



理研の博士に聞いてみよう!

金やレアアースの誕生の
などを探っています。



どこで、どのようにできたの?

中性子星の合体で
つくられたのかもしれない。



わ な じょうしん や
和南城伸也 博士

り ろん けん けん い すい しん
理論科学連携研究推進グループ
かい りょう じゅう じ ん
階層縦断型基礎物理学研究チーム 客員研究員

● 重い元素誕生のなぞ

私たちは“星のかげら”からできています。そう言ったら、みなさんびっくりするかもしれませんね。骨や筋肉、血など私たちの体の主な材料は、炭素や窒素、酸素などの元素です。それらの元素は星の中でつくられ、宇宙空間にばらまかれたものです。

宇宙は、138億年前に大きな爆発のような現象の“ビッグバン”によって誕生したと考えられています。そのときできたのは、水素やヘリウムなど最も軽い元素だけです。それらの元素が集まり、やがて星ができます。そして星の中で、炭素や窒素、酸素、鉄などの元素がつくられたのです。

宇宙には、約90種類の元素があります。しかし、鉄よりも重い元素が、宇宙のどこで、どうやってできたのか、わかっていません。鉄よりも重い元素には、金やプラチナ(白金)、レアアース、そして天然の元素で最も重いウランなどがあります。レアアースとは、ネオジムなど合計17種類の元素をま

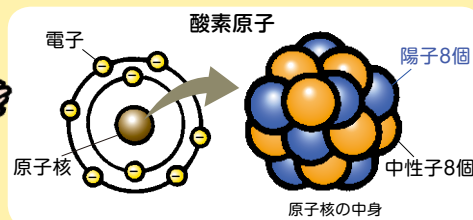
とめて呼ぶときの名前で、携帯電話やゲーム機、パソコンなどのハイテク機器をつくる時に欠かせない元素がふくまれています。

そのような鉄より重い元素が誕生したなぞを、私たちは理研のスーパーコンピュータ「京」などを使って探る研究を進めています。

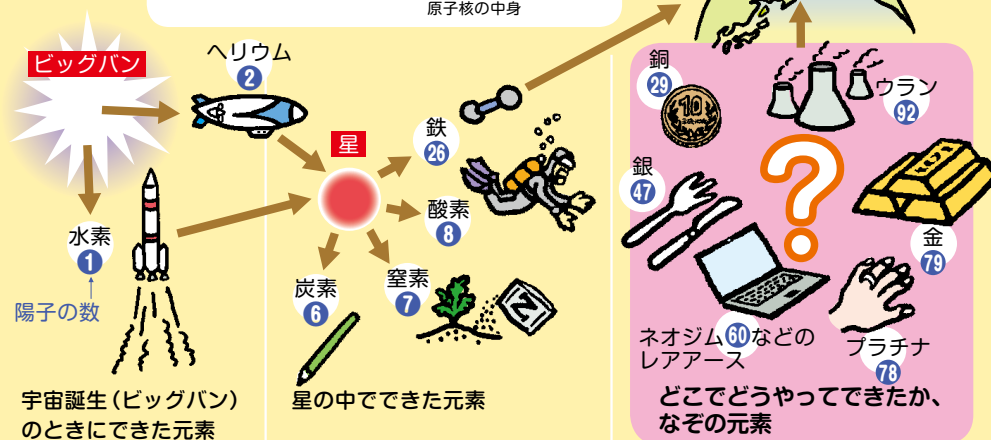
● 元素の種類は陽子の数で決まる

では、炭素や酸素などの軽い元素と、金やレアアースなどの重い元素は、どこにちがいがあるのでしょうか。すべての元素は原子という小さな粒からできています。原子の中心には原子核が1個あり、そのまわりをマイナスの電気を持つ電子が回っています。さらに原子核は陽子と中性子からできています。陽子はプラスの電気を持っていますが、中性子は電気を持っていません。陽子の数が多い原子核ほど、強いプラスの電気を持ちます。

酸素の原子核には8個の陽子、金の原子核には79個の陽子があり、それぞれの陽子数と同じ数の電子が原子核のまわりを回っています。元素の種類は陽子の数で決まるのです。そして、それぞれの元素の重さ(質量)は、原子核をつくる陽子と中性子の合計した数によります(電子はとても軽いので、ここでは考えないことにします)。



重い元素誕生のなぞ



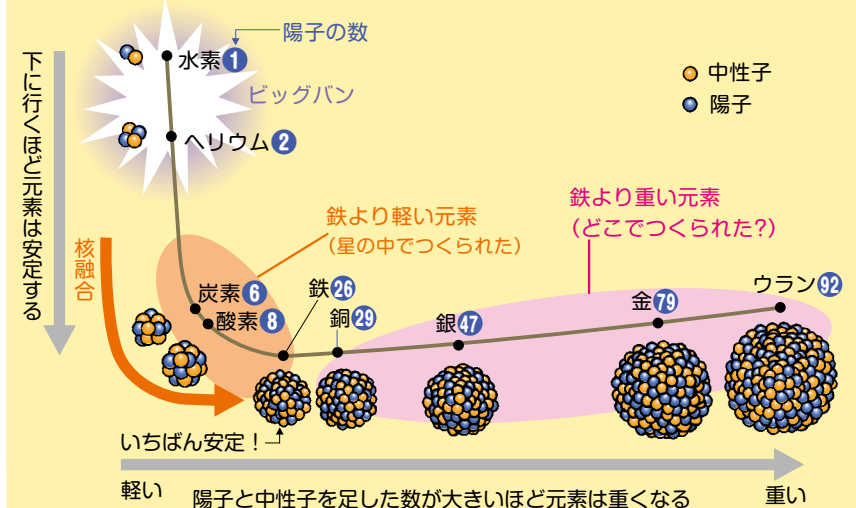
● 星の中では最も安定な鉄までしかできない

炭素や酸素などの軽い元素は、どのようにしてできるのでしょうか。星の中では、二つの原子核が近づいて一つになる「核融合」が起きています。たとえば、陽子2個のヘリウムと陽子6個の炭素の原子核が核融合で一つになり、陽子8個の酸素の原子核ができます。

プラスの電気を持つ原子核どうしは反発し合います。でも、物質がぎゅうぎゅうにつまって高温になった星の中では、その反発力に打ち勝って原子核どうしが近づき、核融合によって陽子の数が多くなった、より重い元素が作られます。下の図の線でいうと、左上の頂上がビッグバンで、坂を下るように炭素や酸素などの元素が作られていきます。

でも、それは底に位置する鉄までです。さまざまな元素の中で、陽子26個の鉄の原子核が、陽子や中性子が強く結び付いていて最も安定です。星の中で起きる核融合は最も安定な鉄ができたところで止まってしまうのです。

星の中で起きる核融合は鉄ができたところで止まってしまう

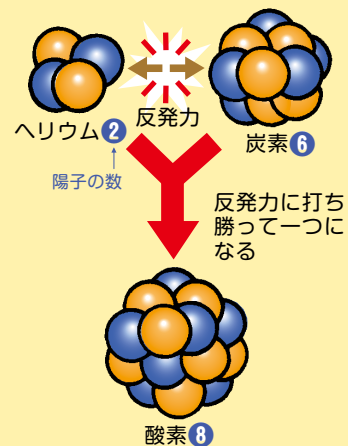


● 中性子がたくさんある高温の場所で重い元素はできた？

では、鉄よりも重い元素はどうやってできたのでしょうか。重い原子核ほ

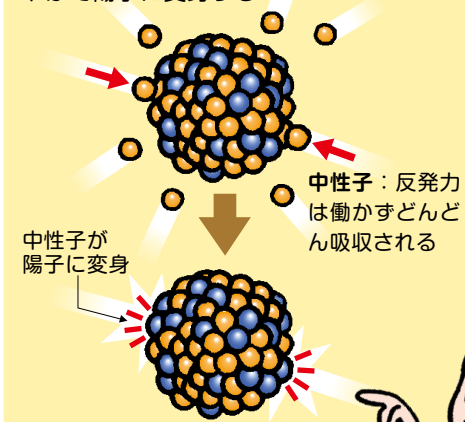
星の中の核融合

原子核どうしは反発し合う



rプロセス

中性子ならば原子核に吸収されて、やがて陽子に変身する



ど強いプラスの電気を持つので、重い原子核どうしはとても強く反発し合います。しかも左ページの図でいえば、鉄より右側は登り坂になるので、特別なしくみがないと鉄より重い元素はできません。

プラスの原子核どうしは反発し合ってなかなか近づけません。電気を持たない中性子ならば、原子核に簡単に近づくことができます。中性子がたくさんある高温の場所では、原子核が中性子をどんどん吸いこみ、その中性子が陽子に変身して、鉄より重い元素が短い時間につくられたと考えられています。それを「r(速い)プロセス」と呼びます。

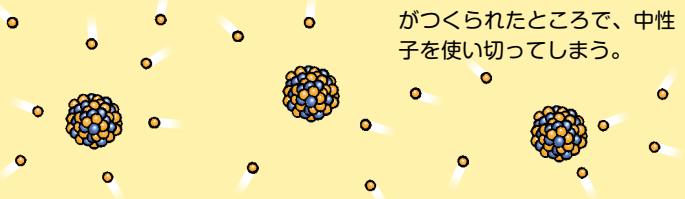
● 中性子星の合体で重い元素が作られた？

では、重い元素が作られる、中性子がたくさんある高温の場所——rプロセスが起きる場所とは、いったい宇宙のどこにあるのでしょうか？

ばらばらな状態の中性子は10分ほどで陽子に変身してしまうため、中性子がたくさんある高温の場所は、宇宙の中でもなかなかありません。

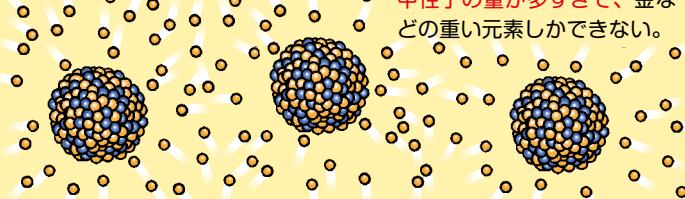
その中で、重い星の一生の最後に起きる「超新星爆発」が最も有力な場所だと考えられてきました。でも、中性子の量が少なすぎることがわかりました。鉄より少しだけ重い元素が作られたところで中性子を使い切ってしまう

超新星爆発のシミュレーション



中性子の量が少なすぎるため、鉄より少しだけ重い元素がつけられたところで、中性子を使い切ってしまう。

ニュートリノを考慮していない従来の中性子星合体のシミュレーション



中性子の量が多すぎて、金などの重い元素しかできない。

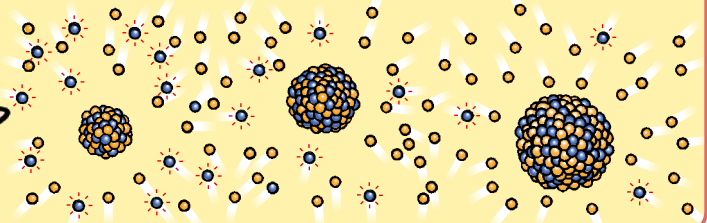
ニュートリノを考慮した和南城博士たちの中性子星合体のシミュレーション

中性子の一部が陽子に変身してちょうどいい量になり、さまざまな種類の重い元素がつけられる。



中性子 → ニュートリノ!
陽子に変身

ニュートリノ!
中性子 → 陽子に変身



い、それよりも重い元素ができないのです。

「中性子星の合体」も有力な場所です。中性子星とは超新星爆発の後にできる天体で、中性子がぎゅうぎゅうに詰まっています。二つの中性子星が合体すると、中性子がたくさんある高温の場所ができると考えられます。

でも、そこでは逆に中性子の量が多すぎることが問題でした。原子核が中性子を一気に吸いこんで、陽子79個の金などの重い元素ができますが、それよりも軽い陽子47個の銀などの元素はつくられない、といったことが起きるのです。

● ニュートリノのおかげで一部中性子が陽子に変身！

私たちは、コンピュータで中性子星の合体のシミュレーションを行い、一部中性子が「ニュートリノ」という小さな粒を吸いこんだり放出したりする反応が起きて陽子に変身することで、中性子がちょうどいい量になることを突き止めました。すると、ある場所では銀ができ、ある場所では金ができるといったように、宇宙に存在するさまざまな重い元素がつけられることがわかりました。

ニュートリノ——そう、2015年にノーベル物理学賞を受賞した東京大学

の梶田隆章先生たちが研究している、あのニュートリノです！

● 今後5年で重い元素誕生の謎が解ける!?

梶田先生たちは、岐阜県の神岡鉱山の地下にある「スーパーカミオカンデ」でニュートリノの観測を続けてきました。さらに梶田先生たちは、神岡鉱山の地下に重力波望遠鏡「KAGRA」という装置をつくり観測を始めます。その「KAGRA」などで、中性子星の合体を、1年に数回観測できると期待されています。

一方、私たちは、理研の「京」を使った研究を進めています。rプロセスでは、1秒ほどの間に原子核が中性子をどんどん吸いこみます。それをシミュレーションで再現するには、たくさんの計算が必要です。普通のコンピュータでは、rプロセスをせいぜい0.01秒間しか再現できませんが、「京」ならば0.1秒間ほど再現して、rプロセスをさらにくわしく調べることができます。また、理研では、「RIビームファクトリー (RIBF)」という巨大な加速器施設で、中性子をたくさん吸いこんだ原子核を実際につくって、その性質をくわしく調べる実験も進めています。これから5年くらいで、鉄より重い元素は中性子星の合体でつけられたことがはっきりすると、私は考えています。