

物理学への招待

2019. 5. 14

原子核物理学

素粒子から物質が作られる 謎に挑む

理学研究科物理学専攻
素粒子・核物理学講座(原子核物理研究室)

田村 裕和

Email: tamura@lambda.phys.tohoku.ac.jp

<http://lambda.phys.tohoku.ac.jp>

原子核物理学

素粒子から物質が作られる 謎に挑む

内容

1. 宇宙における物質の進化と4つの謎
2. 元素合成の謎
3. 中性子星物質の謎

1. 宇宙における物質の進化と 4つの謎

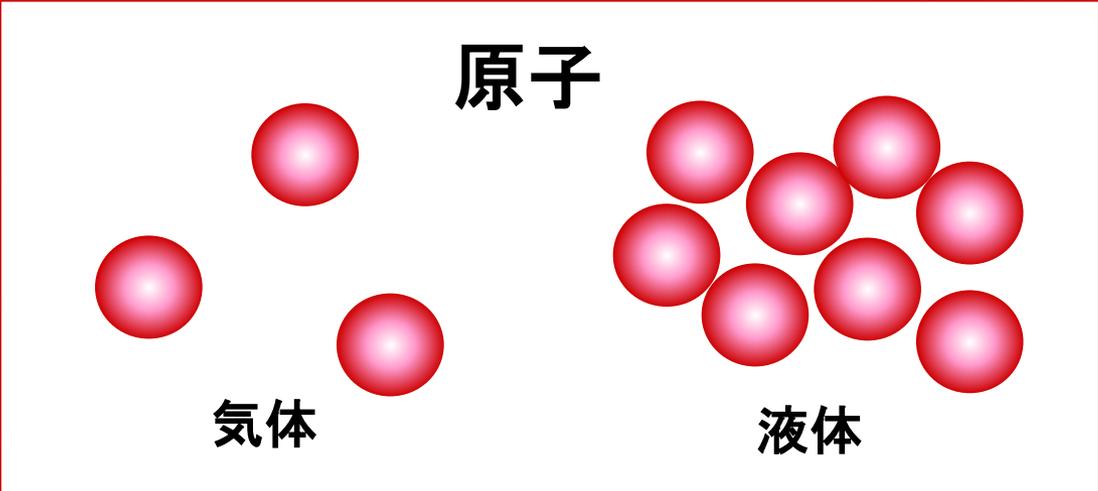
素粒子反応の軌跡

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)

1																	18	
1	2																2	
H																	He	
3	4																10	
Li	Be																Ne	
11	12	3															18	
Na	Mg																Ar	
19	20	21															36	
K	Ca	Sc															Kr	
37	38	39															54	
Rb	Sr	Y															Xe	
55	56	*1															86	
Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
87	88	*2																118

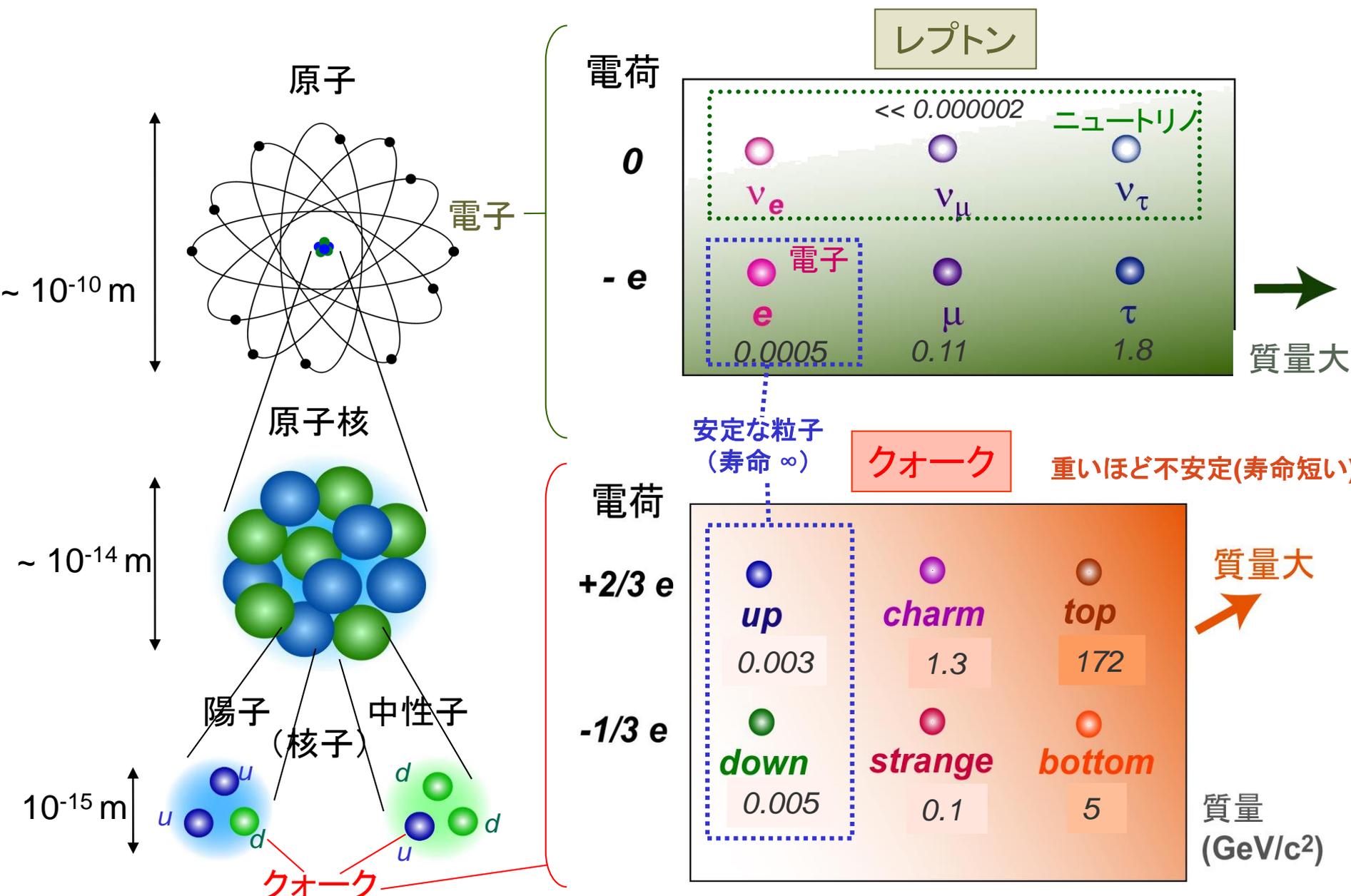


元素＝原子の種類 は、決して変化しない(19世紀の常識)

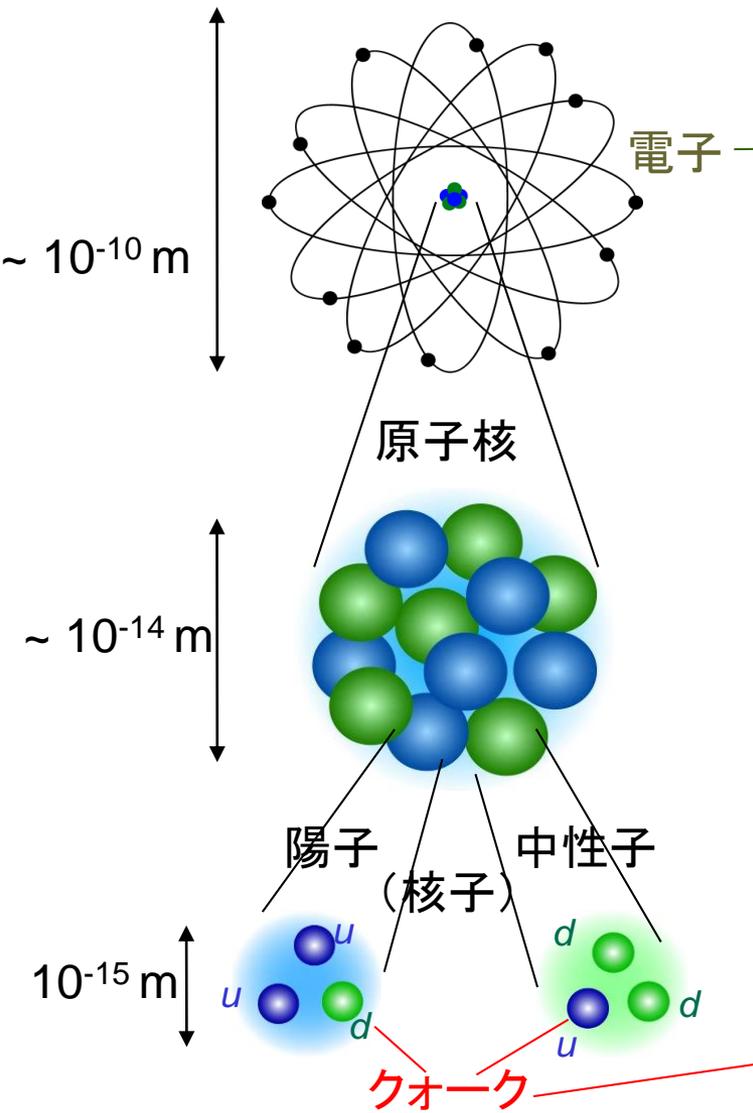
→ 変化することもある(放射性物質、原子核反応)

ベクレル、キュリー夫妻 1998

現在の物質観 クォークとレプトン(素粒子)からなる



この世界の“物質”は、
陽子・中性子(=up, down クォーク)と電子
でできている(20世紀の常識)



0	ニュートリノ $\ll 0.000002$		
	ν_e	ν_μ	ν_τ
-e	電子 e 0.0005	μ 0.11	τ 1.8

質量大

電荷	クォーク			質量大
	重いほど不安定(寿命短い)			
+2/3 e	up 0.003	charm 1.3	top 172	質量 (GeV/c ²)
-1/3 e	down 0.005	strange 0.1	bottom 5	

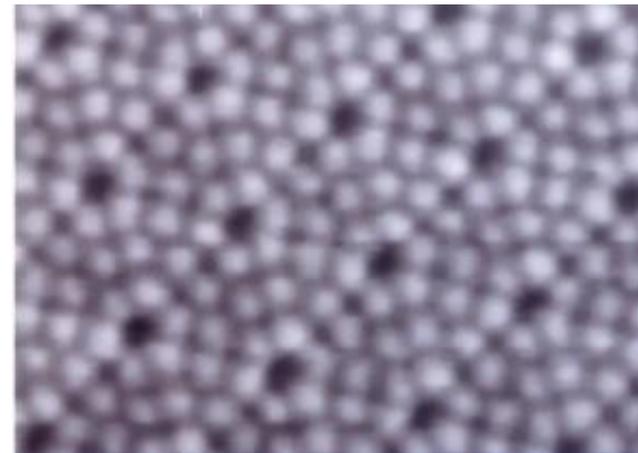
安定な粒子 (寿命 ∞)

原子や原子核は本当にあるのか？

■ “原子仮説” (ドルトン 1803)

化学反応を説明できる
気体の性質を説明できる

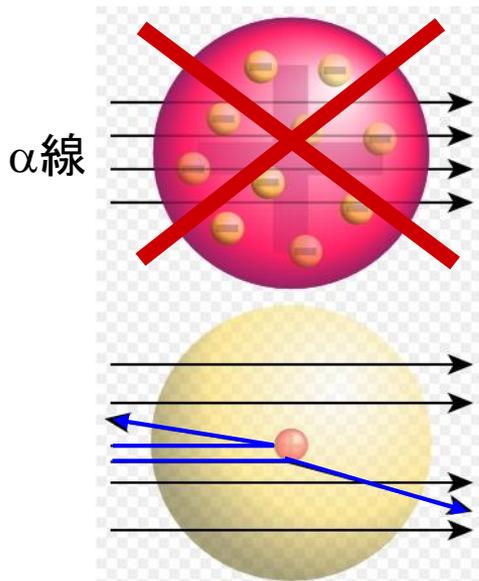
今では
原子は
直接見える



$13 \times 10^{-9} \text{ m}$ (13 nm)
シリコン表面の原子像
(走査型電子顕微鏡写真)

■ 電子の発見 (トムソン 1897)

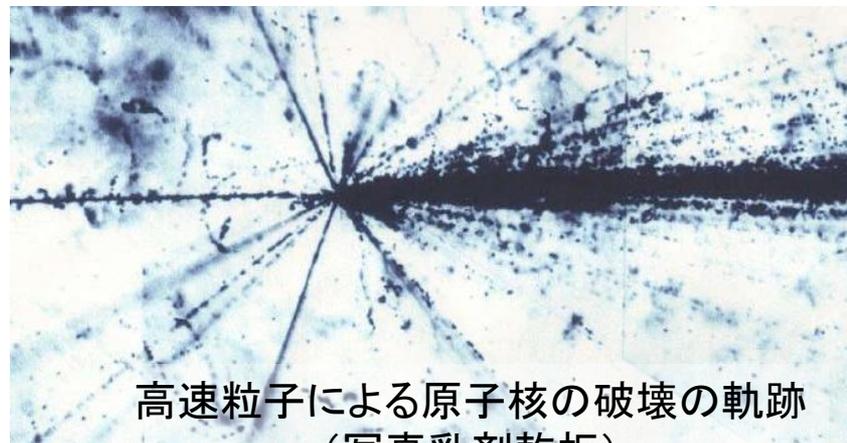
■ 原子核の発見 (ラザフォード 1911)



ときどき原子核に
ぶつかって大きく
跳ね返る

跳ね返り方を詳しく測定
すると、原子核の大きさ
や形が正確にわかる。

原子核をこわすと、陽子や中性子が出てくる



高速粒子による原子核の破壊の軌跡
(写真乳剤乾板)

クォークは本当にあるのか？

クォークは、陽子・中性子の中に閉じ込められていて取り出せない。

ガラガラの中に何があるか、どうやって調べる？



■ 振って音から想像する

=陽子・中性子にエネルギーを与えた時の変化から、理論的に予想する

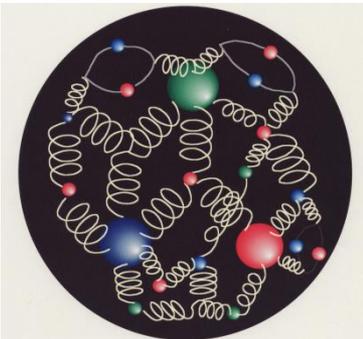
中に必ず何かがある(陽子は複合粒子である)
3個の粒子があると理論的にうまくいく (1964)

■ X線(透過力のある光)で撮影する

=高速の電子ビーム(波長の短い光)を当てる
中に点状の粒子があって動いている (1969~)

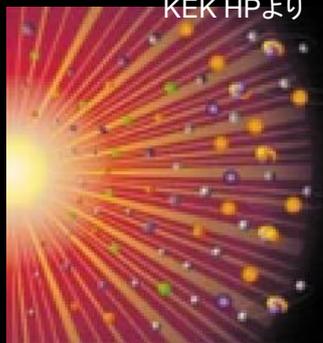
■ ハンマーでぶっ壊す

=陽子・中性子(原子核)同士を高速度で衝突
一瞬だけ“霧”のような流体が発生した (2002)



KEK HPより

ビッグバン



星の一生

観測からわかること



中性子星



ブラックホール



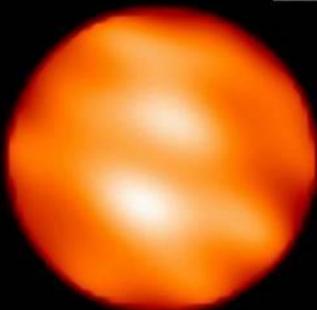
星間ガス



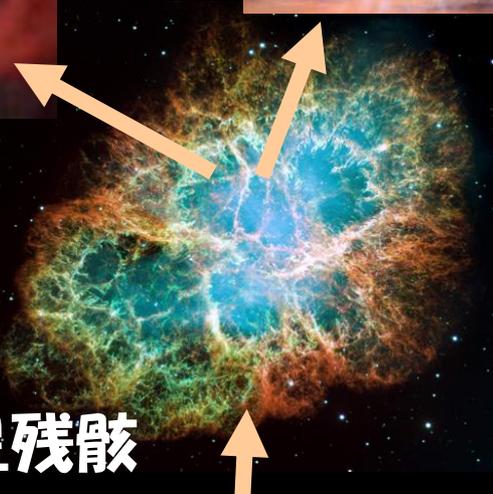
原始星



赤色超巨星



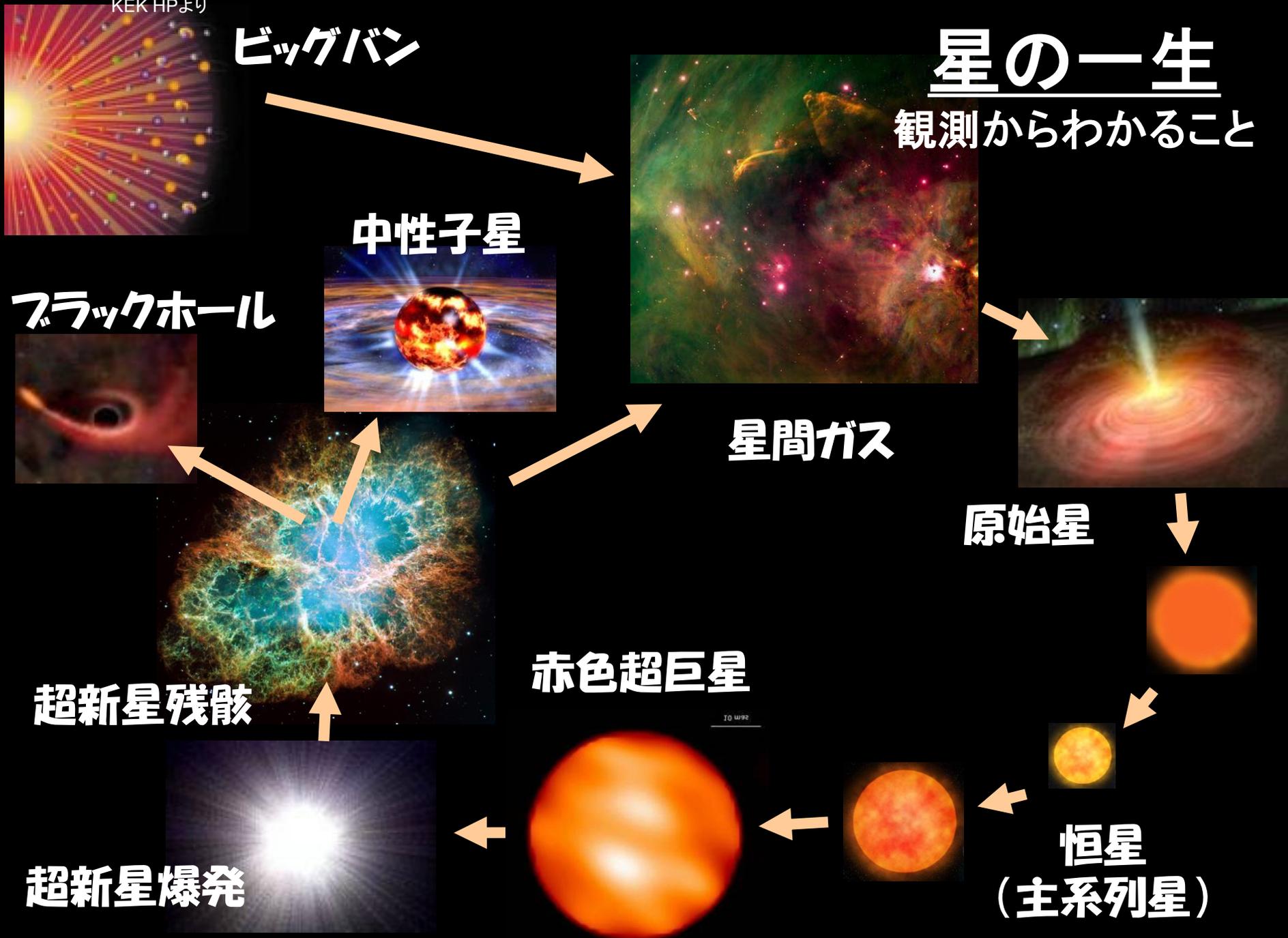
超新星残骸



超新星爆発

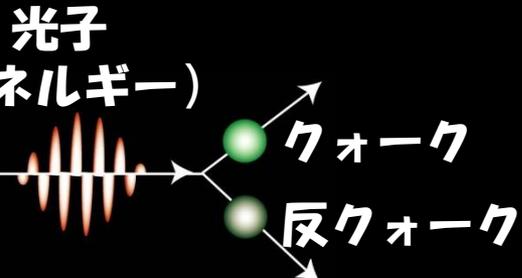


恒星 (主系列星)



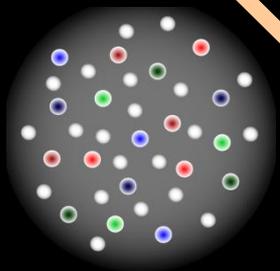


素粒子の生成



1. クォーク生成の謎
(物質が反物質より多い謎)

クォークのガス
(クォーク・グルーオン・プラズマ)



ハドロン(陽子・中性子)の生成 10^{-4} 秒

ハドロン = 複数のクォークが集まってできた粒子

2. ハドロン生成の謎
(クォーク閉じ込めと重い質量発生の謎)

He原子核の合成 3分

原子(H, He)の生成 3×10^5 年



素粒子から
原子・分子へ

分子(H₂)の生成

H₂, Heの薄いガス



星間ガス



H₂, Heの薄いガス

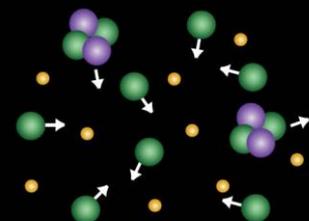
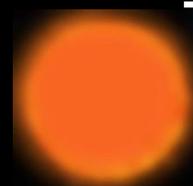
原始星



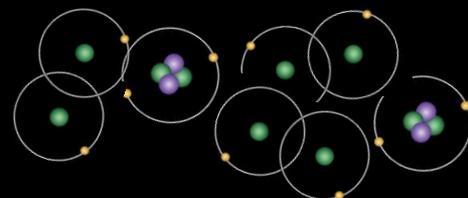
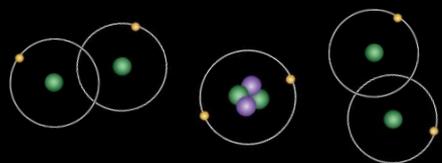
高温高密度のH₂ Heガス

星の進化と物質の進化

H, Heのプラズマ



重力で集積



恒星
(主系列星)

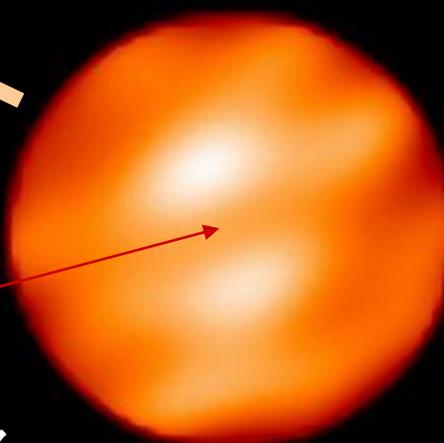


核融合反応開始

超新星爆発



赤色超巨星



HからHeが合成

10⁸ ~ 10⁹年

C, O, ..., Fe
原子核の合成

Feのプラズマ

核融合反応の進展

星間ガス



H₂, Heの薄いガス

原始星

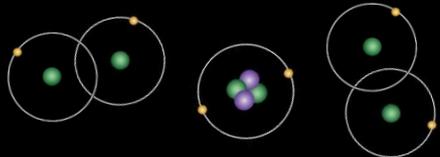
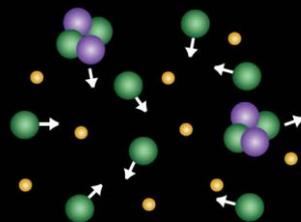


高温高密度のH₂ Heガス

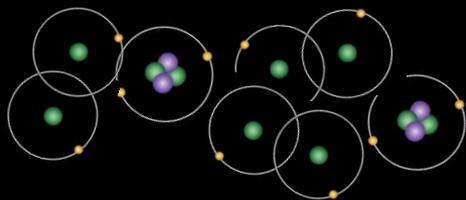
星の進化と物質の進化



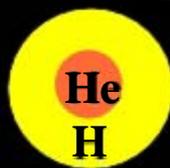
H, Heのプラズマ



重力で集積



恒星
(主系列星)

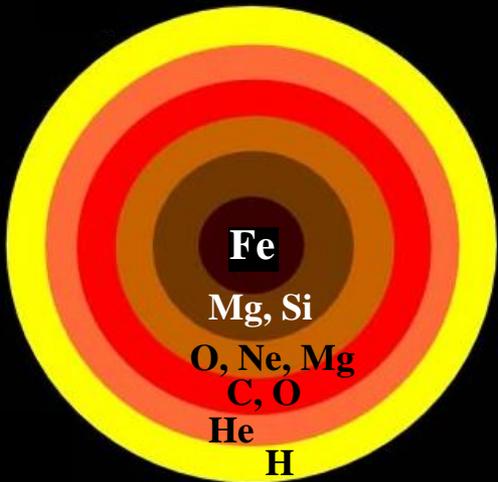


核融合反応開始

超新星爆発



赤色超巨星

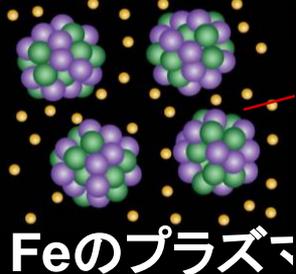


核融合反応の進展

HからHeが合成

10⁸ ~ 10⁹年

C, O, ..., Fe
原子核の合成

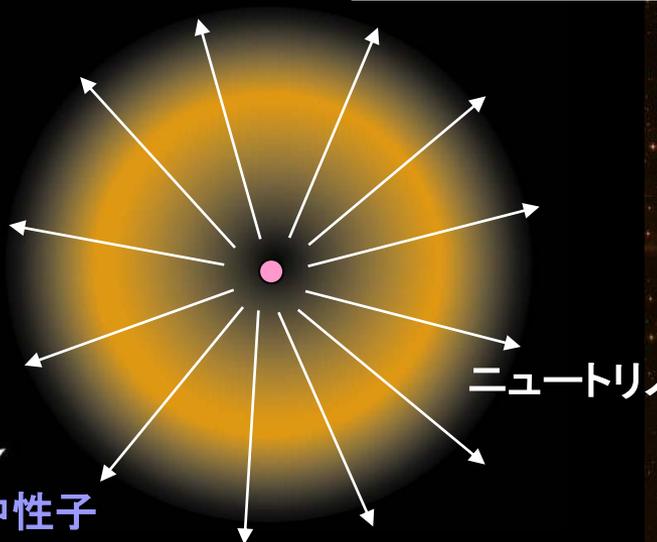
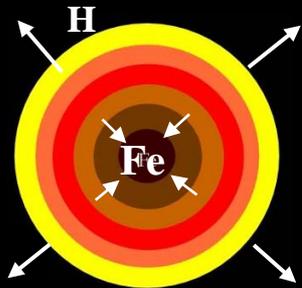


Feのプラズマ

Fe
Mg, Si
O, Ne, Mg
C, O
He
H

超新星爆発

赤色超巨星



陽子



中性子



電子



ニュートリノ

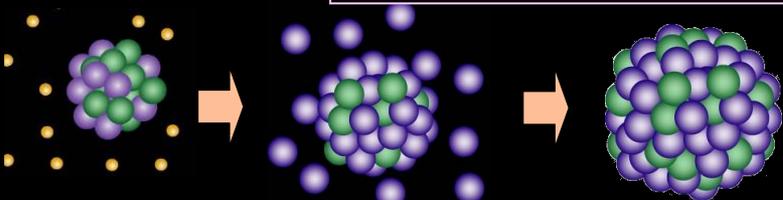


(ベータ崩壊 $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$ の逆反応)



中性子星

重い原子核の合成？
Fe -> Pt, Au, U ?



1987A残骸

藤原定家「明月記」1054年爆発
小柴さんがニュートリノ検出



かに星雲

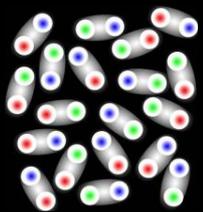
藤原定家「明月記」1054年爆発
かにパルサー



超新星爆発時に一気に合成された重元素が
宇宙空間にばらまかれた？ →次世代の星の材料に

「星の誕生→超新星爆発」の世代を
繰り返すたびに重元素が増える

物質進化の“輪廻”と最終形



中性子星



ストレンジ
クォーク物質
生成??



ストレンジ
核物質
生成?

重元素を含むガス



4. 中性子星物質の謎
(ストレンジ物質は
あるか?)

超新星残骸

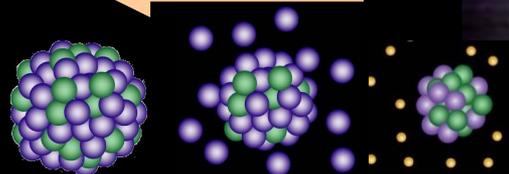
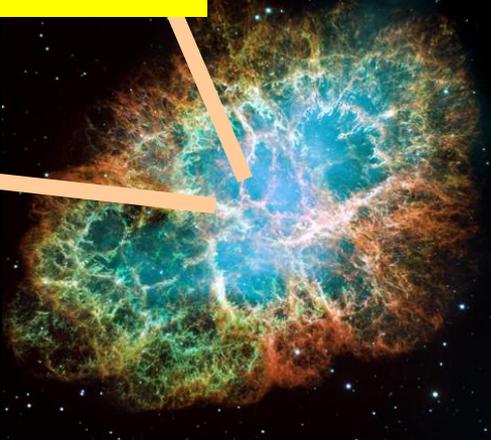
3. 重元素合成の謎
(宇宙のどこで合成
されたか?)

超新星爆発

重い原子核の合成?

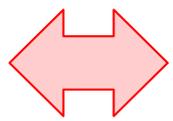
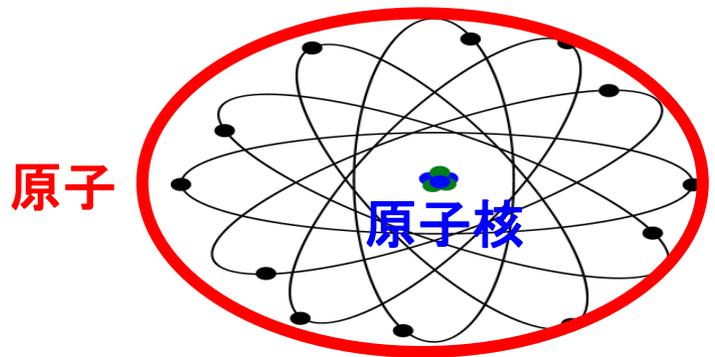


ブラックホール



原子核の大きさと密度

鉄原子核は、鉄原子の
約1/10000の大きさ

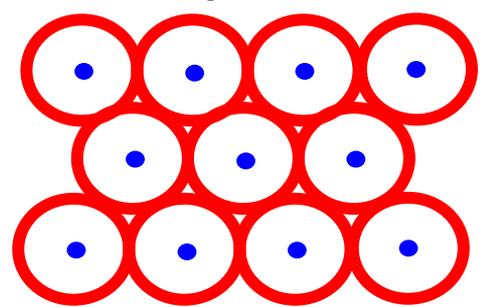


東京ドーム
球場
(直径130m)



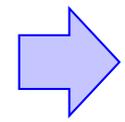
電子はめちゃくちゃ軽いので、原子の質量は、ほぼ原子核の質量と同じ

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?

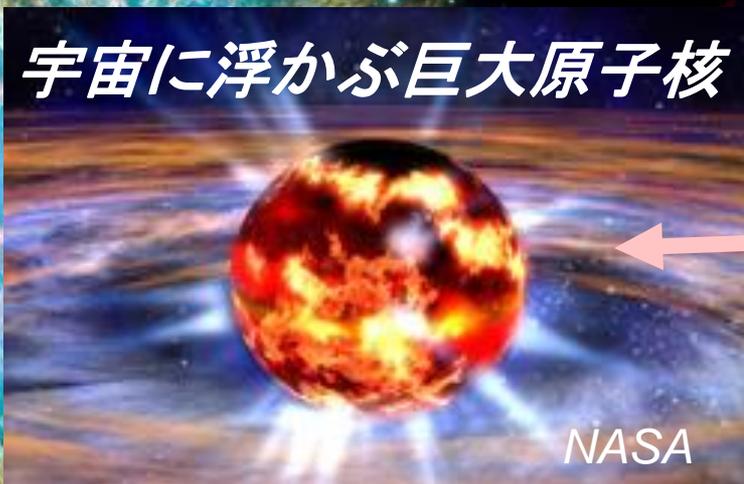
密度は $10000 \times 10000 \times 10000 \sim 1 \times 10^{12}$ 倍
 \therefore 原子核密度 $\sim 2 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$ (2億トン/cm³)

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

原子核の密度!!

■ 質量: 太陽の1~2倍

■ 半径: 約10~15 km

密度: ~4億トン/cm³

(中心部は10~30億トン/cm³)

原子核密度の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



クォーク多体系の相図

原子核物理学の
最大の目標

宇宙における
物質の起源と
進化の解明へ

温度

ビッグバン
(初期宇宙)

クォーク・
グルーオン・
プラズマ

膨張による冷却

“気体”

星間物質

ハドロン

バリオン
(陽子・中性子)

メソン
(中間子)

“液体(液滴)”

元素合成

恒星

中性子星

超伝導状態

クォーク星?

$H, He \rightarrow Fe$

0

重力圧縮

超新星爆発

重力圧縮

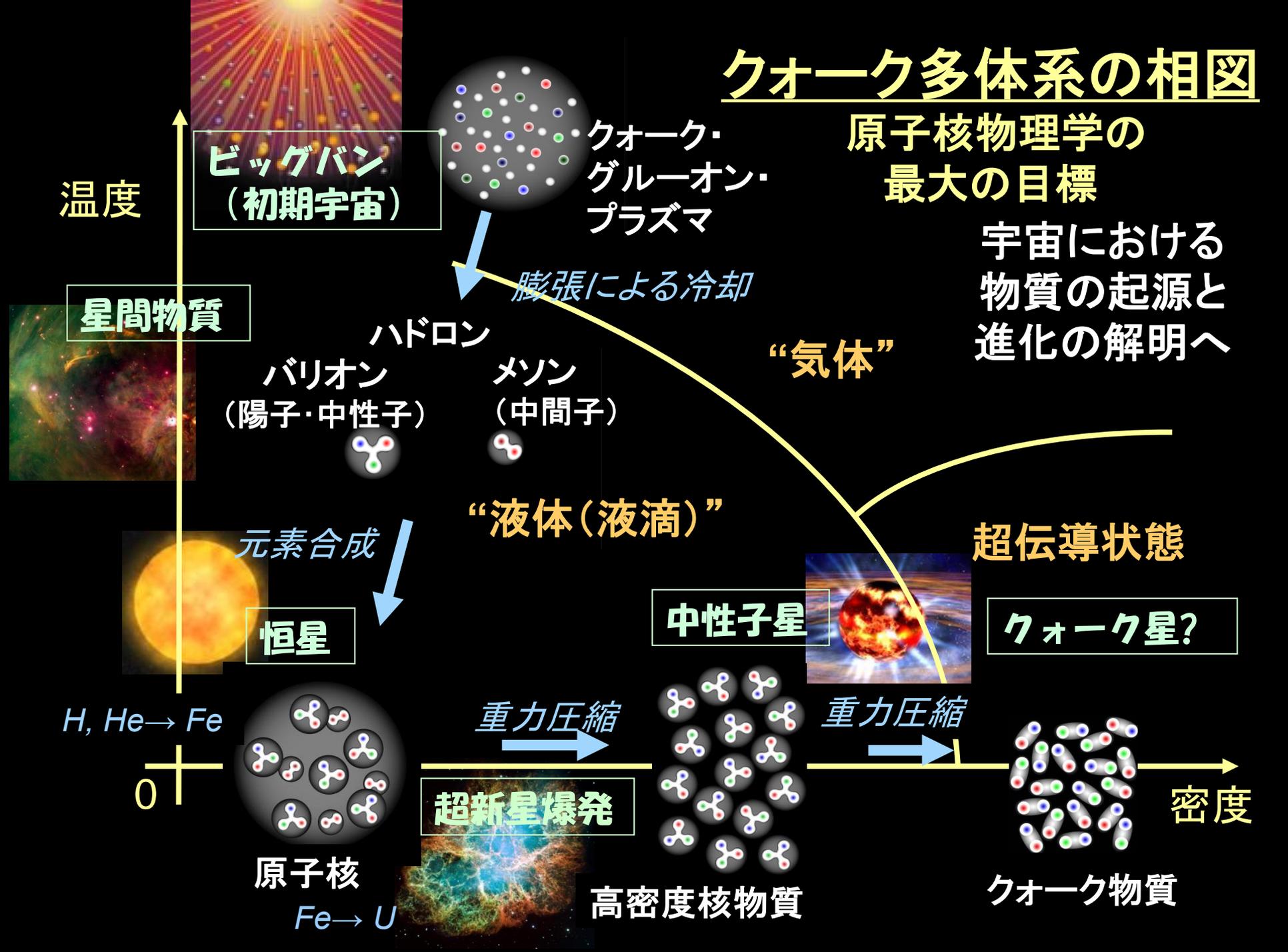
密度

原子核

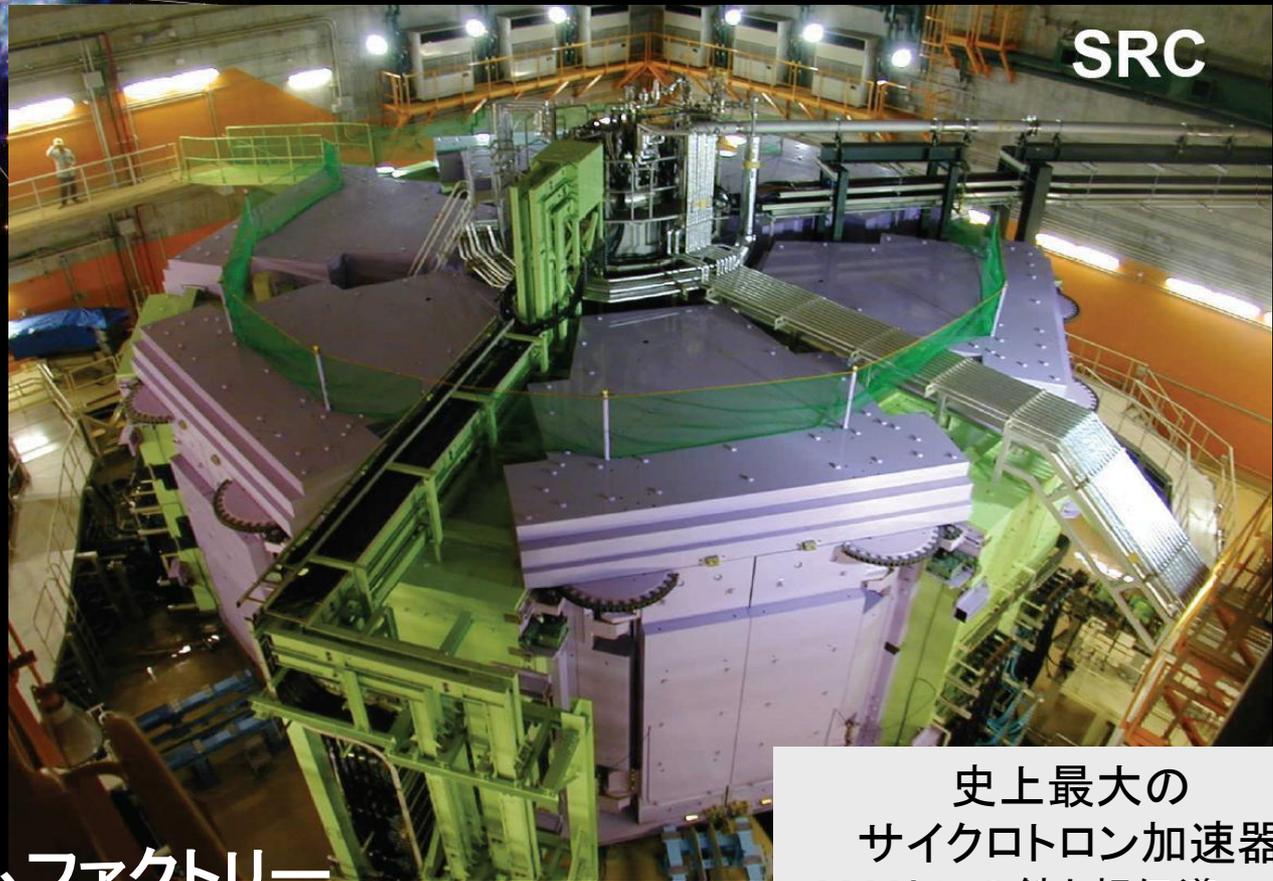
$Fe \rightarrow U$

高密度核物質

クォーク物質



2. 元素合成の謎



理研RIビームファクトリー
超伝導リングサイクロロン

史上最大の
サイクロロン加速器
8300トンの鉄と超伝導コイル

宇宙(太陽系)の元素存在比

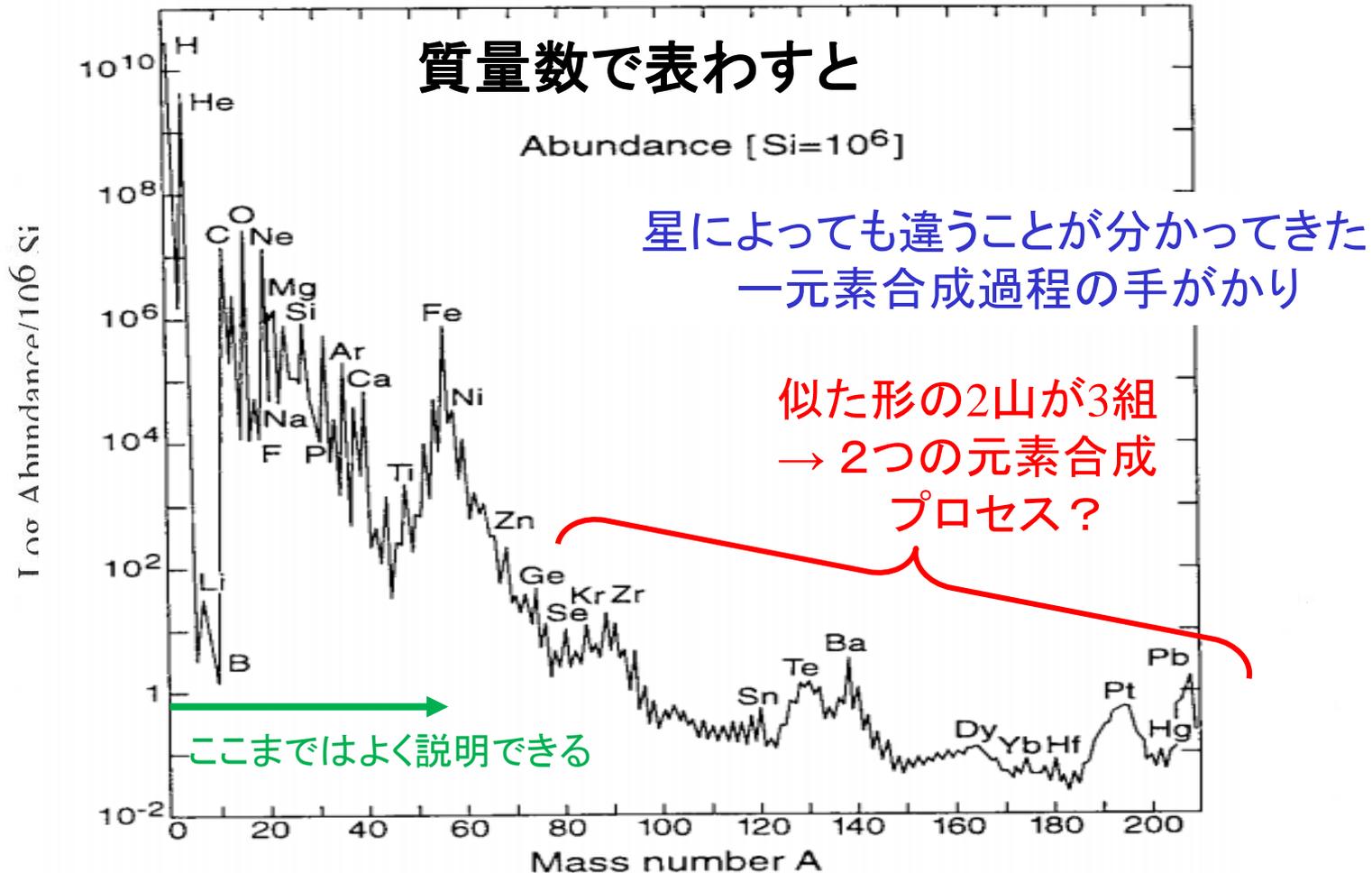


図2 宇宙における元素の質量存在比 (ケイ素を10⁶に規格化してある)

核図表と元素合成

陽子間の
クーロン斥力のため
質量数には上限あり

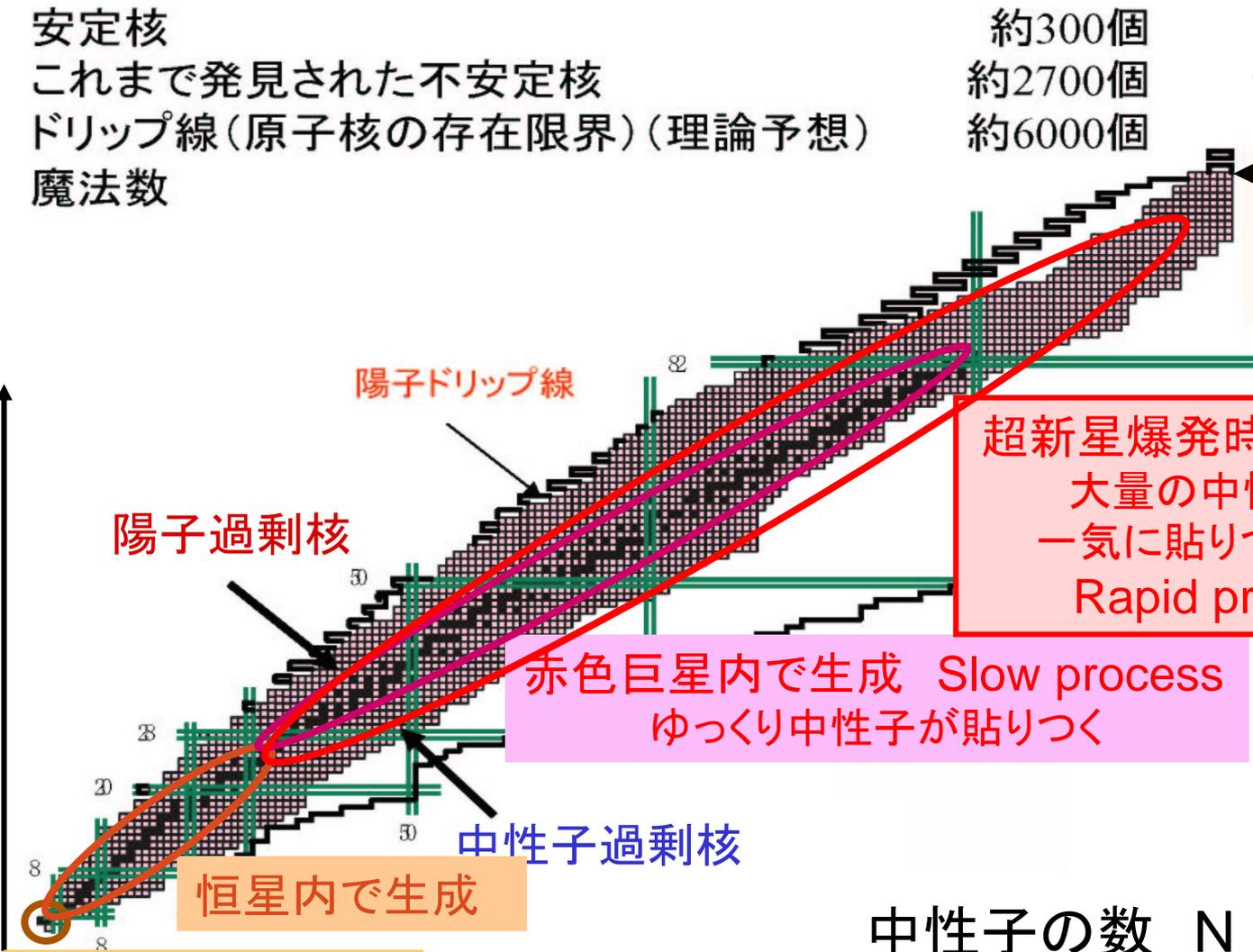
- 安定核
- これまで発見された不安定核
- ドリップ線(原子核の存在限界)(理論予想)
- 魔法数

約300個
約2700個
約6000個

Z=118が
(現在の)限界

Z=113 Nh
ニホニウム

陽子の数 Z



超新星爆発時?に生成
大量の中性子が
一気に貼りついた?
Rapid process

赤色巨星内で生成 Slow process
ゆっくり中性子が貼りつく

中性子過剰核

恒星内で生成

ビッグバンで生成

中性子の数 N

元素合成の謎

金やウラン(重元素)は宇宙でどう作られたのか？



陽子
他の原子核

原子核

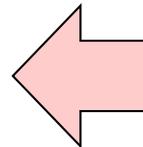
陽子や他の原子核は、
クローン力の反発のため
原子核に近づけない



原子核

中性子の海

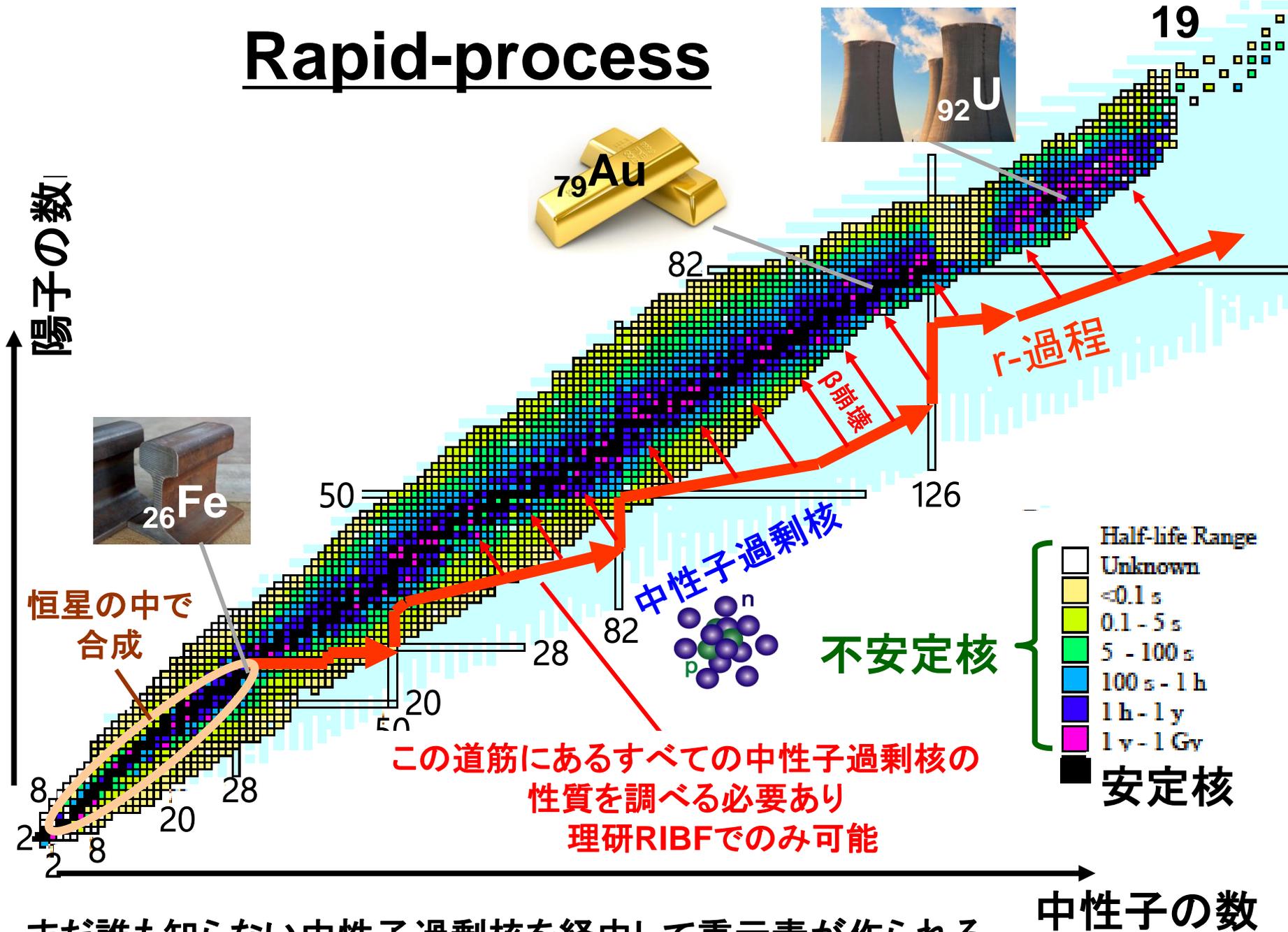
中性子はぺたぺた貼りつく



中性子が多い原子核は、
ベータ崩壊 ($n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$) で
中性子nの一部が陽子pに変わる
→ 原子番号が上がる

中性子がたくさんあれば、一気に重元素が作れるはず

Rapid-process

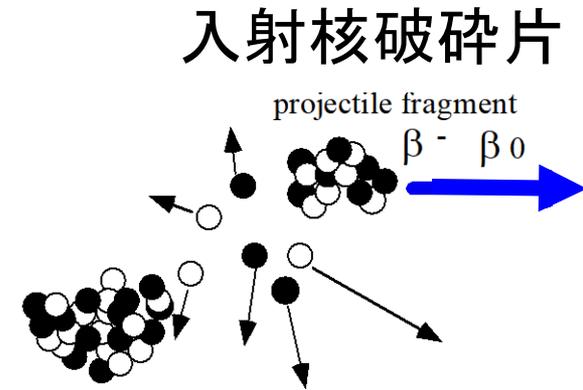
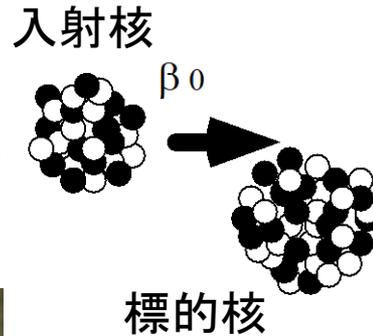


まだ誰も知らない中性子過剰核を経由して重元素が作られる

Rapid-process のシミュレーション動画
ミシガン州立大超伝導サイクロトロン研究所HP

RI ビームファクトリー (理研)

1000種の新核種を含む
約4000種の不安定原子核(RI)を製造
世界最高強度のRIビームを供給



超伝導リングサイクロトロン(SRC)

世界初、史上最強 8,300 tons
水素からウランを光速の70% (350 MeV/u) に加速

超伝導RIビーム収集分離装置 (BigRIPS)

世界最大口径、全長 77 m
世界最高のRIビーム分解能達成

RIビームファクトリーの成果

理研HPより

これまでに89種の新同位体を発見(その多くが中性子過剰核)

110種の中性子過剰核の寿命を一気に測定(2015)

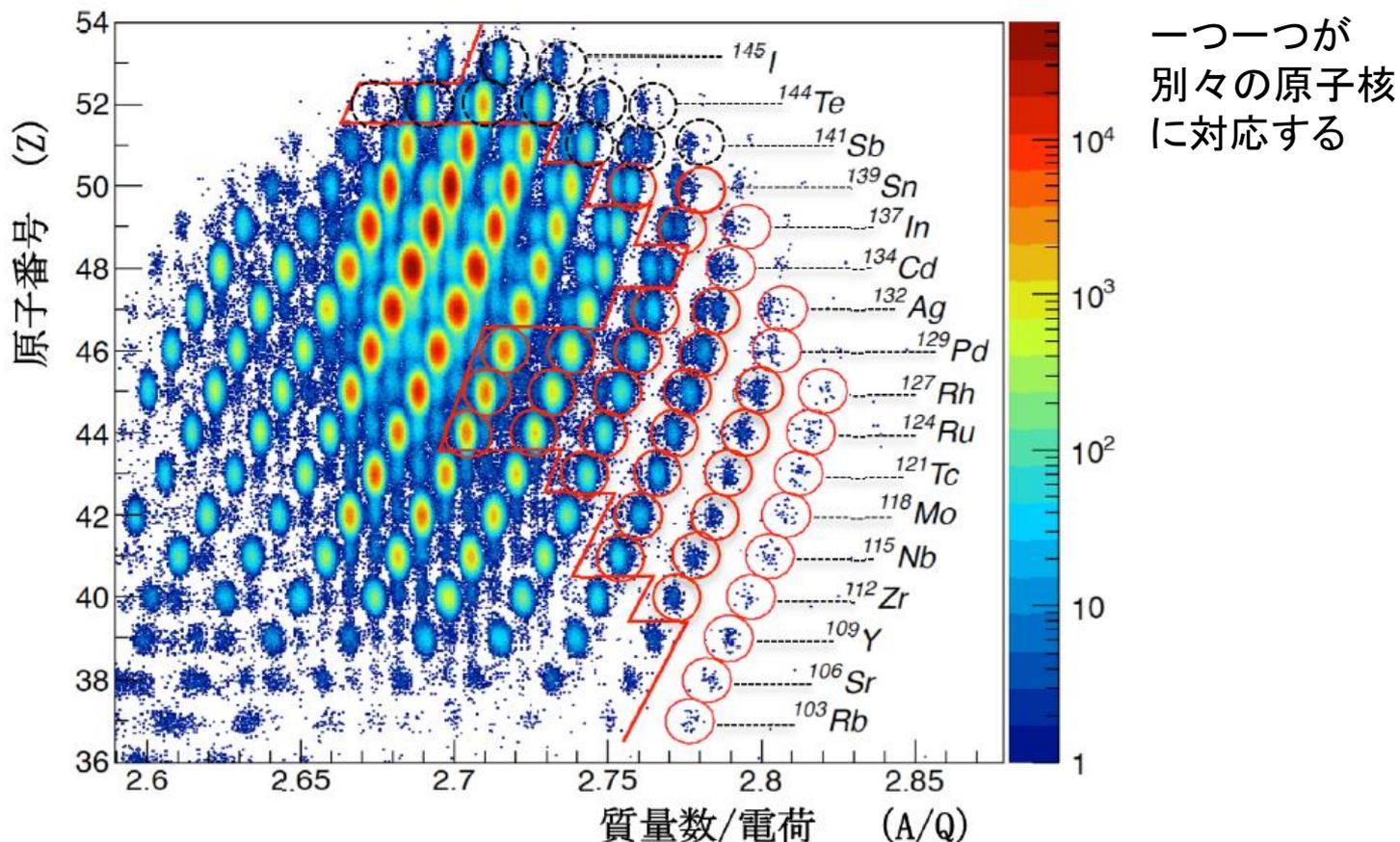


図3 生成したRIの粒子識別結果

:粒子の強度を示す。赤丸は今回初めて寿命(半減期)測定に成功した原子核。

元素合成過程 の解明へ

RIBFのデータから、
重元素合成(r過程)の
精密シミュレーションが
可能に



太陽系の元素存在比を
ほぼ再現

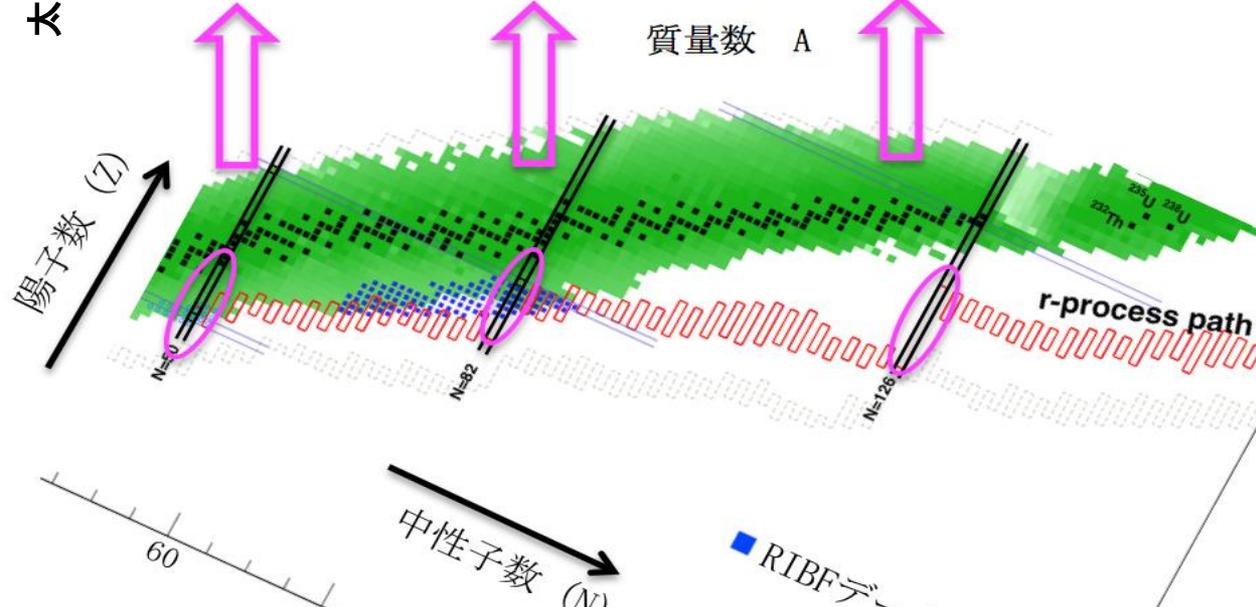
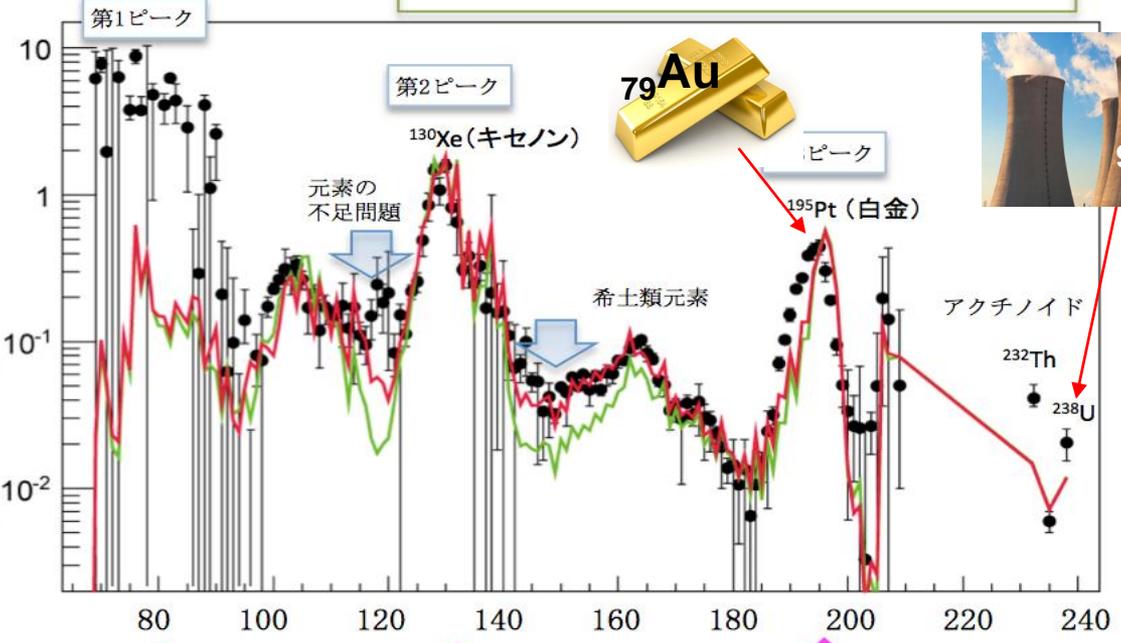
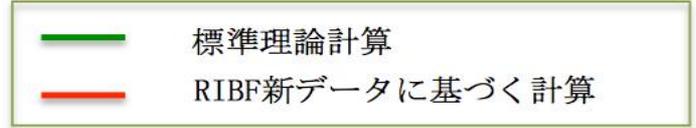
ただし、「中性子の海」は
宇宙のどこにあるのか？

超新星爆発か？

中性子の量が足りない！

太陽系の元素存在比のうち未知部分 (r過程の分)

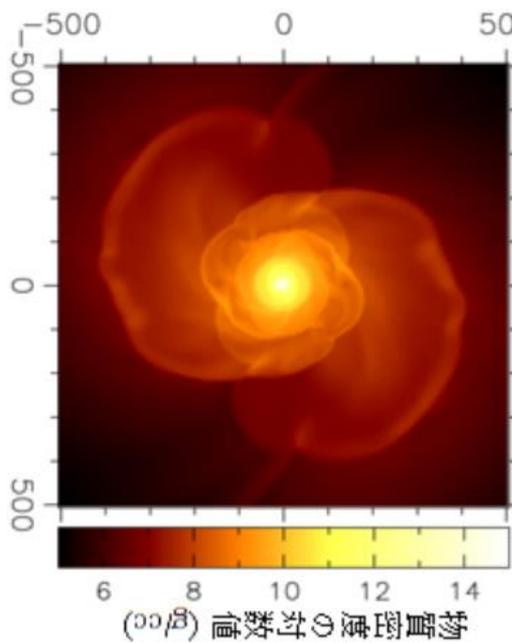
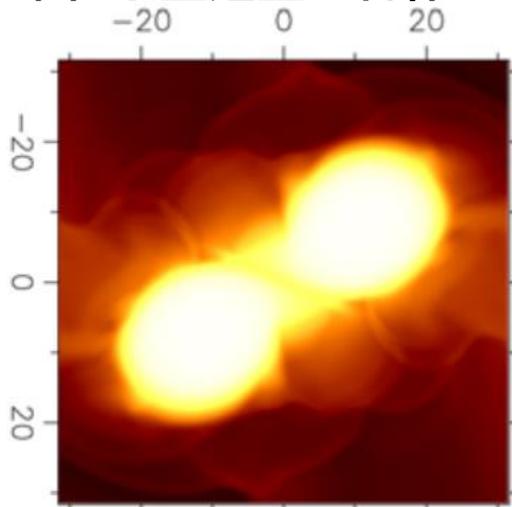
理研HPより



一般相対論と原子核データを用いた
中性子星連星の合体シミュレーション

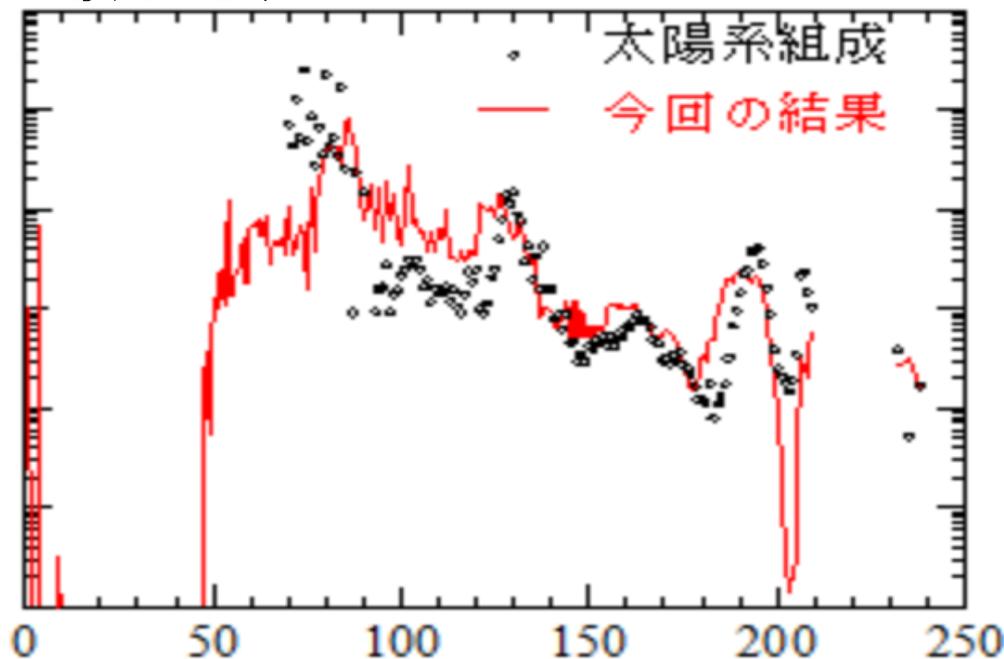
重元素の起源は 中性子星合体かも？

超新星爆発では、重元素を作るための中性子の量が足りない
中性子星合体だと説明できそう



京大HPより

和南城(京大)ほか 2014

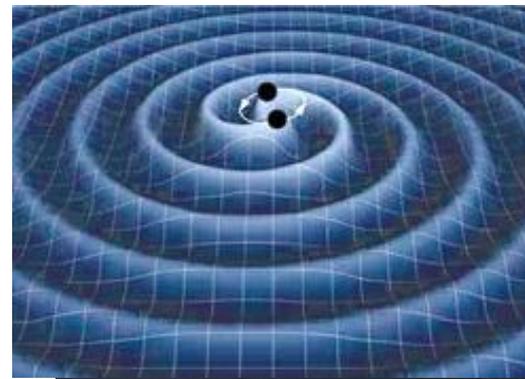


質量数

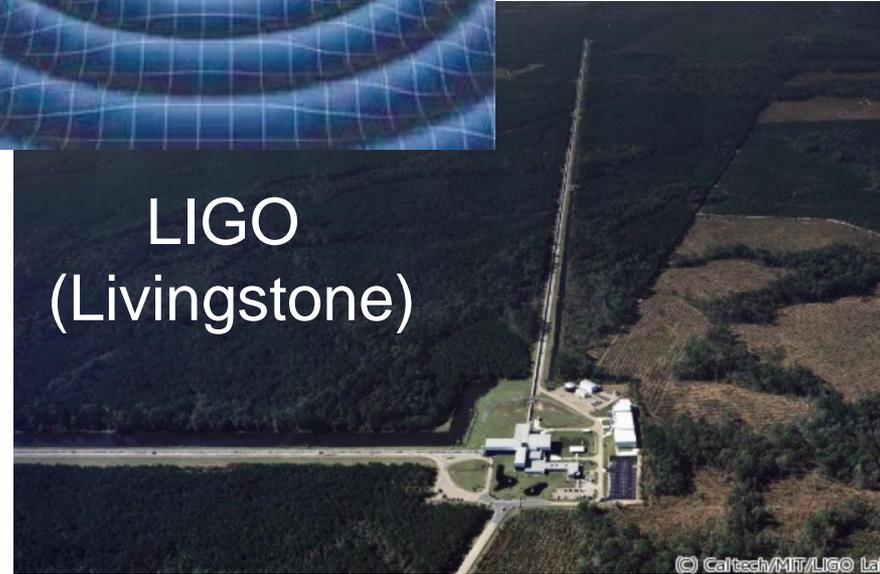
世紀の大発見：重力波

重力波の初観測 (LIGO)

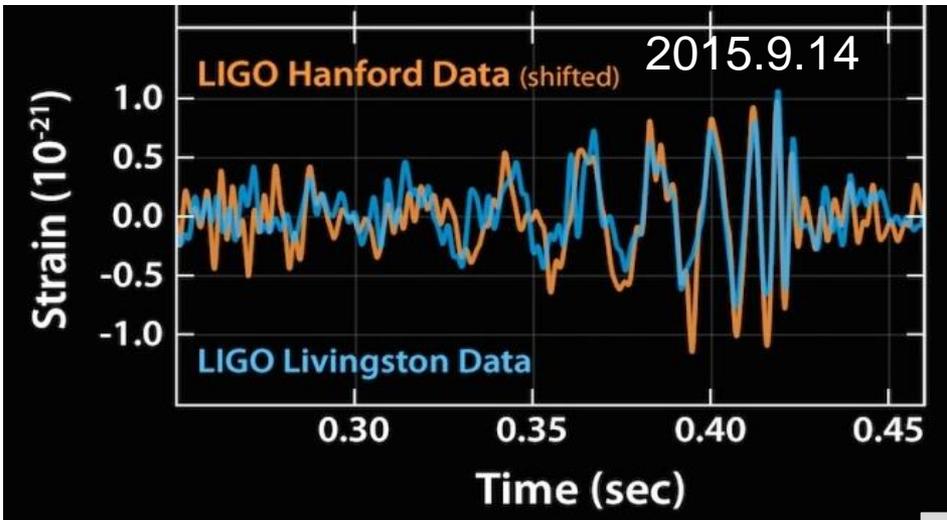
→ 即, ノーベル賞



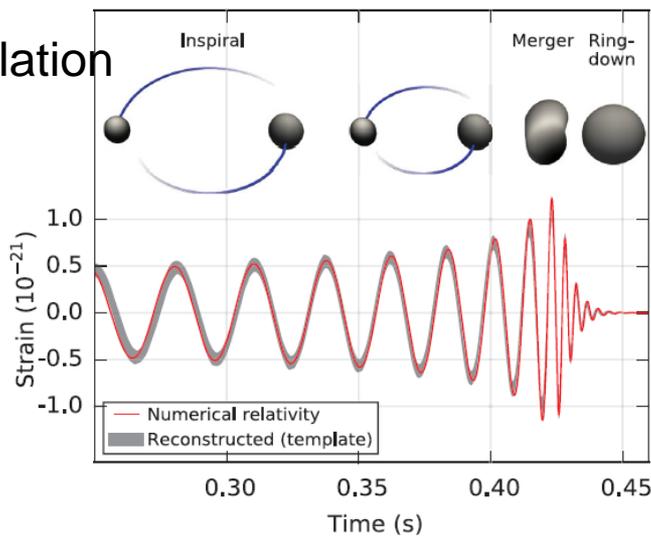
LIGO
(Livingstone)



© Caltech/MIT/LIGO Lab



Simulation



ブラックホール合体

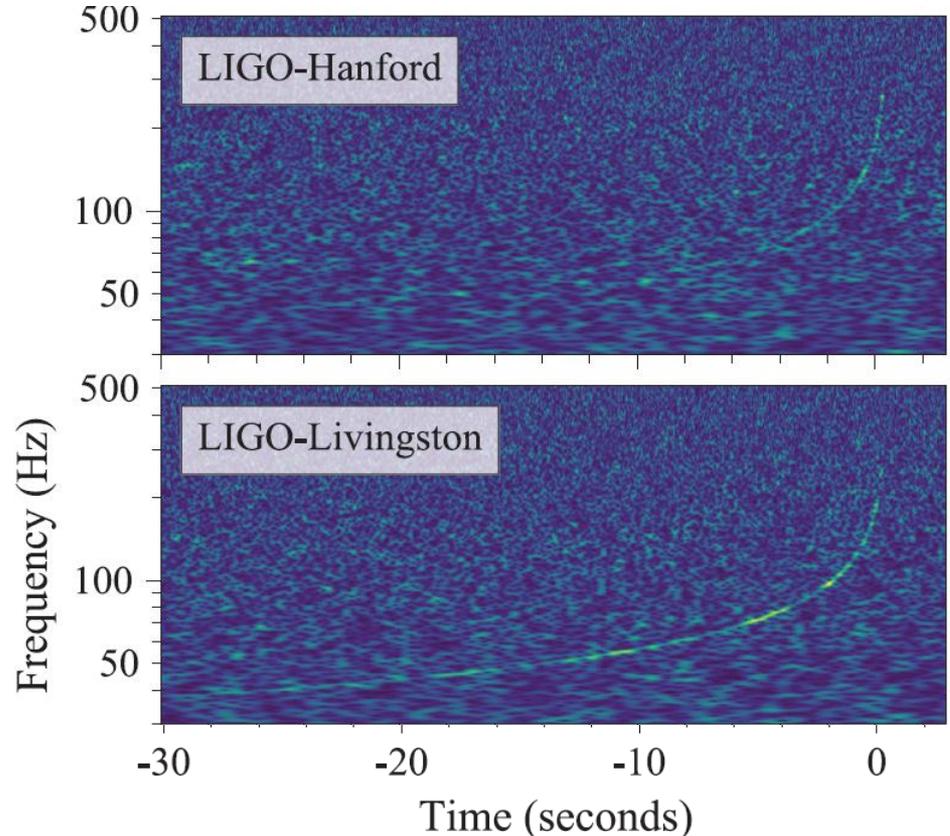
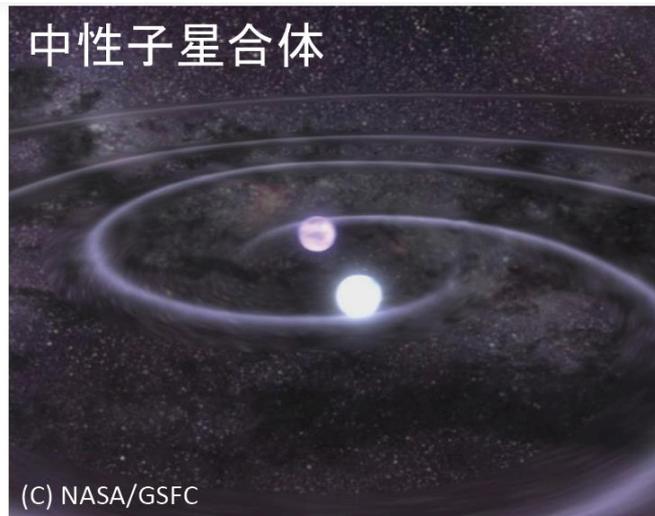


(C) SXS

(想像図)

世紀の大発見： 中性子星合体

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

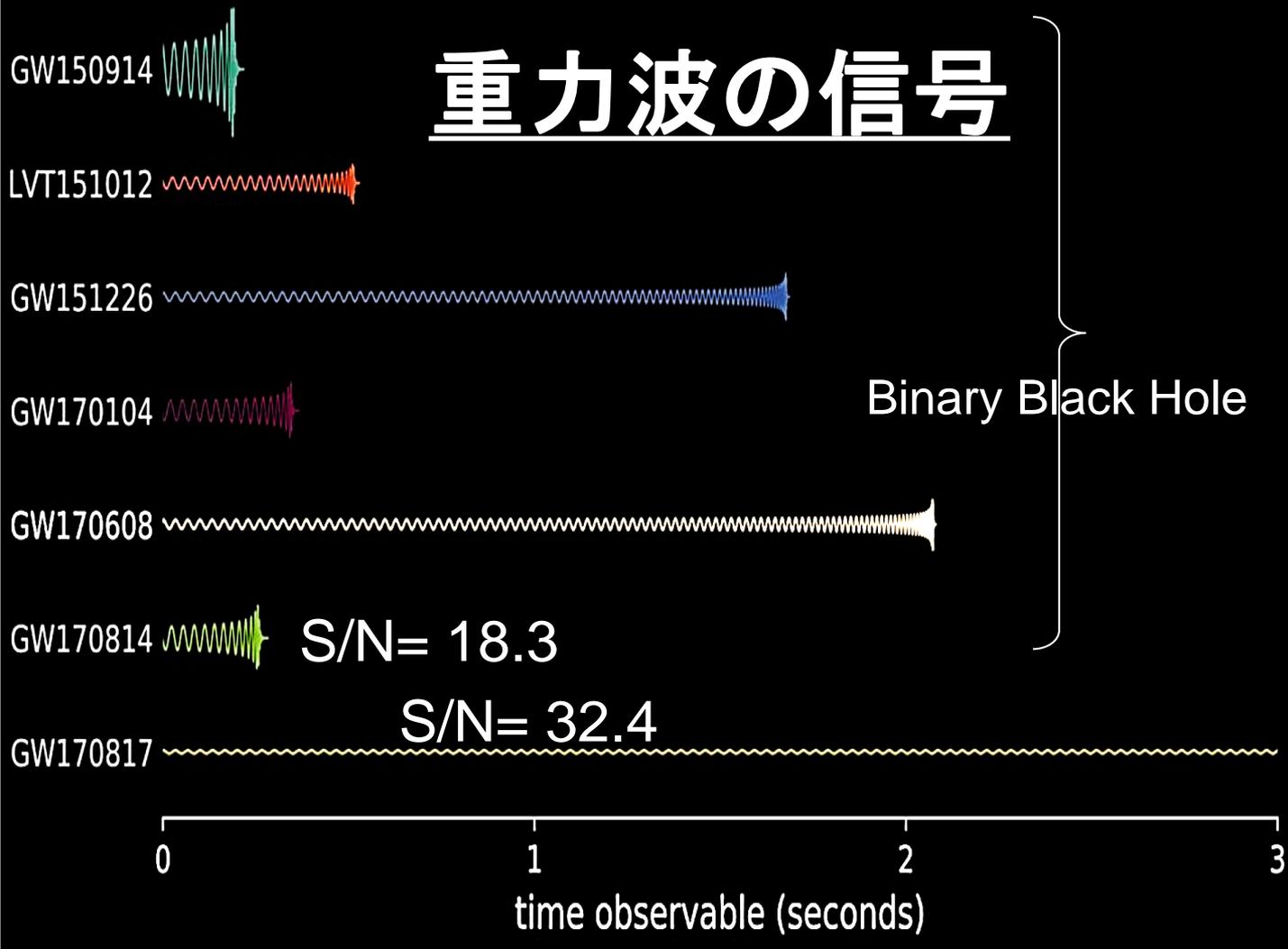


中性子星連星の合体の重力波を観測、およその場所を同定

→同時にガンマ線バーストも出ていた！

→光学望遠鏡でも同定、**可視光・赤外線**のスペクトルの時間変化を測定

重力波の信号



GW150914

LVT151012

GW151226

GW170104

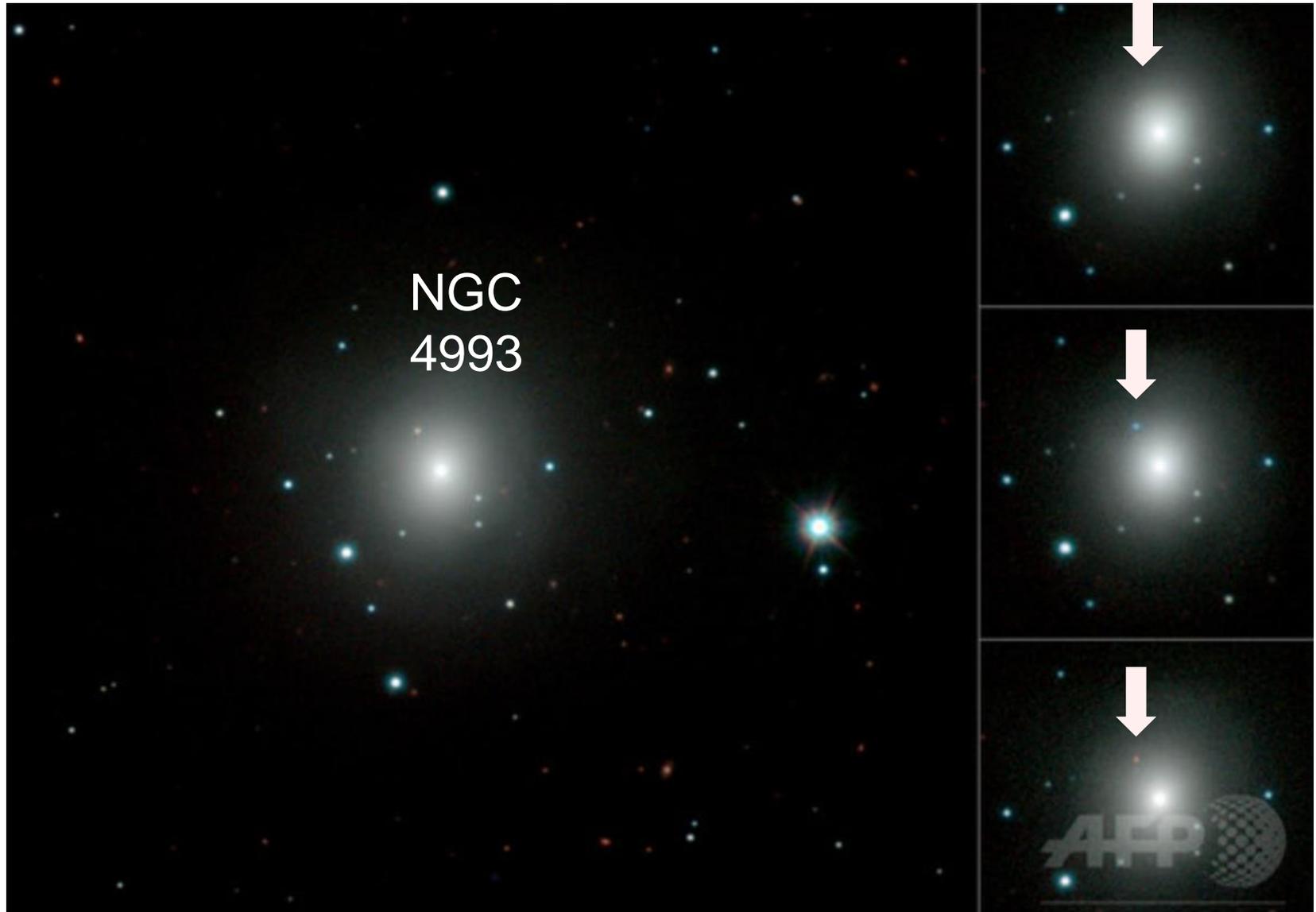
GW170814

GW170817



重力波発信源を光学望遠鏡で同定

Blue->red



中性子星合体で重い元素が作られていた証拠

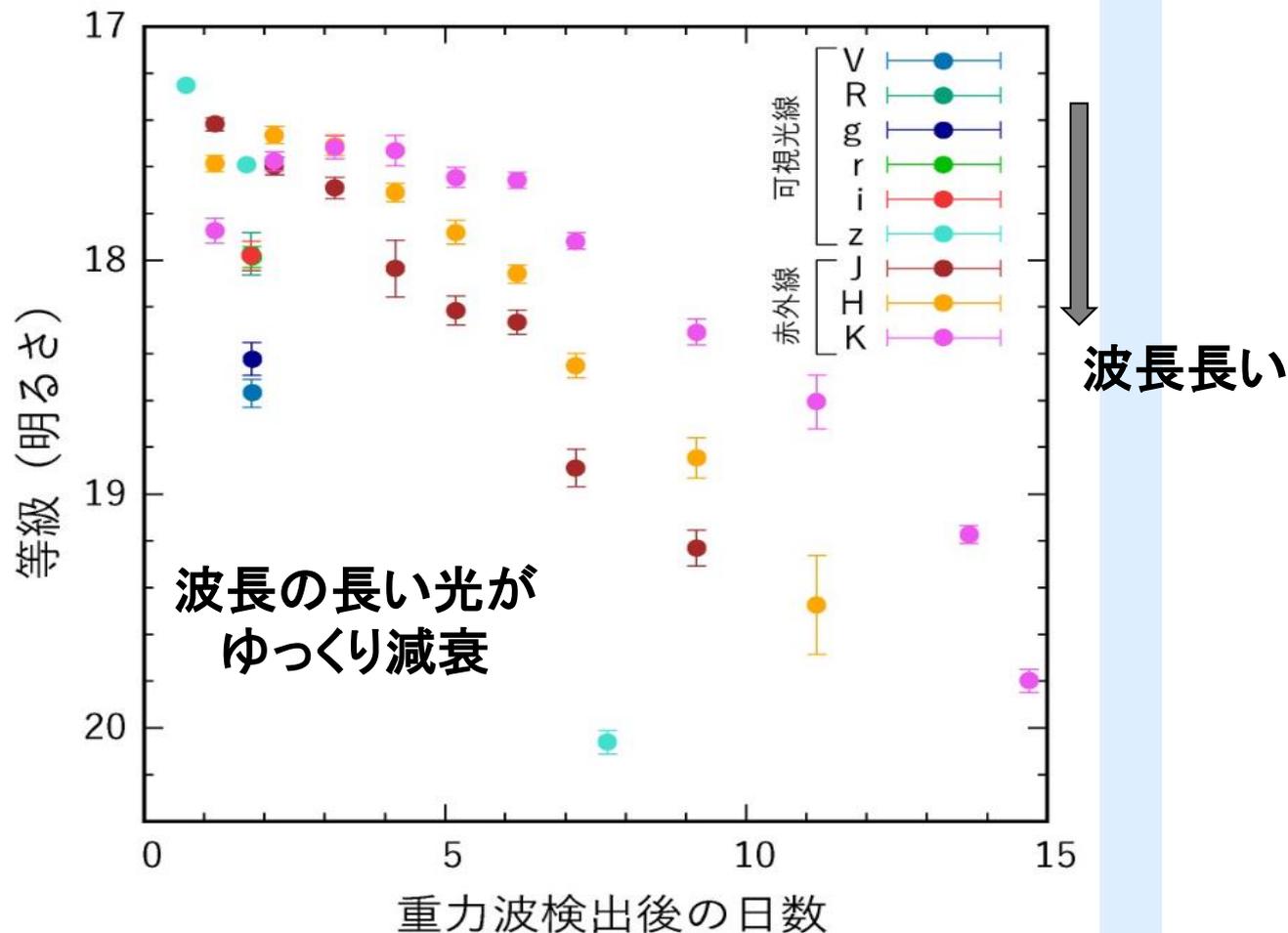
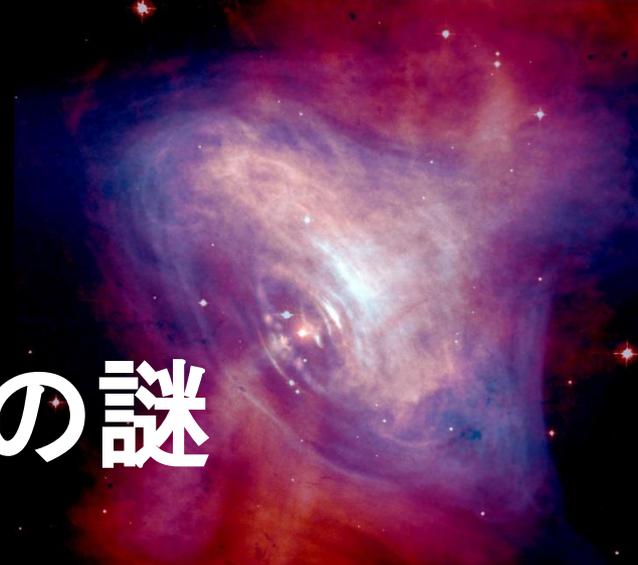


図2 : J-GEMの観測によって得られた可視光線と赤外線でのGW170817の明るさの変化の様子。可視光線域で時間とともに急激に暗くなり、赤外線域で比較的長く輝くという傾向がみられる。(クレジット : 国立天文台)

重元素(ランタノイド)生成時の光の減衰と一致

→ 中性子星合体で重元素が合成されていた！

3. 中性子星物質の謎



世界最高強度の
陽子加速器

大強度陽子加速器 J-PARC
茨城県東海

「中性子星」は中性子だけでできている？



地上実験、天体観測、理論を総合的に
駆使して調べよう！



皮と中身が違うかも？

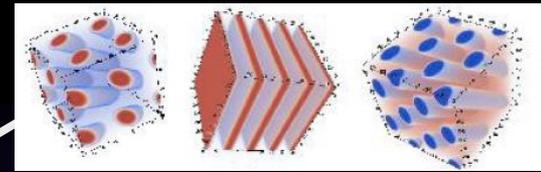


変なものはいっているかも？

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

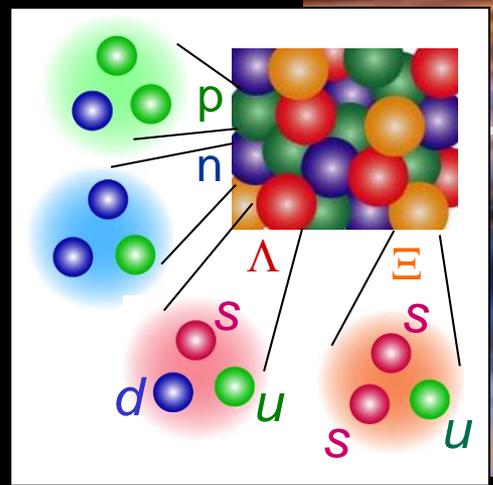
中性子星内部の 未知物質(予想)

[地殻] パスタ原子核



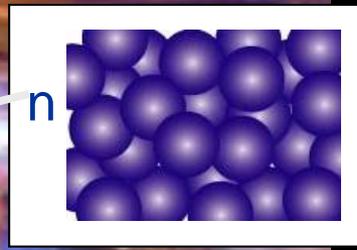
原子核と中性子物質が
さまざまな形で混在

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。



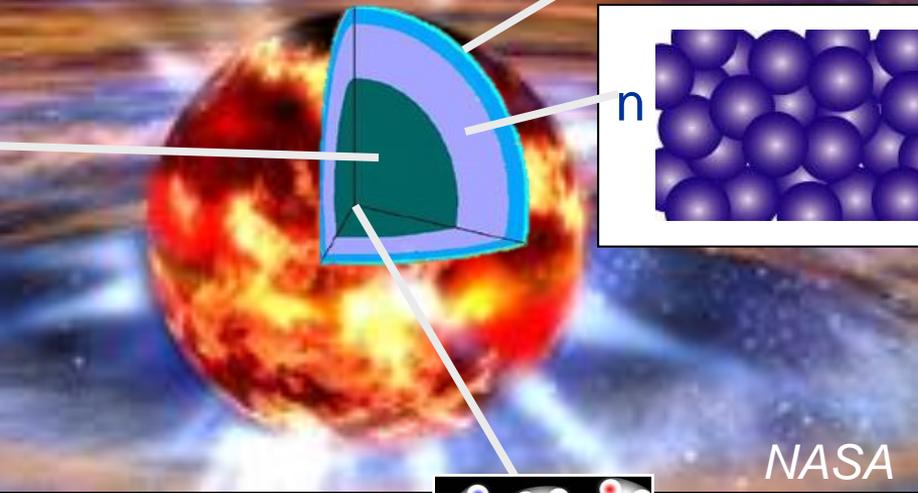
[内核] ストレンジ核物質 ?

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

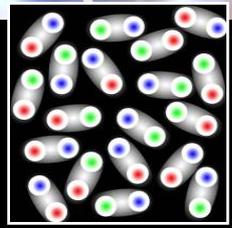


[外核] 中性子物質

ほとんど中性子だけで
できた物質
超流動状態か



NASA



[中心部] ストレンジ・クォーク物質

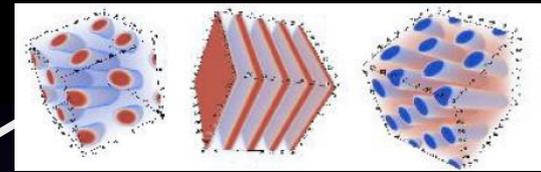
3種のクォークが
ばらばらになった物質 ??
超伝導状態

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

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

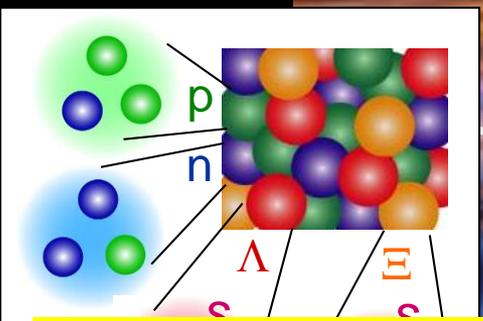
中性子星内部の 未知物質(予想)

[地殻]
パスタ原子核

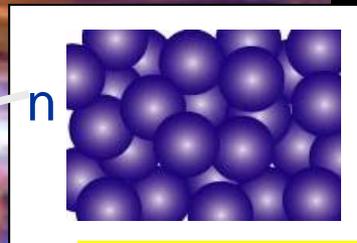
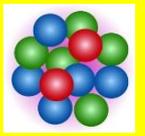


原子核と中性子物質が
さまざまな形で混在

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。



「ハイパー核」
から調べる



[外核]
中性子物質

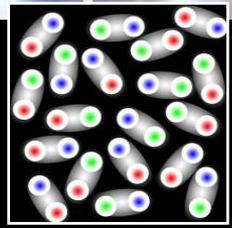
「中性子過剰核」
から調べる



NASA

[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



[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

加速器を使った地上実験でこれらの正体に迫る

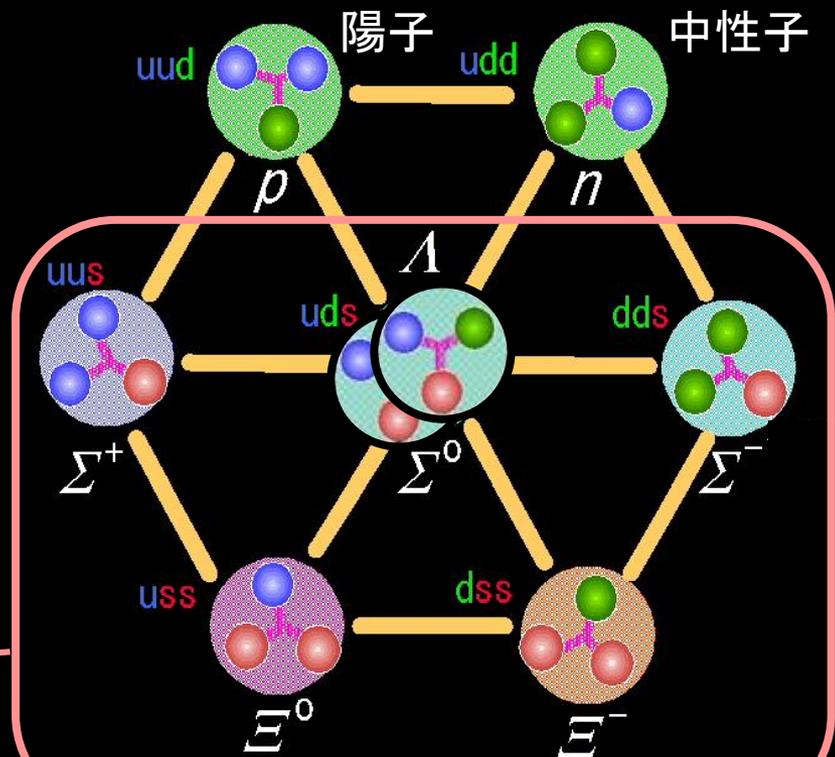
人類が知らなかった (太陽系に存在しない) まったく新しい姿の物質たち

ストレンジ・クォークと ハイパー核

Mass (GeV/c ²)		
安定 <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]	strange 0.1 [0.5]	<i>bottom</i> 4.2

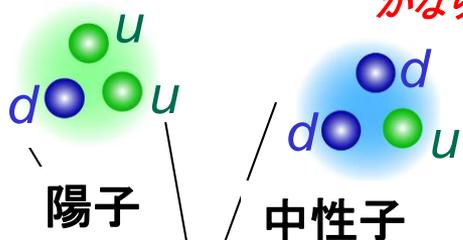
比較的長い寿命 (~10⁻¹⁰s)、
かなり容易に作れる

陽子・中性子の仲間(バリオン)



「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



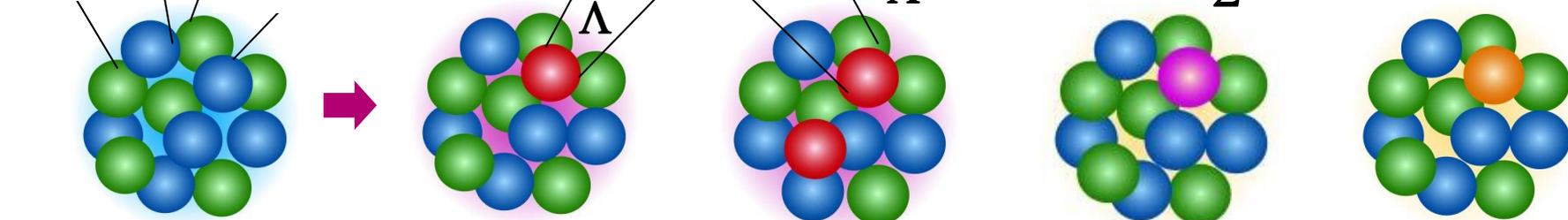
通常核

Λハイパー核

ΛΛハイパー核

Σハイパー核

Ξハイパー核



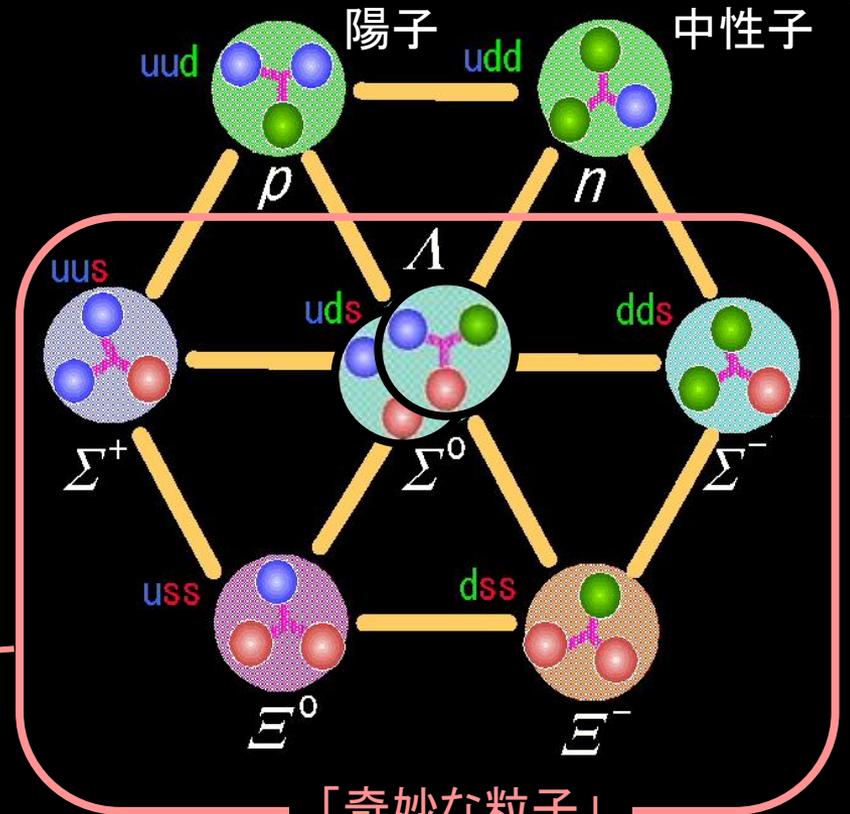
ストレンジ・クォークと ハイパー核

Mass (GeV/c ²)		
安定 <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]	strange 0.1 [0.5]	<i>bottom</i> 4.2

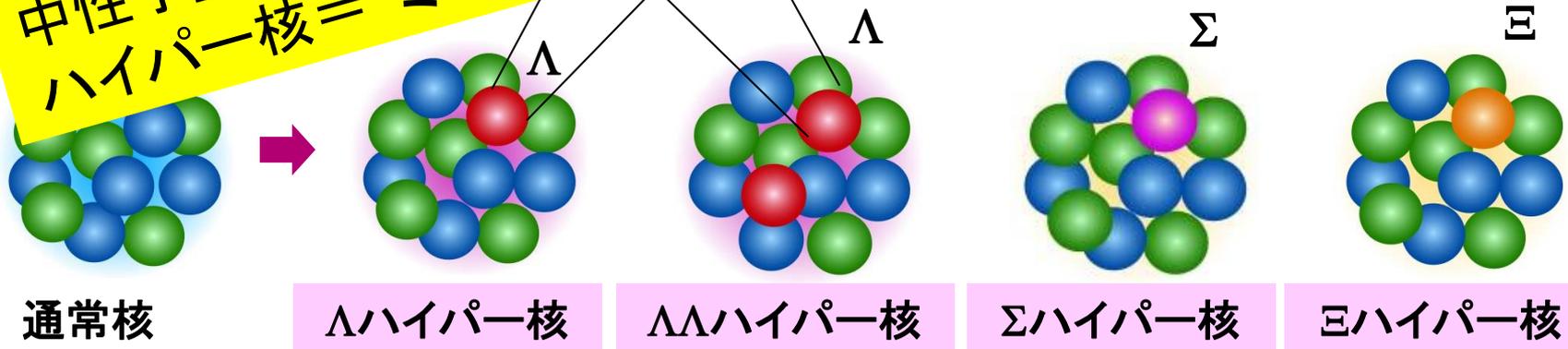
比較的長い寿命 (~10⁻¹⁰s)、
かなり容易に作れる

中性子星中心部と似ている
ハイパー核 = “ミニ中性子”

陽子・中性子の仲間 (バリオン)

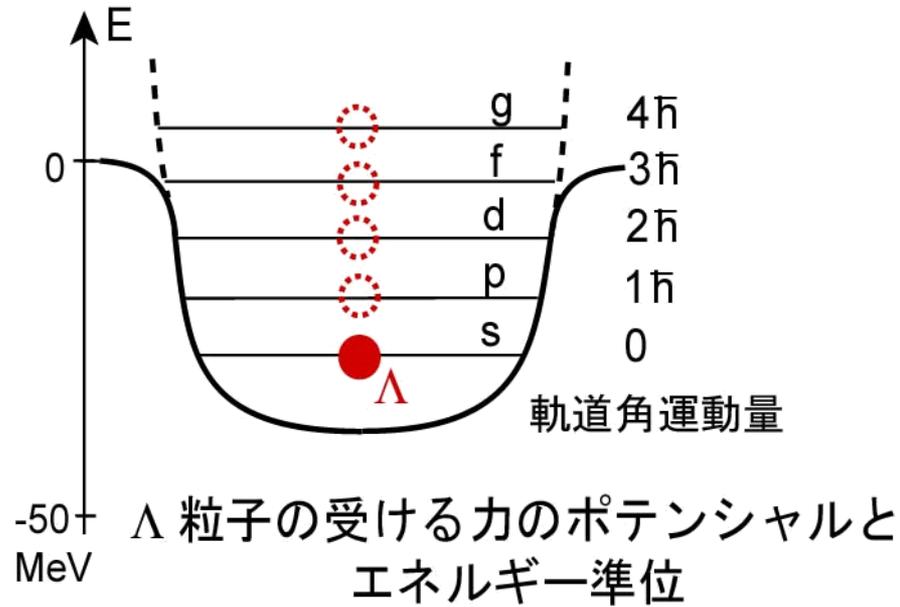
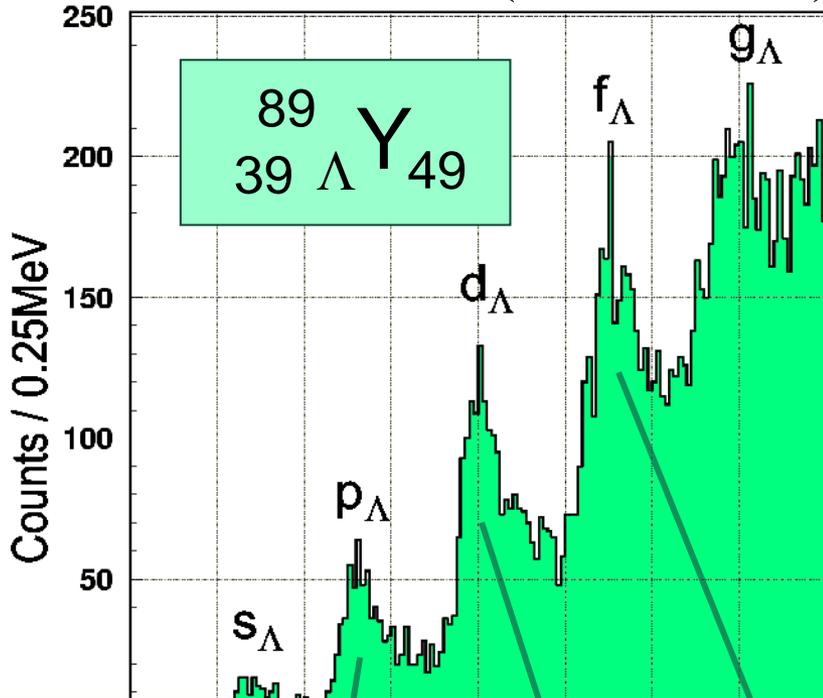


2割くらい重いので、陽子・中性子からこれらに変化できない



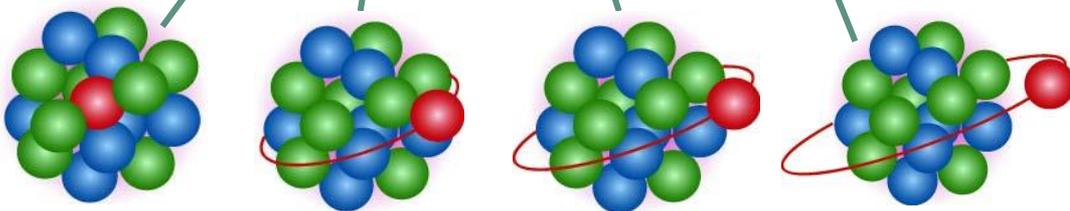
ハイパー核で中性子星を調べる

われわれのデータ (2001年, KEK)



Λ粒子は**パウリ排他律**を受けない

→陽子・中性子のつまった軌道にも入って回れる

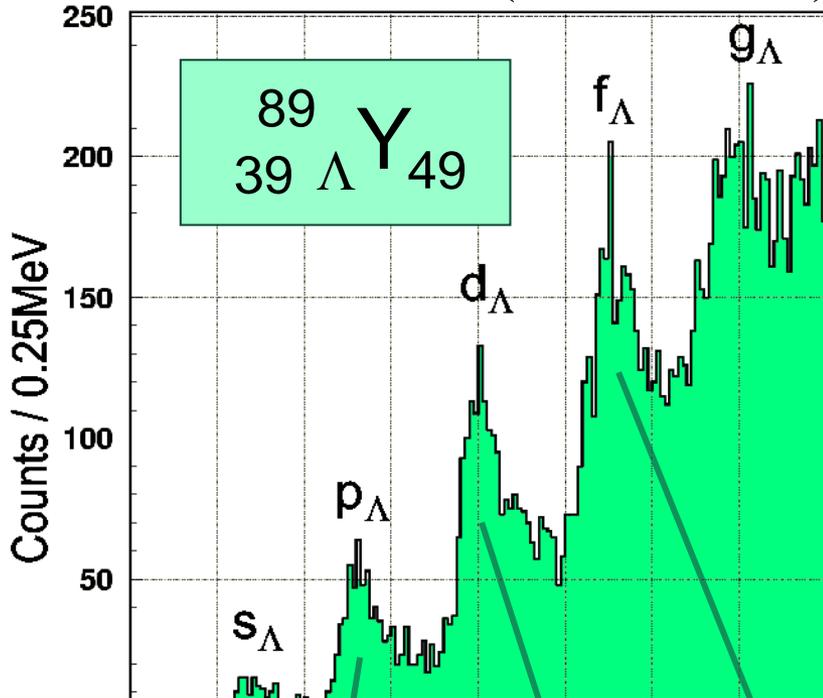


核内で陽子・中性子は互いの引力を感じてそれぞれ軌道を回る。

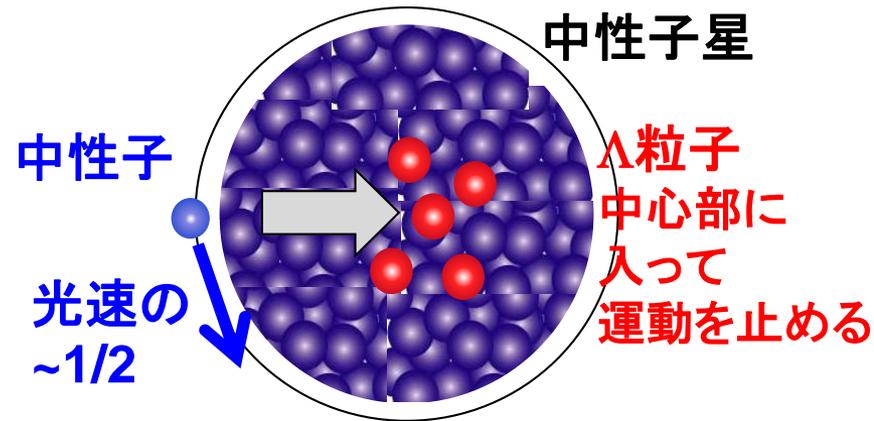
Λ粒子も陽子・中性子から引力を受けると回る

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)

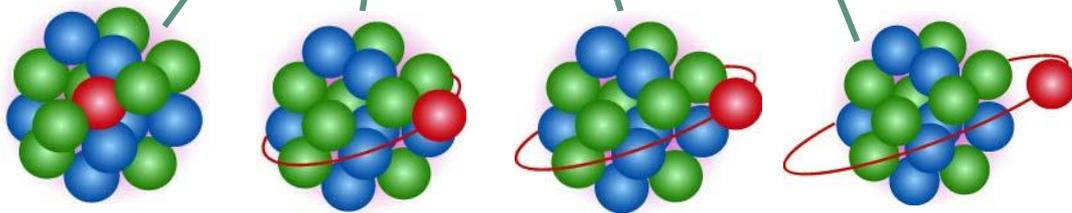


Λ粒子は中性子より質量が2割も重い
 通常の世界では: 中性子 → Λ粒子 ✕
 中性子星内部では: 中性子 → Λ粒子 ○



Λ粒子は**パウリ排他律**をうけない

→陽子・中性子のつまった軌道にも入って回れる



核内で陽子・中性子は互いの引力を感じてそれぞれ軌道を回る。

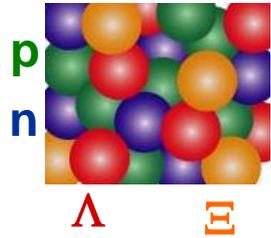
Λ粒子も陽子・中性子から引力を受けると回る

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

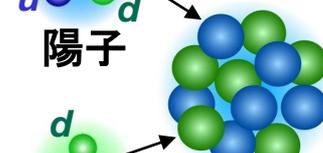
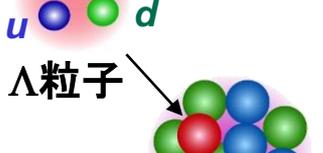
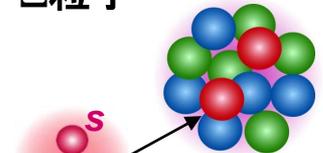
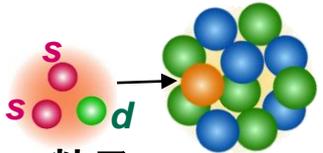
変化の度合いは
 Λ粒子・中性子の間の
 引力の強さによる

→ 詳しい研究が必要

ストレンジ核物質

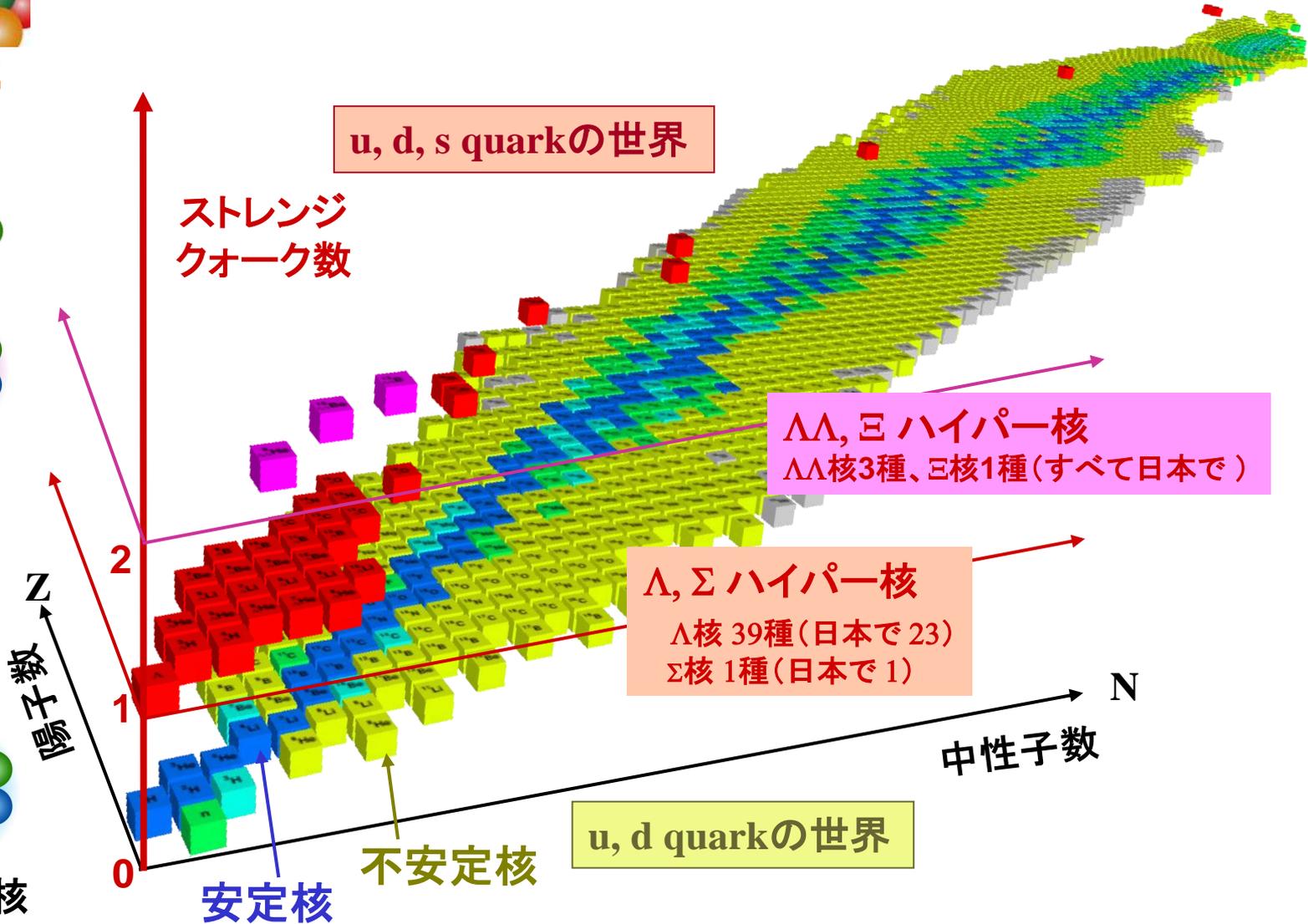


ハイパー核

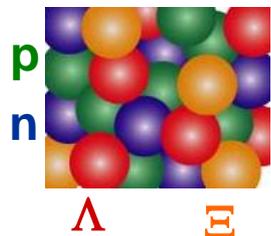


陽子
中性子
通常核

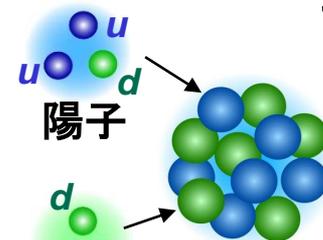
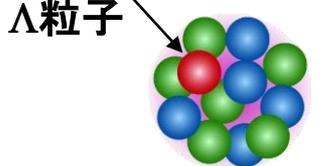
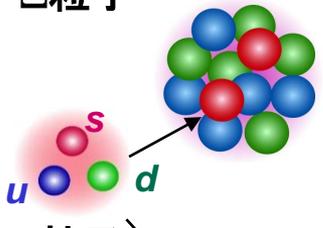
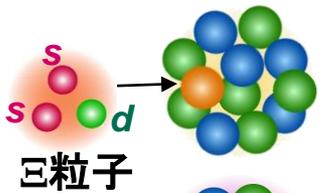
3次元核図表



ストレンジ核物質

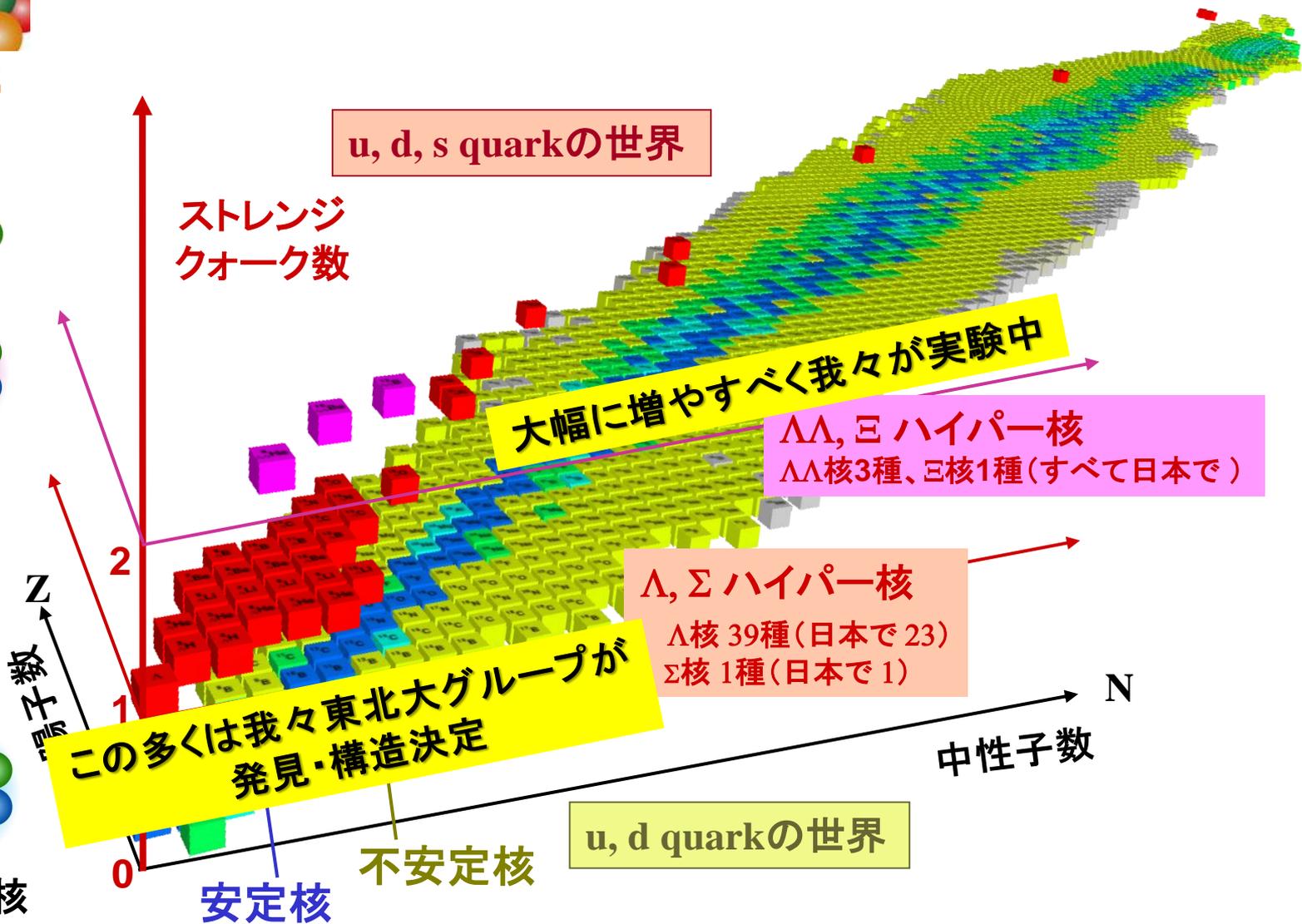


ハイパー核



通常核

3次元核図表



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)

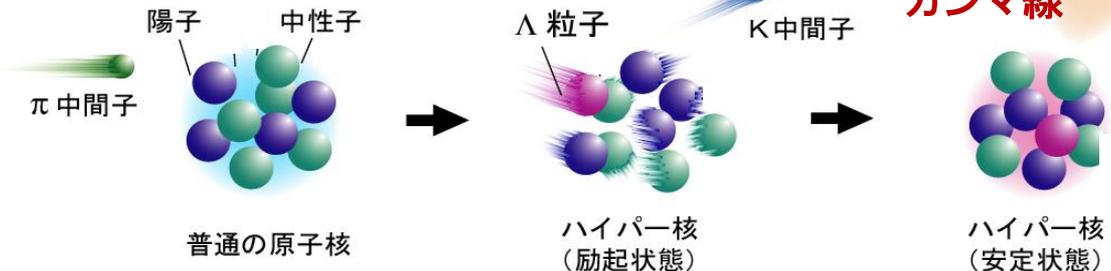
60m x 56m

世界最大のビーム強度(陽子数)
従来の加速器の 10~100倍

東北大を中心に中性子星内部の物質を
調べる実験が進行中

ハイパー核研究の世界の中心に

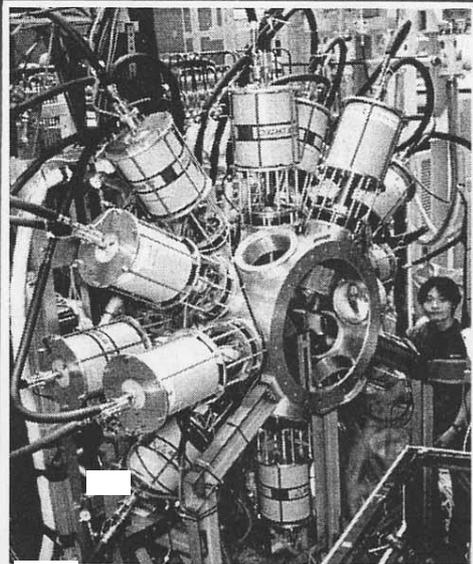
実験例: Λ ハイパー核のガンマ線測定



新型ガンマ線検出器



科学



ラムダ粒子という素粒子を入れた人工の原子核「ハイパー原子核」が放つガンマ線を測定する装置。ハイパーと呼ばれるラムダ粒子加速器研究提供

ラムダ粒子という素粒子を入れた人工の原子核「ハイパー原子核」が放つガンマ線を測定する装置。ハイパーと呼ばれるラムダ粒子加速器研究提供

中性子星の世界探る一歩 ハイパー原子核を見た

国際共同研究チームが成功した。私たちの身の回りは、陽子と中性子でできた原子核や、電子を中心につくられているが、星の終末の姿である中性子星にはラムダ粒子があるかもしれない。変わって物質世界を探るラムダ粒子が一個入ったハ

自然界にはほとんど見られないが、中性子星には、多くの中性子、わずかな陽子、電子とともに存在するとも予想されている。

今回、チームは高エネルギー加速器研究機構(茨城県つくば市)の加速器で、陽子と中性子が三個ずつ、ラムダ粒子が一個入ったハ

研究チームの永江知文・同機構素粒子原子核研究所助教授は「こうした研究が進んで中性子星中のラムダ粒子の存在が確かめられれば、中性子星の中だけとはいえず、物質は陽子と中性子と電子からなるという物質観の変更に迫られることになる」と話している。

この研究は、六月二十六日発行の米物理誌「フジ

2015 06 26

最近のわれわれの成果

配布先：宮城県政記者会、文部科学記者会、科学記者会、原子力規制庁記者会（仮称）、茨城県政記者クラブ、筑波研究学園都市記者会

「荷電対称性」の大きな破れを発見



TOHOKU
UNIVERSITY



平成27年11月25日

報道機関 各位

国立大学法人 東北大学 大学院理学研究科
大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構
国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構
J-PARC センター

J-PARC ハドロン実験施設で “奇妙な粒子”が原子核の荷電対称性を破る現象を発見

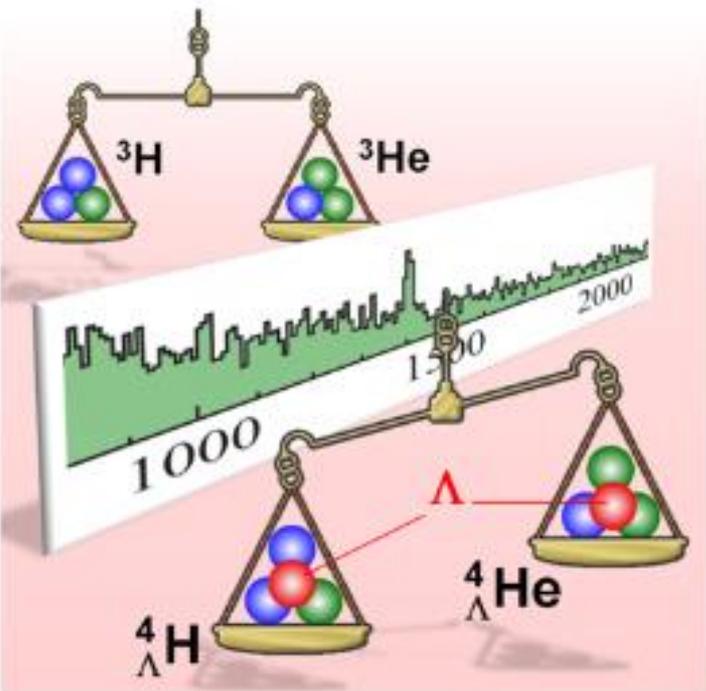
【ポイント】

原子核のもつ基本的な対称性である「荷電対称性」が、原子核に「奇妙な粒子」と呼ばれるラムダ粒子を加えることで大きく崩れることを世界で初めて発見

【概要】

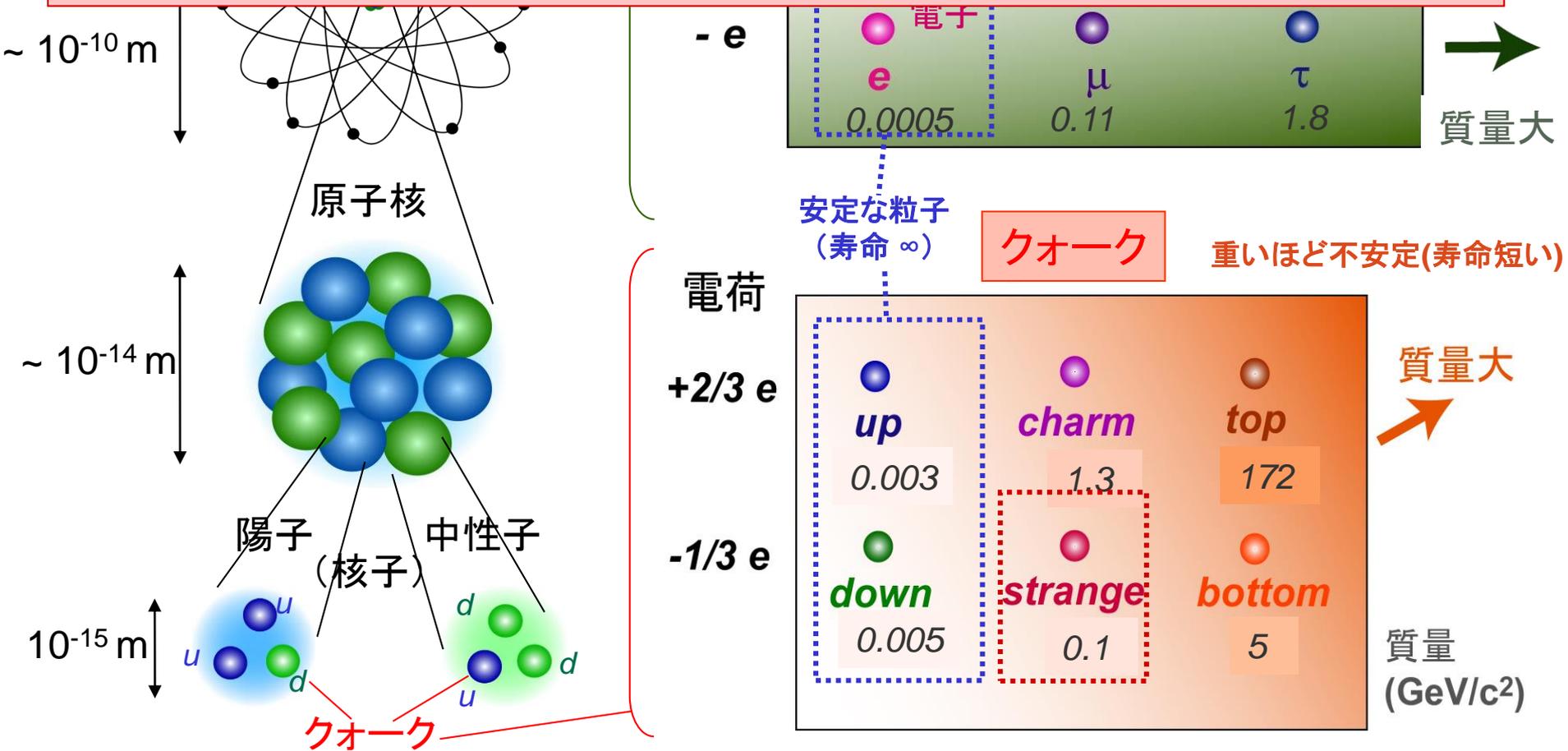
東北大学・高エネルギー加速器研究機構（KEK）・日本原子力研究開発機構（JAEA）を中心とする国際グループは、大強度陽子加速器施設 J-PARC のハドロン実験施設で行った実験で、原子核のもつ基本的な対称性である「荷電対称性」^{※1}が、原子核に「奇妙な粒子」と呼ばれるラムダ粒子^{※2}を加えることで大きく崩れることを発見しました。

Λ 粒子を加えると、原子核での陽子と中性子の対称性が大きく壊れる → 理由はいまだに謎



~~この世界の物質は、陽子・中性子 (= up, down クォーク) と電子
 でできている (20世紀の常識)~~

物質は、up, down, strange クォークと電子でできている (?)
 原子を単位としない物質 (電子がない物質) もある (?)
 (21世紀の常識へ)



まとめ

■ 宇宙における物質の進化

クォーク・グルーオン・プラズマ

↓
ハドロン(陽子・中性子)

↓
原子核(H, He→Fe→U?)

↓
ストレンジ核物質(クォーク物質)?

21世紀の物質観

研究が進行中

■ 重元素合成過程の解明＝中性子過剰核の研究(RIBF)

■ 中性子星物質の解明＝ハイパー核の研究(J-PARC)

どちらの研究も日本が世界を圧倒的にリード
天文観測(重力波など)とも協力して解明へ

レポート問題(原子核物理)

(1) 最先端の核物理研究である

- 中性子過剰核と元素合成過程の研究
- ハイパー核(ストレンジネス核物理)の研究

のいずれかについて調べ、研究目的、加速器施設、実験方法、研究例などについて、A4レポート用紙2ページ程度でまとめてください。

参考文献を複数使用し、出典(URL)を明記する。文献の文章を写してはいけない。自分のことばで書くこと。

文献や他人のレポートの文章を写した文章があった場合は、採点しない。ただし参考文献の図は、出典を記載のうえコピー使用可。

(2) 今日の講義の感想、面白かったところ、わからなかったところ、などを簡単に書いてください。(10行以内)

レポートは、レポートボックスに 7月16日～8月2日(金)15:00(締切厳守) に提出

今日の資料は、以下にカラーで置いておくので参考にしてください。

<http://lambda.phys.tohoku.ac.jp/~tamura/shotai2019.pdf>

おすすめの本

●編集委員

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)

宇宙の物質は どのようにできたのか 素粒子から生命へ

日本物理学会^[編]

物質の誕生と進化の謎に迫る

銀河や星、私たち生命は、どうやって現在の姿になったのか。
ヒッグス粒子やダークマターなど宇宙の謎を、
10名の研究者が、最新の知見から語る。

日本評論社