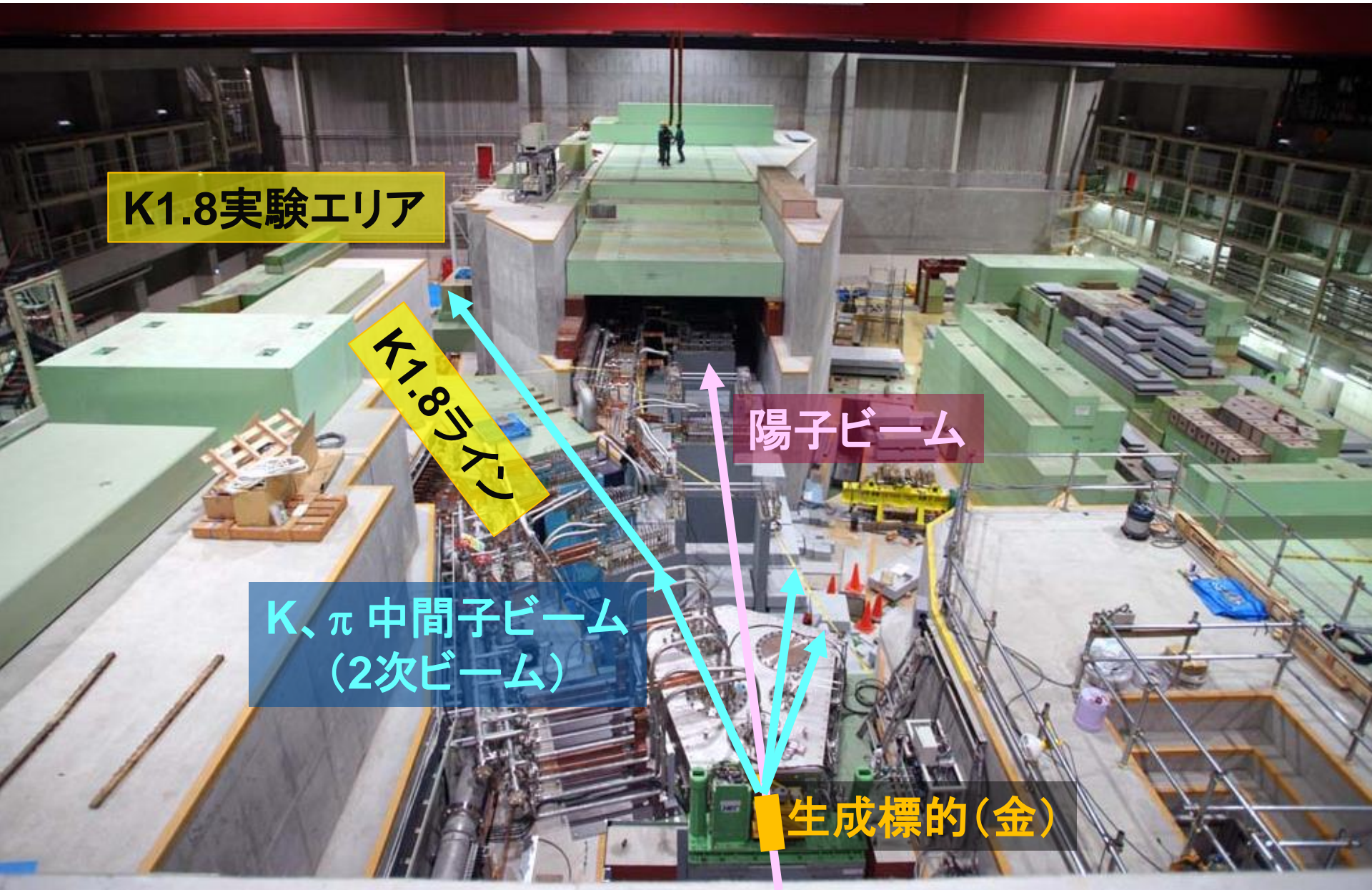
3 GeV  
シンクロトロン



# J-PARCハドロン施設



# J-PARCハドロン施設の内部



K1.8実験エリア

K1.8ライン

陽子ビーム

K、 $\pi$  中間子ビーム  
(2次ビーム)

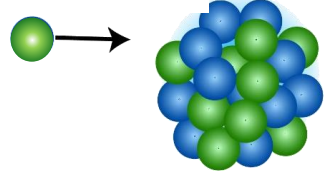
生成標的(金)



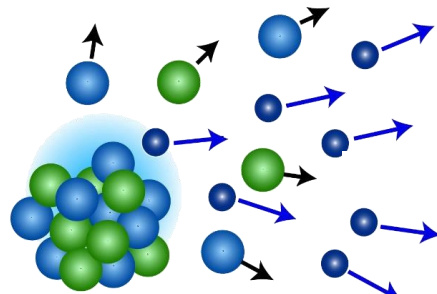
# ハイパー核の作り方

生成標的

陽子ビーム



生成標的原子核(金)

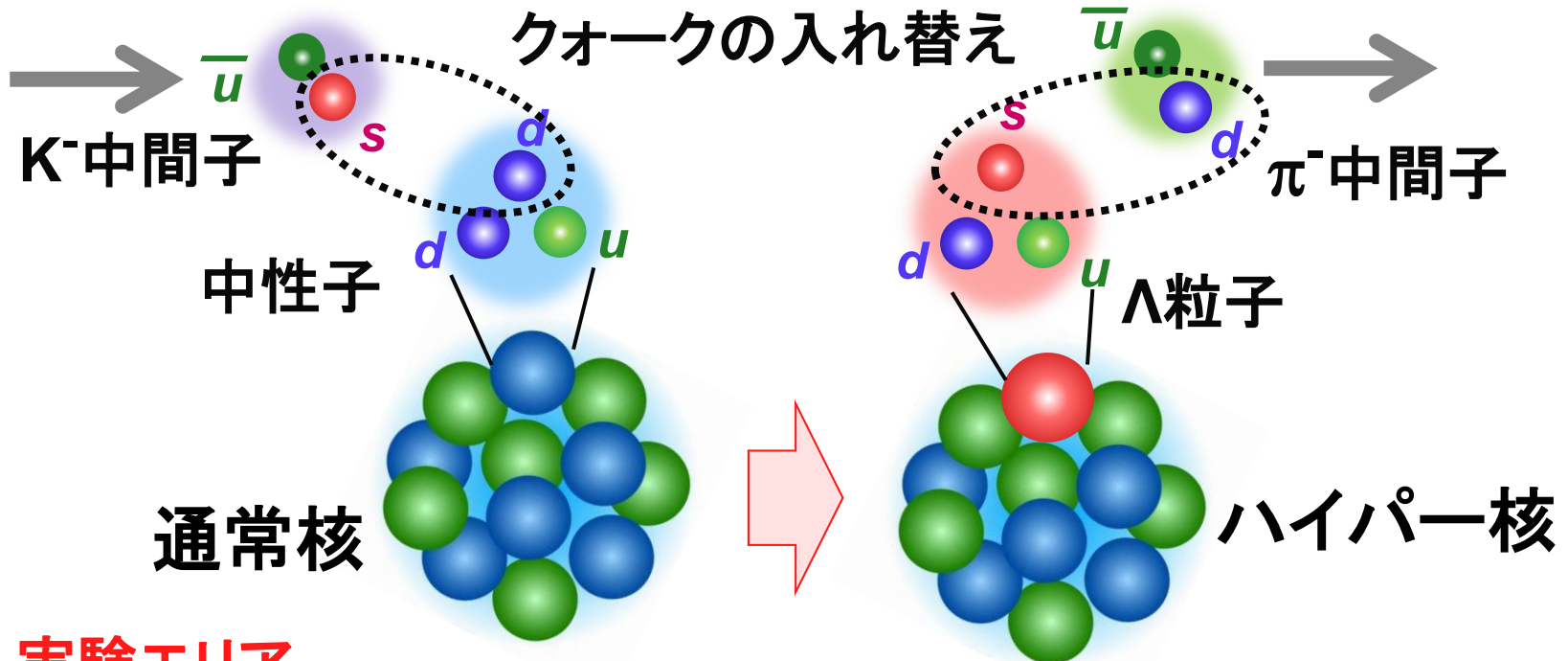


$\pi$ 中間子  
K中間子

K<sup>-</sup>中間子(sクォークを含む)  
を選んで実験エリアへ

K<sup>-</sup>→ $\pi^-$ の変化が  
 $\Lambda$ 粒子のできた証拠

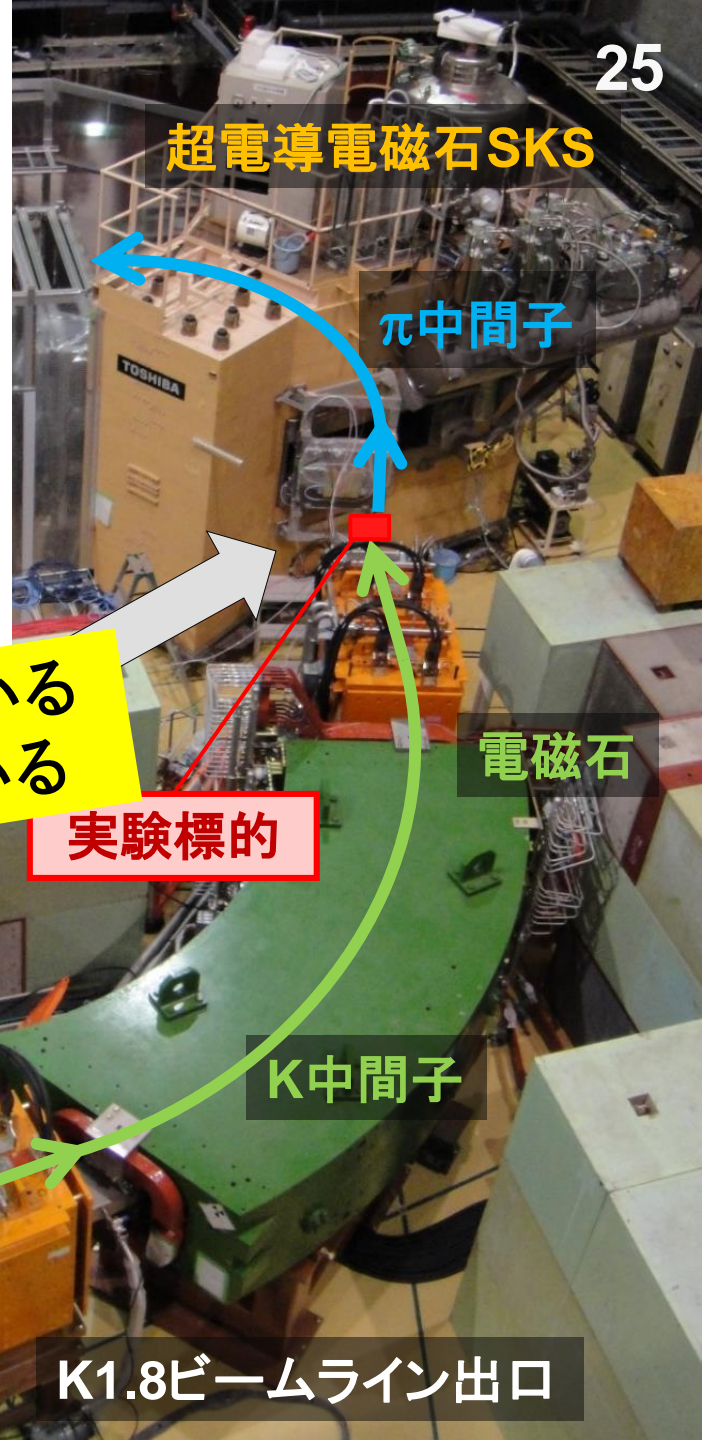
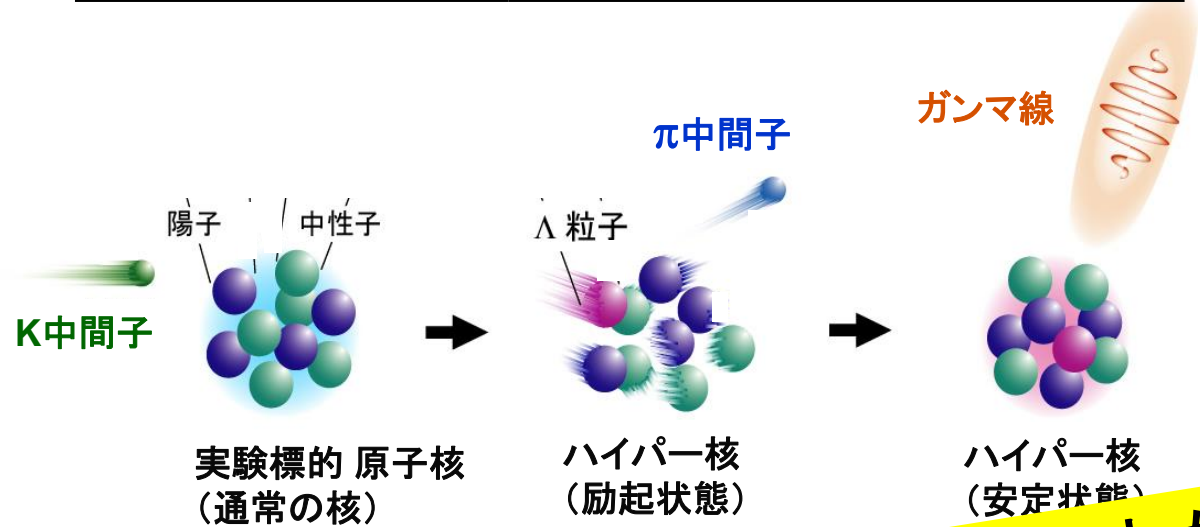
K<sup>-</sup>と $\pi^-$ のエネルギー測定  
→ハイパー核のエネルギー(質量)



実験エリア

# 実験例

## ハイパー核の発する“光”をとらえる



核内の $\Lambda$ 粒子の動きが手に取るようにわかる  
→  $\Lambda$ と陽子・中性子間の力(核力)がわかる

新型ガンマ線検出器  
Hyperball-J



# 実験例

## ハイパー核の発する“光”をとらえる

新型ガンマ線検出器  
Hyperball-J



装置を開発した東北大メンバー

実験チーム (E13)  
(東北大、京大、阪大、ソウル大、高麗大、  
KEK、原科研、トリノ大など)



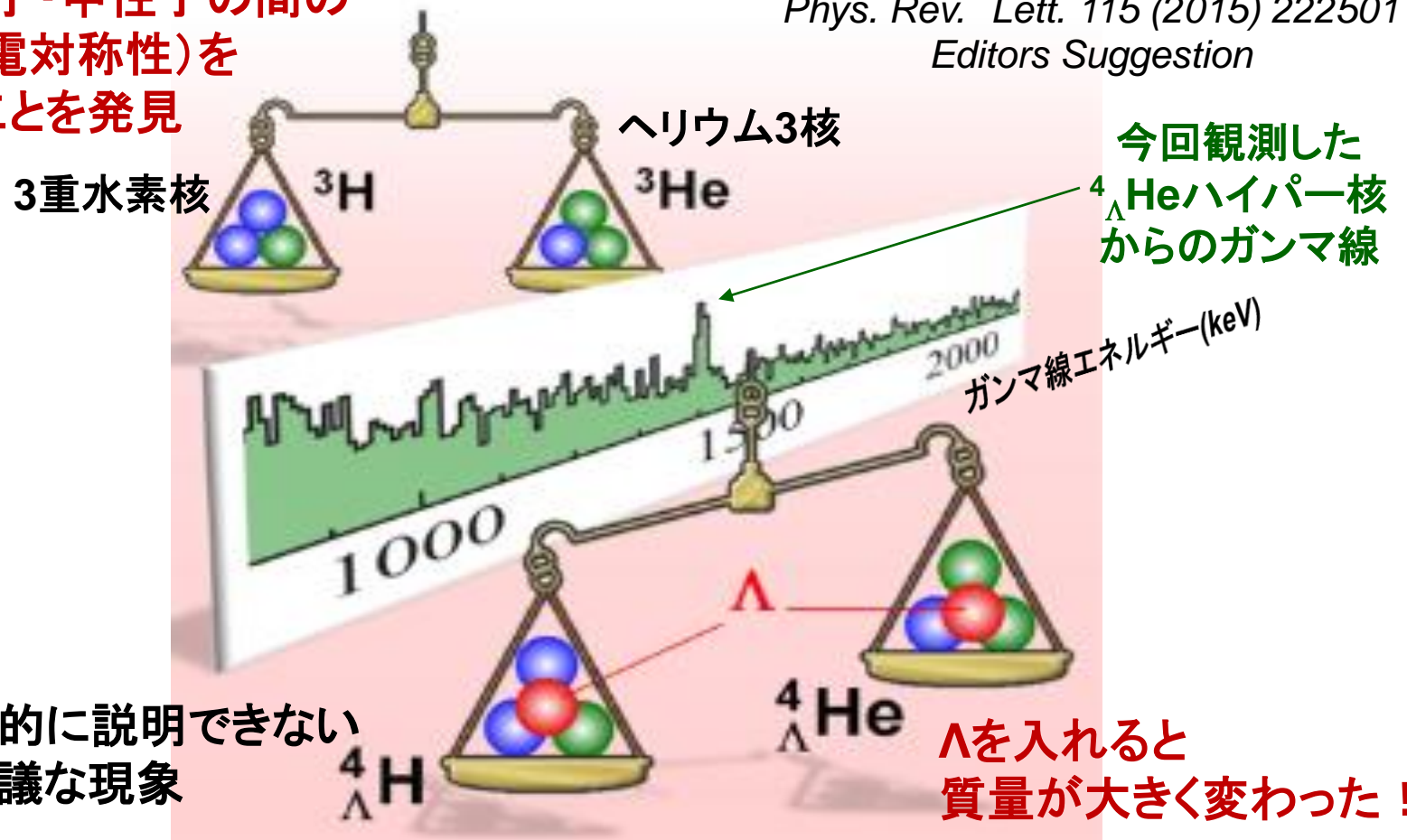
# 実験例

## ハイパー核の発する“光”をとらえる

### 最近の成果

**Λ粒子が陽子・中性子の間の対称性(荷電対称性)を大きく破ることを発見**

T.O. Yamamoto et al.,  
Phys. Rev. Lett. 115 (2015) 222501  
Editors Suggestion



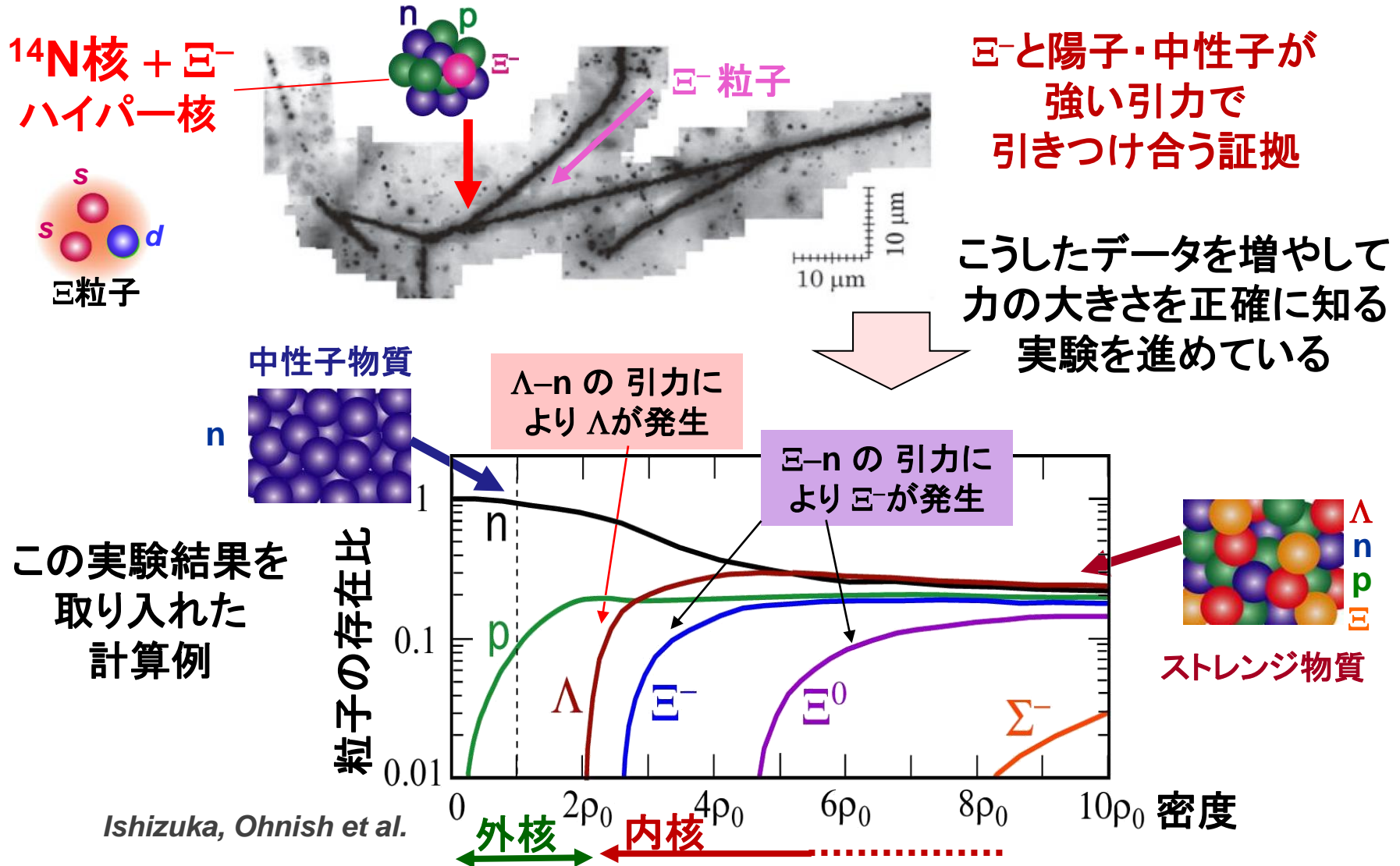
いまだに理論的に説明できない  
不思議な現象

**Λを入れると  
質量が大きく変わった！**

中性子星内部(中性子ばかり)ではどうなる??

# $\Lambda$ 以外のストレンジ粒子は？

最近われわれが発見した世界初の  $\Xi$ ハイパー核 (写真乾板中)



# 4. 今後は？

## —重力波観測との連携

ほ座 ベラ・パルサー

# 重力波で中性子星合体が観測された！



朝日新聞 DIGITAL

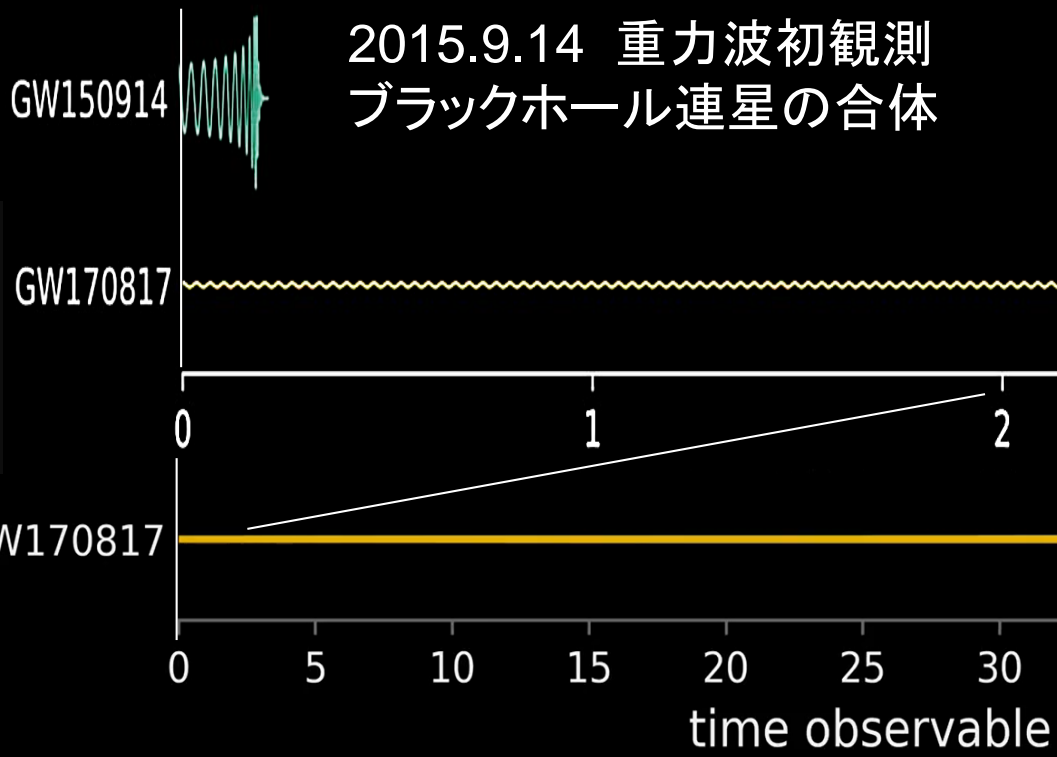
検索 目次

トップニュース スポーツ カルチャー 特集・連載 オピニオン

新着 天声人語 社会 政治 経済・マネー 国際 テック&サイエンス 環境・エネルギー 地域

朝日新聞デジタル > 記事 有料会員限定記事

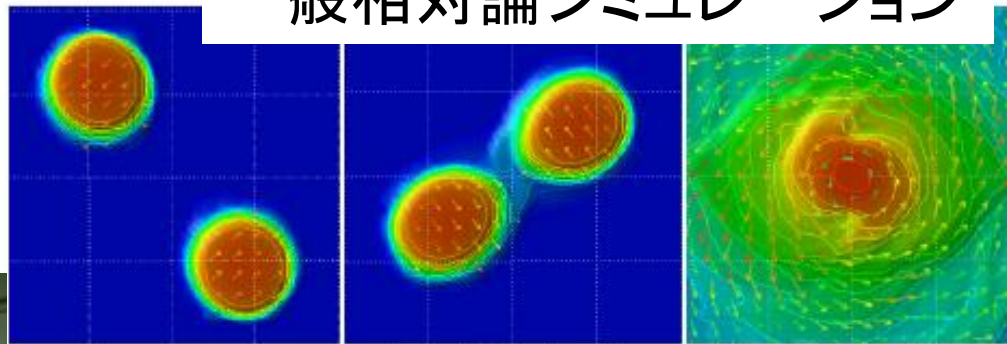
今年の科学「中性子星の合体観測」1位 サイエンス誌、10大ニュース



2017.8.17  
中性子星連星の合体

# 重力波で中性子星の硬さがわかる

中性子星連星の合体の重力波  
一般相対論シミュレーション



木内、関口(京大基研)  
物理学会誌 2012 より

インスパイラル

潮汐変形

合体&振動

さらなる中性子星合体の重力波観測に期待

中性子星はぶよぶよか、こちこちか？

Time [ms]

ここの波形は中性子星の硬さによって大きく変わる

ストレンジ粒子があると、物質は柔らかくなる

→ ストレンジ物質の観測的証拠が得られるかも



# 中性子星内部を解明するシナリオ

天体観測

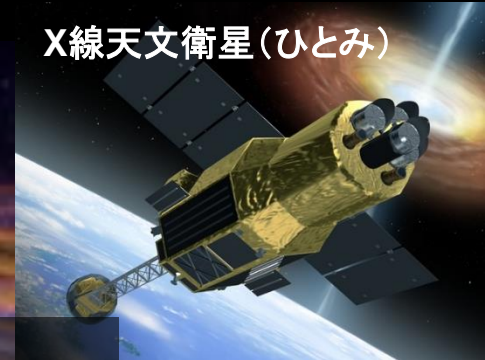
電磁波 (ガンマ線、X線、可視光、赤外線、電波)  
重力波

重力波検出器 (KAGRA)



NASA

X線天文衛星 (ひとみ)



理論

理論天体物理学

一般相対性理論、原子核・素粒子理論、物性理論

NASA

地上実験

ハイパー核など特殊な原子核の性質

陽子加速器 (J-PARC)

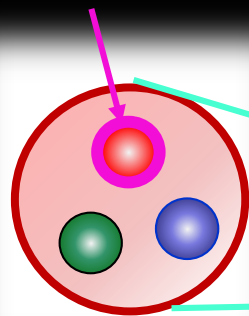


重イオン加速器 (理研RIビームファクトリー)

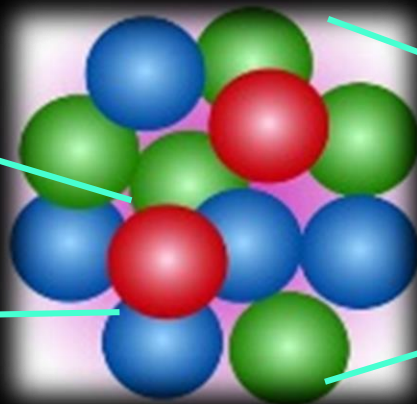


# 5. おわりに

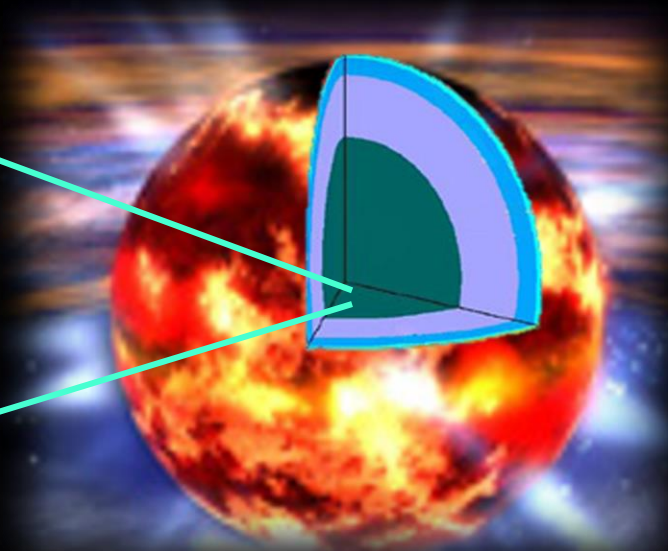
ストレンジクォーク



ストレンジ粒子



ハイパー核



中性子星

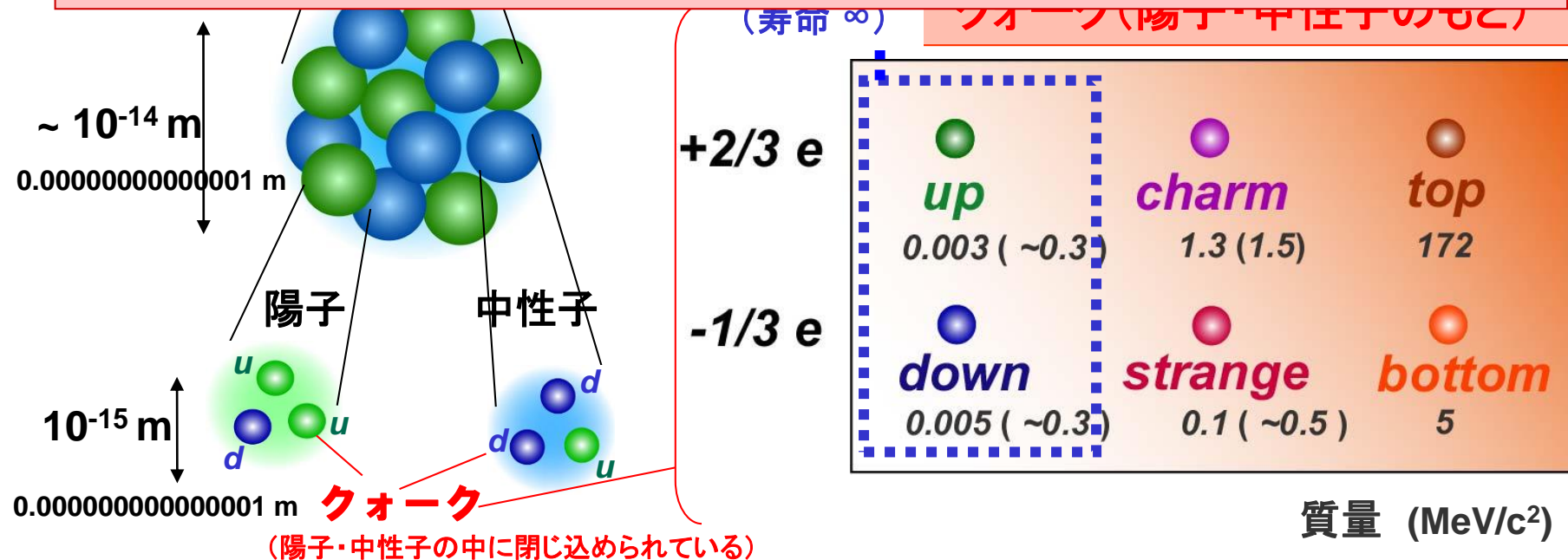
現在この宇宙に存在する“物質”は、すべて  
原子から成る。

= up, down クォークと電子で出来ている。

「20世紀の物質観」

- 原子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世紀の物質観」へ



# まとめ

- 中性子星は巨大原子核。原子核の地上実験で中性子星の内部の様子がわかる。
  - ハイパー核の実験データから、中性子星中心部に“ストレンジクォーク”の存在が予想される。
  - J-PARCでは、ハイパー核＝“ミニ中性子星”を作り、その性質を調べることで、中性子星内部の物質を解明しようとしている。
  - 重力波やX線天文学との連携で今後解明が加速される。
  - 「宇宙にはストレンジクォークを含む物質もある」という、“21世紀の新しい物質観”がもたらされるかも知れない。
  - ハイパー核の分野は、日本(J-PARC)が世界を圧倒的にリード
- ぜひ、ハドロン施設の見学を！



編集 日本物理学会

伊藤好孝(名古屋大学)、田村裕和(東北大学)

第1章 宇宙と物質の起源をさかのぼる  
.....杉山 直(名古屋大学)

第2章 質量の起源を知る -- ヒッグス粒子発見のインパクト  
.....徳宿克夫(高エネルギー加速器研究機構)

第3章 反物質はどこへ  
——素粒子実験が挑む物質優勢宇宙の謎  
.....市川温子(京都大学)

第4章 クォークの熱いスープから原子核へ  
——4兆度の初期宇宙の再現  
.....平野哲文(上智大学)

第5章 元素合成の謎 超新星爆発がウランをうみだしたのか?  
.....櫻井博儀(東京大学・理化学研究所)

第6章 分子の誕生と星間物質  
.....坂井南美(東京大学)

第7章 太陽系の起源  
.....小久保英一郎(国立天文台)

第8章 宇宙の生体物質 —生命の起源を求めて  
.....大石雅寿(国立天文台)

第9章 中性子星の奇妙な物質  
.....田村裕和(東北大学)

第10章 ダークマターの正体をあばく  
.....伊藤好孝(名古屋大学)