

## この広い宇宙いっぱい Ⅲ

# 「超新星」

2017年1月20日 2017年10月12日改 別当勉

### プロローグ

これまで、ギリシャ時代に始まる天動説から、コペルニクスとケプラーによる地動説への大展開について初回に述べた。第2回は、太陽系を出て恒星についてその種類や進化など、ギリシャ神話による星座から始め、現代天文学の解明を交えながら説明した。

この第3回では、私たちの天の川銀河系の中でも避けては通れない激しい天体に関して述べなければならない。それは「超新星」である。

本シリーズでは、距離感という主題がある。つまり1光年内の太陽系から数光年から数千光年以上離れている恒星系へ、そして10万光年にまたがる天の川銀河へと視線を延ばしていく。そして、百万光年から数十億光年先にある銀河群に及ぶ。それ以上はもう「ビッグバン」という宇宙開闢（かいびやく）に行き着くことになる。遠くをみれば見るほどフィクションが増えていくが、それでも、現代天文学や天体物理学の粋をきわめた究明科学がどれだけ切り込んできているか、かすかな観測事実に基づいて発想豊かな物理学者の仮説が後を絶たない。あたかも、今や古代ギリシャ時代の華やかな発想と想像の活力がよみがえりつつあるとも窺える。半面、アリストテレスのような哲人の天動説のようなものが神がかり的に現れて終止符を打ってほしくないと思う。だから、138億光年先のビッグバン説といえども半分迷信かもしれないと考えるべきである。実は、100億光年先の宇宙を見ることは、視線こそ先に行っているが、46億年前の太陽系誕生よりはるかに過ぎ去った昔話なのでもある。

本編では、私たちの近くで、といっても数千から数万光年先の天空で起きている超新星（スーパーノヴァ）に焦点を当てる。私たちの天の川銀河系では、おおむね50年に1回という頻度で発生しているという。これが解らないと人間を始めとして動植物を構成する元素の起源が不明のままになる。根源たる何から地球が出来て生物が生まれ進化したのか、この広い宇宙の営みの核心に迫ってみよう。

## カミオカンデ (1983~1996年)

超新星は新星ではない。そもそも新星とは、英語で“nova”と言い、語源はラテン語で「新しい」「若い」「最近の」という意味である。結果として、新星という意味に使われている。第1回で取り上げた、アルマ望遠鏡による「おうし座HL星の原始惑星系」こそ新星と言える。すなわち誕生まぎわの星のことになる。

しかし、天文学では巨大恒星の死になるのだから、言葉の誕生の綾には驚きを禁じ得ないが。昔の人はいきなり明るく輝く星をみつけたら、当然、新星と呼ぶことは容易に想像がつく。それが昼間でも見えるほど明るければ「超新星」となることは避けられない。実際に、約千年前に牡牛座に現れた新星は、アメリカ・インディアンが石窟に二つの太陽を描いたほどだから、ものすごい光度であった。いまは「かに星雲」として名残の残骸星雲が見え、ハッブル望遠鏡の画像の中でも出色の美しさに胸が震えてしまう。この画像が私の宇宙探求の原点の一つになっている。

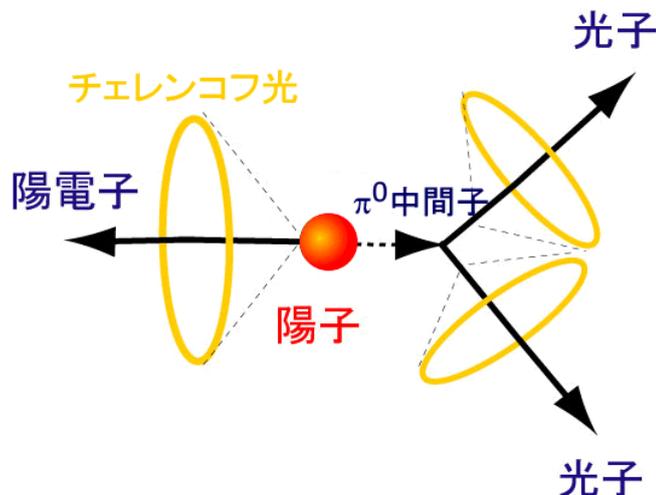
さて、問題はカミオカンデというニュートリノ・アンテナである。これは岐阜県の山奥にある旧神岡鉱山の洞穴の中に造られた。1983年頃である。東大の宇宙線研究における「小柴プロジェクト」ともいべきか、小柴昌俊教授(1926年~)という突撃隊長により構築された実験的ニュートリノ観測装置である。装置という言葉は小さい。3千トンの純水を蓄えられる巨大タンク、形状はドラム缶と同じであるが、これを旧坑道の中に建設したのである。まさに国家プロジェクトに値する。その気宇の大きさは宇宙スケールともいえる。

彼が探求したかったのは、まだ見ぬ「陽子崩壊」という現象である。世界中の巨大加速衝突器でさえも観測されていない。ひょっとしてゼロ戦級の挑戦になるのではないか。

### 陽子が陽電子と $\pi^0$ 中間子に崩壊(大統一理論\*で予言)

東京大学宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設

<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/sk/pdecay.html>



\* 「大統一理論」とは、電磁気力、強い力(核力)、弱い力( $\beta$ 崩壊)という三つの力を統一して記述する方程式を組み上げる最先端の理論のことである。強い力は、湯川秀樹理論でその力すなわち核力を媒介する中間子を世界で最初に予言したものである。

陽子は、138億年前の宇宙創成期より存在している粒子であり、この広い宇宙の見える物質のすべてを構成する基本粒子でもある。私たちは水で生きている。それは酸素と水素から成り立ち、水素は陽子と電子で出来ていることは中学生でも知っている。そして元素周期律表に現れる全ての元素は、その陽子の数で決定され、さらに、炭素、酸素、鉄、鉛、金銀などあらゆる元素が何とも不思議なほど別々の物に見え、特徴も全く違う。それは陽子の数で決まっている。原子核の中で陽子にくっついて中性子の数では決まらず、中性子の数が一つや二つ不足しても余分についていても、“同位体”と呼ばれ不安定で放射線を出しながら安定数に落ち着くか、隣の元素に変わっていく。

あたかも動植物の多様性が元素の世界でもいえることに、あらためて驚愕してしまう。かたや陽子数で、かたやDNA構造で決まってしまう。でも根源はいずれも「陽子」である。

粒子の世界でも「半減期」という死の宿命がある。もし、陽子に半減期があるなら、少なくとも138億年以上となることは素人感覚でも学者感覚でも同じらしい。もし、半減期が解るとこの広い宇宙の何もかもがその半減期に向かって崩壊することになる。恐ろしいことでもある。だから、カミオカンデ・プロジェクトは無謀な挑戦でもあったが、予算を付けた当時の文部省（現文科省）にも度胸の凄い役人がいたことは見捨て難い。

さて、そんな崩壊しそうな陽子がどうして水の中で観測できると結論したのか。

まず、タンクの3千トンという純水量である。この中にはおおむね  $10^{32}$  個の陽子が含まれているようだ。この広い宇宙では  $10^{80}$  個ほどの水素元素があると見積もられているから、宇宙年齢138億年は、およそ  $10^{10}$  年であり、例えば半減期が1兆年とすれば  $10^{12}$  年となる。素人換算では、宇宙の始まりから1兆年後（今から9900億年後）に、約  $10^{70}$  個の半分の陽子が全宇宙で崩壊していることになるが。純水タンク内の水素数は全宇宙の  $10^{50}$  分の一ではない。やがて、その時そこで起きるのは約  $10^{30}$  個の半分と膨大な数になる。あくまでも凡人の計算で悲しいかな、専門家の言が必須である。

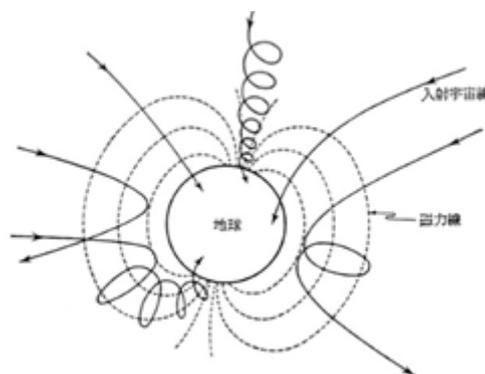
スーパーカミオカンデは1996年に運転を開始して以来、10年以上も観測を継続していますが、陽子が壊れた証拠はまだ得られていません。陽子が壊れなかったという観測結果から、陽子の寿命は少なくとも  $10^{34}$  年以上（宇宙の年齢が  $10^{10}$  年くらい）と推定されています。もし陽子崩壊が観測されれば、素粒子の大統一理論検証への突破口になります。

《「スーパーカミオカンデについて」<<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/index.html>>より引用》

$T$ (半減期)と  $\tau$ (平均寿命)の関係は、 $T = \tau \log 2$  .

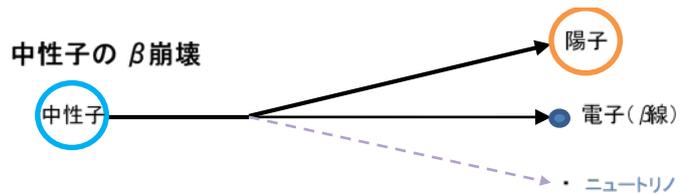
平均寿命は半減期の1.44倍。逆に、半減期は平均寿命の0.693( $\log 2$ )倍

崩壊のトリガーは半減期とか寿命という自然老衰に限らず、宇宙線と水素原子との衝突という突発的現象でも起きる。いわば交通事故死のようなものである。故にカミオカンデの小柴先生は半減期よりも宇宙線による陽子崩壊の実際に迫りたかったのであろう。



なお、宇宙線はほとんどが地球磁場の影響を受ける。はるか遠方から飛んでくる荷電粒子が地球磁場の中に入るとそのエネルギーと始めの入射方向に応じていろいろな軌道を描き、あるものは地球表面に触れずに遠ざかっていくという。

ちなみに原子核を構成するもう一つの粒子「中性子」は、半減期15分で $\beta$ 崩壊してしまうが、何故か陽子と電子が残される。これは、ラザフォード(1871-1937年)により発見された原子核の崩壊による三種の放射線、すなわち、 $\alpha$ 線、 $\beta$ 線、 $\gamma$ 線のうちの一つである。しかしながら、原子核の中で陽子と密着していると壊れないのだから不思議でもあるが、核力という「強い力」で結ばれているからであろうか。



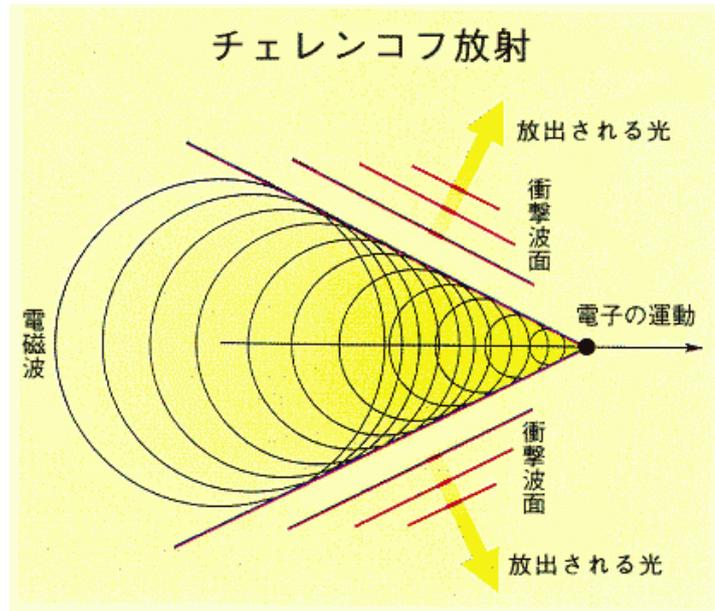
素粒子論の話になり脱線してしまうから本論に戻る。

宇宙より降り注ぐ数多の宇宙線の中にはとてつもなく大きなエネルギーを持つものがある。あの湯川秀樹(1907-1981年)の $\pi$ 中間子も、ディラック(1902-1984年)の陽電子の発見も宇宙線観測で行われた。もともと小柴先生は、加速器衝突実験よりも宇宙線による実験に興味があったと聞く。このため、地中深い洞穴の中にタンクを据え、千m以上の岩石地層により軟弱宇宙線や原子炉からの放射線をフィルタリング(ろ過)して強烈な宇宙線に絞り込む必要もあった。次に出てくる不可思議な光の観測のため、余計な雑音的粒子線を除いて、たとえば音響的に限りなく無音状態にすることが実際の目的であった。

## チェレンコフ光

この光は、粒子が光速を超えて走ると発生する。たとえば、弾丸やジェット機が音速を超えると出る衝撃波（サブソニック）のようなものに対照できる。

あれ、「なにものも光速を超えられない」という特殊相対論に反するのでは？ ありえないのでは？ と思うのが普通である。ところが、水の中では光の屈折現象で解るように、水中の光の伝播速度は真空中の75%に落ちる。それゆえに電子などの小さな粒子は光速度を超えるものが現れ、すると光の衝撃波として『チェレンコフ光』が発せられる。



<http://icrhp9.icrr.u-tokyo.ac.jp/japanese/cherenkov.html>

この現象は、1934年に旧ソ連の物理学者パーヴェル・アレクセーヴィッチ・チェレンコフ（1904-1990年）によって発見されたため、この名が付けられたのである。

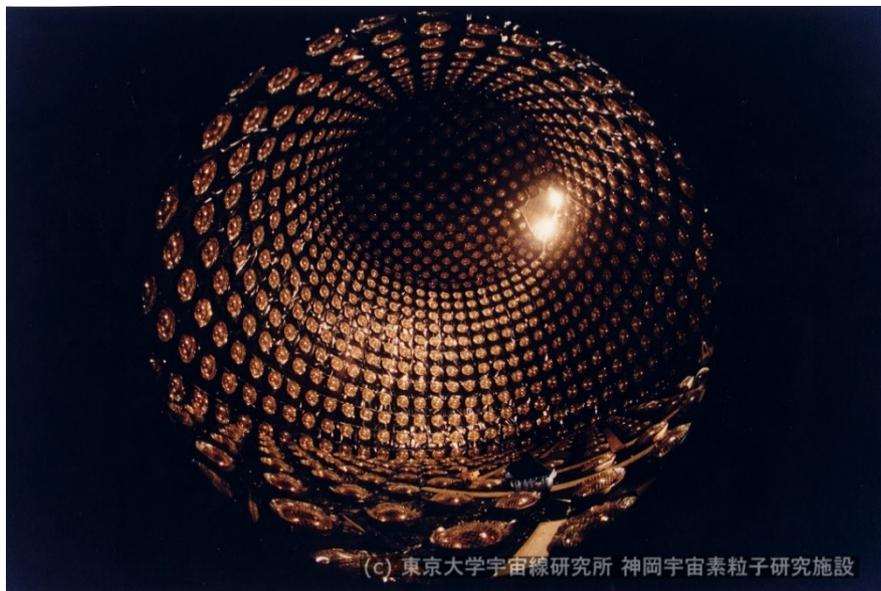
これがカミオカンデの観測中枢機能となった。

小柴先生はこのかすかな青白いチェレンコフ光を検出するため高性能かつ大口径（20インチ=50cm）の光電子倍增管を浜松フォトニクスに開発・製造の発注をしようとした。昭和54年（1979年）頃である。世の中に例のない高精度・大規模センサーのためそのメーカーはさすがに躊躇した。つまり、後利用の目途がつかない開発は、開発費の回収が不可能である。最初に全額払ってくれるはずがない。予算というのはアバウトで削減というヤスリに掛けられて出来上がることは、どこでもいつの世でも鉄則として生き残っている。まるで陽子みたいだ。しかし、一端成立すると、そのまま固定されて実績になる。そして経済性が無視されて毎年まかり通る妖怪になってしまい、社会を毒する。これに敏感に勇敢に立ち向かう民主国家や企業だけが生き残るのであろう。

小柴先生は、その第一次的なハードルを乗り越えて、というよりも浜松フォトニクスの勇断もあったのかもしれないが、その会社は赤字覚悟で受注した。法人も人間もギリギリのクリティカルな状況を前向きに打開するから、勇躍できるのであろう。この会社はとにかく自分たちの光電管製造・販売で安定して黒字経営してきたのに、好んで冒険をおかすことはないのだが、おそらく小柴先生の熱意を込めた説得と社長の経営センスが合致したのにちがいない。たぶん、経営の革新は、マンネリ的なロー・リスク／ロー・リターンでなく、ハイ・リスク／ハイ・リターンを狙うから起きることに気づいていたのかもしれない。初期の起業精神は忘るべからず、

という気構えになろうか。結果、みごとに昭和57年（1982年）に完成品1050本を納入した。

この広い宇宙の営みで言えば超新星爆発にたとえることができよう。



<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/detector/image.html>

出来上がったカミオカンデの3千トンの純水タンクの中は上に掲げる画像のようである。巨大なドラム缶の側面・底面・上面に浜フォト製造の世界一の大口径光電子増倍管が1000本びっしりと取り付けられている。

カミオカンデの光センサー：光電子増倍管（口径：50cm）



<http://blog.miraikan.jst.go.jp/topics/20151009post-637.html>

## SN1987A

それは1987年2月に起きた。と言っても、16万光年先の大マゼラン星雲で超新星爆発が起きたと言うべきである。16万年前の出来事である。この星雲は私たちの天の川銀河のそばにある矮小銀河あるいは伴銀河とも呼ばれている。南天の空で南半球ではよく見られるけれども北半球からは無理である。したがって、いきなり光り出した超新星の出現は、南米チリの天文台スタッフが、口径わずか26cmの望遠鏡で偶然見つけた。またたくまに世界中の天文台に連絡され、南半球ではほとんどの望遠鏡が、定常観測業務のなにもかも放り出して一斉に向いたのである。

そして、その超新星から $10^{-16}$ cmほど小さくて誰も見るできないニュートリノが $10^{58}$ 個も宇宙に飛び散った。それらのうち地球までやってきたことを我が国のカミオカンデが捉えた。チェレンコフ光により光電子増倍管に微弱な電流が走ったのである。計11個ほど感応したそうだ。1987年2月23日、天文学界では大事件となった。さっそく、オーストラリアの天文台から大マゼラン星雲における超新星爆発の直後の画像が天文学界を駆けめぐった。

[アフター]

[ビフォー]



<http://imagine.gsfc.nasa.gov/science/objects/supernovae2.html>

(アングロ・オーストラリア天文台撮影)

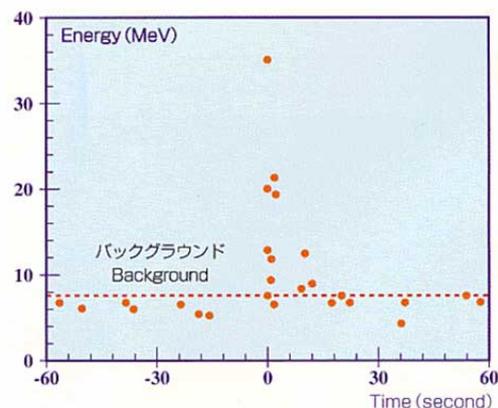


<http://cdn.phys.org/newman/gfx/news/hires/2014/1-iscosmicradi.jpg>

そして、カミオカンデでは、数日かけてコンピュータ・データの分析と集計が行われた結果、右図のような光電子増倍管のヒット数分布をとりまとめて発表した。まだ便利なGUIのイベント・ディスプレイは無かった時代でもある。

(GUI : Graphical User Interface)

チリで「爆発が撮影された時間」が10:30であり、カミオカンデが捉えた「ニュートリノが地球に到達した時間」が07:35であったので、超新星爆発に関する理論の予言どおり3時間ほど爆発前にニュートリノが抜け出したのだった。



[http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/physics/supernova\\_sub02.html](http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/physics/supernova_sub02.html)

このことは、ニュートリノがほとんど光速で飛ぶから質量（重さ）はゼロではないか、でなければ光速に達すると特殊相対論により質量無限大になるということになるので飛べなくなる。これはやがて、ニュートリノ振動という現象でくつがえる。

超新星内での爆発は衝撃波によりコアから星の表面に伝わるが、コア周りに鉄原子核の崩壊でたまりに溜まったニュートリノが軽すぎて微小すぎて、衝撃波と光よりも素早く飛び出てしまらしい。それが、以前より計算されて衝撃光よりも数時間～数日は早いということが予言されていた。この時間幅は、超新星のもとになる巨星の質量によることである。

16万光年先のニュートリノ  $10^{58}$  個は、太陽系に届く数は次のように計算できる。

$$10^{58} / 4\pi r^2 \cong 10^{58} / (3 \times 10^{37}) \cong 3 \times 10^{20} / \text{km}^2$$

$$4\pi r^2 \cong 12 \times (16 \text{ 万光年})^2$$

$$12 \times (16 \text{ 万} \times 10^{13} \text{ km})^2 \cong 3 \times 10^{37} \text{ km}^2$$

私の計算では、 $1 \text{ m}^2$  当たり  $3 \times 10^{14}$  個の超新星ニュートリノが地球に飛び込んで来た。カミオカンデの断面積をおおよそ  $100 \text{ m}^2$  と見積もると、すなわち数兆個が通り抜け、そのうちわずかに11個が水素の電子をはじいてチェレンコフ光を出したことになる。

また、この超新星爆発の際、太陽がその半生の46億年間に放出する全エネルギーの99%以上を、約10秒間にニュートリノとして放出するというから、爆発散光、爆裂衝撃波、各種放射線すべての後釜たちのエネルギーを遥かに超えている。この10秒間という理論の予言どおり、カミオカンデで観測されたのも10秒間であった。机上の理論とはいえ、凄いものである。

この観測事績は凄まじい奇跡である。カミオカンデの「太陽ニュートリノ観測」の実験運用開始がなんと前月の1987年1月だった、かつ小柴先生の定年退官が同年3月だった、のであるから「神の仕業」としか思えない。これにより、小柴プロジェクトは全世界の天文学界と物理学界に、超新星のような衝撃波を浴びせたのであり、だから、ゼロ戦級の日本の快挙と言っても過言ではない。ゼロ戦を開発した堀越二郎に並んで、小柴先生は稀にみる「神の子」であるかもしれない。

遅まきながら、2002年にノーベル物理学賞に輝いた。ノーベル賞選考団体\*というのは人間臭く、かつ人種偏見をもつ推薦委員が当時は少なくなかったらしい。アインシュタインすら一般相対性理論について太陽近傍での光の曲がりという時空の歪みが観測されて実証されても、無視されて、彼は他の研究「光量子仮説」でノーベル物理学賞を受賞した不可解な歴史もある。ユダヤ人差別ではないかともささやかれた。このような事例は数多くあり、当然ながらノーベル賞選考団体が集中的に批判された。結果として、隠密の推薦・選考委員たちに替えて新たな委員たちが指名されたらしく、これも隠密であるが、どうも小柴先生の受賞以降、日本の物理学者や化学者、生理医学者が引きも切らないほど受賞に輝き始めたのも、そういった反省がノーベル賞選考団体に起きたのかもしれない。当然ながら我が国における自然科学の研究自体が質も量も格段に伸びたことは言わずもがなである。ノーベル選考者たちに言わせれば、賞の格式を守るため実証の過程を見守って慎重に臨んだゆえに遅れたという言い訳はあるだろう。言いたいことは、小柴先生の研究プロジェクトが超新星ニュートリノのチェレンコフ光のごとく輝いてノーベル賞選考団体を清めたのではないかと身震いで考えてしまう。

そんなことよりも、この成果からノーベル賞など待たずに即座に「ニュートリノ天文学」という分野が幕を開けたことの方が遥かに大きな世の賛美である。

#### [\*注] ノーベル賞選考団体について

選考の過程や基準は受賞の50年後まで公表されないが、賞によって担当する機関は異なり、それぞれ毎年数百から数千通の候補者の推薦依頼状を過去の受賞者や世界の学者、専門家、関係者らに送ると言われている。そして各機関に提出された推薦状を基に、厳密・公正な審査が行われ、最終的に選考者の多数決投票により受賞者が決まる。選考は、

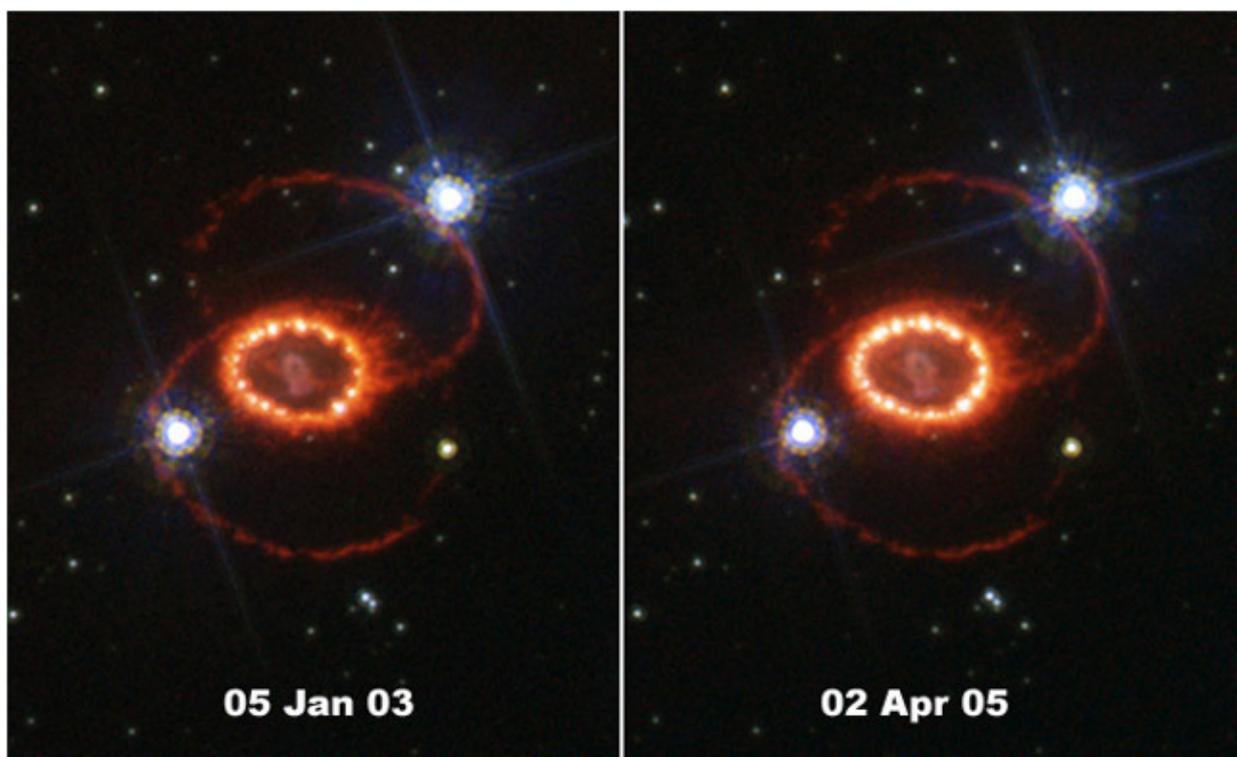
物理学賞、化学賞、経済学賞は	スウェーデン王立科学アカデミー、
医学生理学賞は	カロリンスカ研究所、
文学賞は	スウェーデン・アカデミー、
平和賞は	ノルウェー・ノーベル委員会

が担当している。ノーベル賞の賞金は、経済学賞以外は、**ノーベル財団**が基金を株式や不動産投資などで運用した利子により決める。経済学賞は、スウェーデン銀行がその金額に合わせて準備する。

<https://kotobank.jp/word/%E3%83%8E%E3%83%BC%E3%83%99%E3%83%AB%E8%B3%9E-112414>

## その後のSN1987A

2003年、2005年にハubble宇宙望遠鏡にて撮られた画像は次のとおりである。



<http://www.holoscience.com/wp/supernova-1987a-decoded-2/>

Credit: NASA/STScI/CfA/P.Challis.

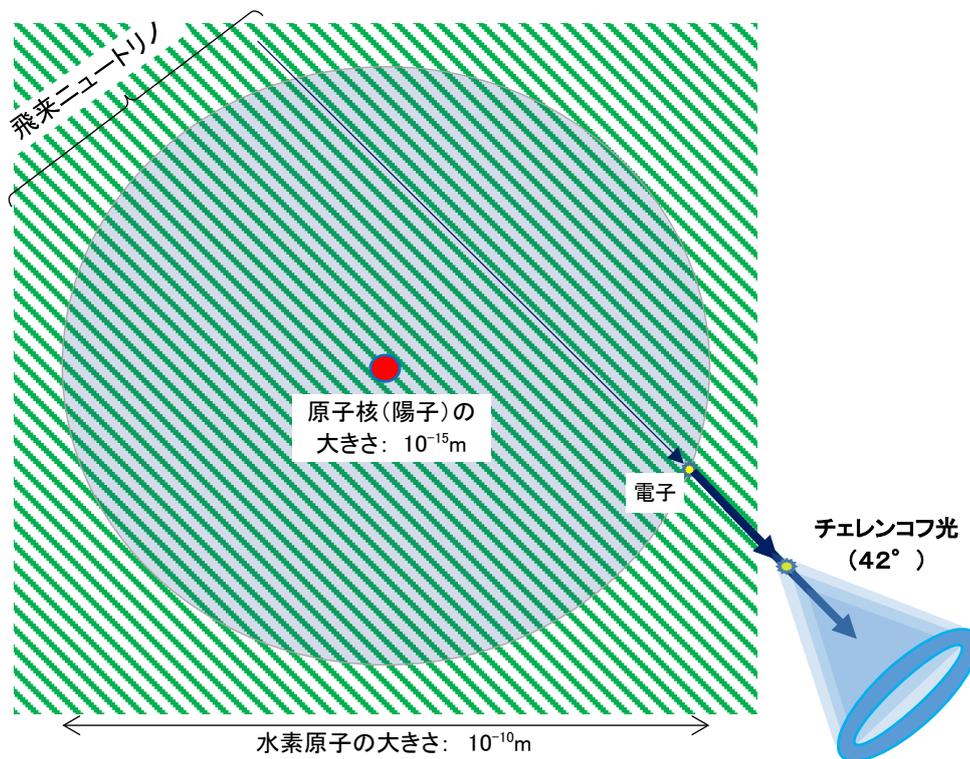
16年後のSN1987Aの画像では、衝撃波が広がる様子が観える。小さく明るいパール・リングは、爆発前に拡散したガスに衝撃波がぶつかって輝いているもので、それより広く薄い輪ゴム状も爆発のずっと以前に放出されたガスの名残でもあろう。しかし、日本古来の鼓(つづみ)のようになんと幾何学的に美しい創造の現場であろうか。近くの恒星やその惑星にとっては恐怖の爆裂だったはずである。



<http://www.matsurishop.jp/goods/okomono/tsudumi.html>

## ニュートリノの物質透過性

超新星ニュートリノは、太陽や地球をスイスイと通り抜けるから現存する測定器による観測は困難を極める。さらに超新星自体が、天文台に高性能望遠鏡が世界中に設置されてから生起していない、というか見えるほど近くで起きていなかった。3千トンの純水の中に $10^{32}$ 個もある水素原子は、原子核である陽子と電子から構成される。光速に限りなく近いスピードで飛んでくる何兆個ものニュートリノが人間の体内もすり抜けるが、さすがにカミオカンデの純水に飛び込んだ数十兆のニュートリノは水： $H_2O$ の電子のいくつかにぶち当たり、電子を光速に近い速度で弾き飛ばしてあのチェレンコフ光が発せられたのである。これが素粒子論では「弾性衝突」というようだ。その模様を疑似的に描くと、次図のようになる。



原子核（陽子）と電子の距離は、陽子の大きさの5万倍ある。喩えると、径10cmのソフトボールを陽子にすれば、砂粒以下の電子の軌道は5km先を雲のように回っている。もともと電子の大きさ、つまり直径は測れない。つまり、物を測るには光を投じて観るしかないが、光を当てると電子が動いてしまい観測できないのである。これを量子論的には不確定性原理で「揺らいでいる」と言うように、粒子でありながら光波のごとく回折したり、波のようにもふるまう。いずれにしても、原子の中はニュートリノから見るとスカスカなのである。他の元素すべてが、あたかも宇宙空間のように隙間だらけなのだ。だから万物をすり抜ける。しかし時々電子にぶつかる。陽子にもあたるはずであるが、質量が電子の1800倍もあるから陽子はびくともしないだろう。

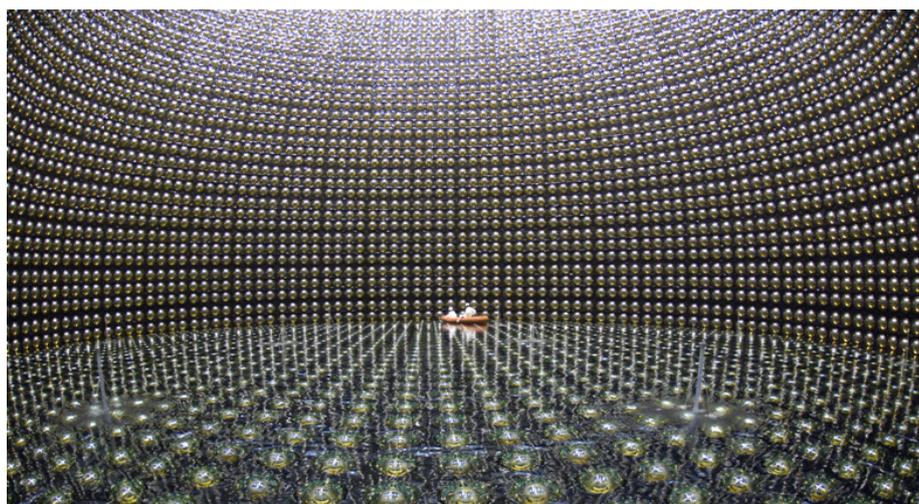
カミオカンデに飛び込んできた $4 \times 10^{12}$ 個ほどの超新星ニュートリノが、 $10^{32}$ 個の水素原子をすり抜けたが、11個の電子を弾いた。だから、10倍の新しい純水タンクを造れば百

個以上も観測できるという推定が成り立つ。超新星爆発が数千光年内で起きれば、数百万個も観測できることになるから、おそらくコンピュータすらオーバーフローして、コンピュータもチェレンコフ光を発生して停止してしまうかもしれない。

### スーパーカミオカンデ (SK)

現在のスーパーカミオカンデ=SK (1996 年～) は5万トンの純水を貯められ、光電子倍增管は1万1千本も貼り付けられている。これで浜フォトの開発費はほとんど回収されたにちがない。これはカミオカンデの10倍以上のという拡充型であるが、光電子倍增管はセンサー感度を向上させた SK仕様である。SKの事業費は約100億円であり、第三世代のハイパーカミオカンデでは800億円に上るので我が国単独では厳しい。また世界にPRするという大きく広い意味合いもあって国際プロジェクトにしたという。賛同各国に分配されるが、日本はこれまでどおり100億円ほどの拠出になるそうだ。

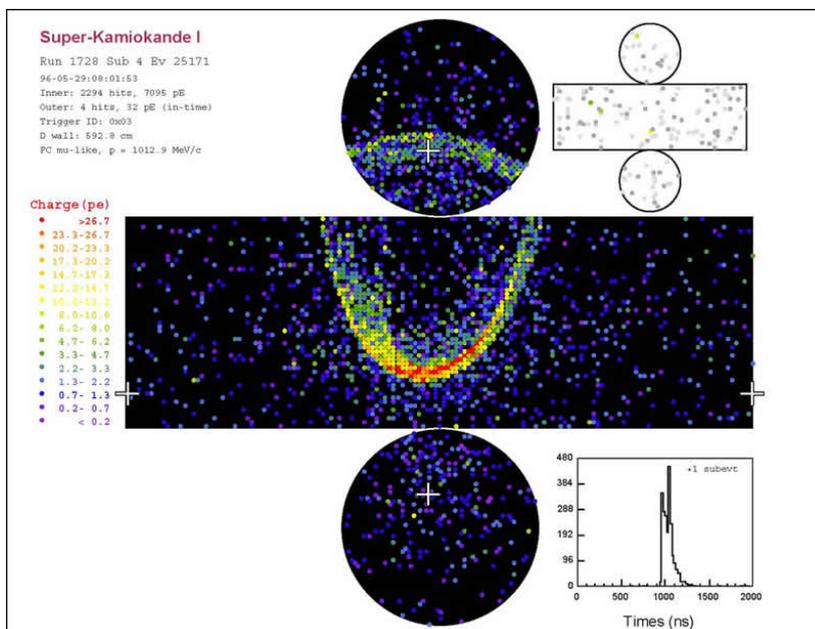
スーパーカミオカンデ内部：東京大学宇宙線研究所附属神岡宇宙素粒子研究施設



<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/>

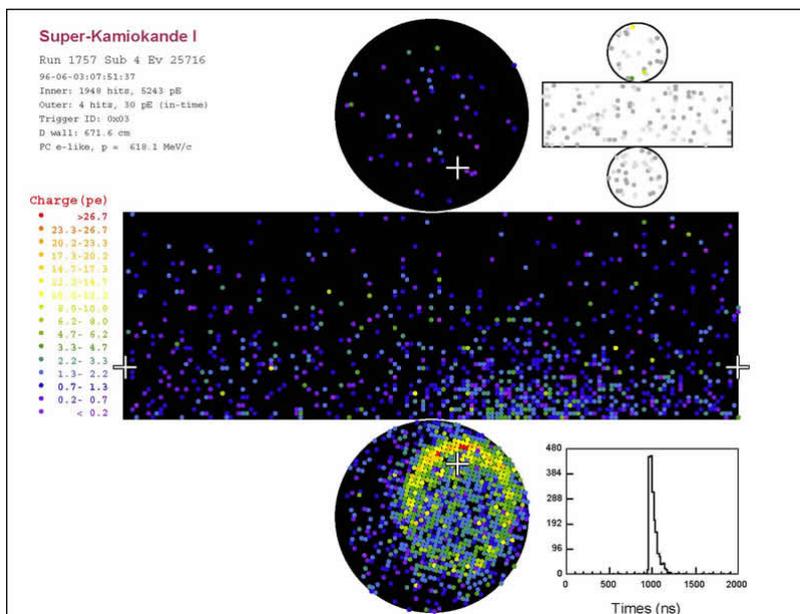
そして、かすかに発光するチェレンコフ光は次の画像のようにPC上でも「イベント・ディスプレイ」としてGUI (グラフィック・ユーザ・インタフェース) で監視できるようになった。初期のカミオカンデには付いていなかったが、現在のSKでは、さすがに最新ITが投入されたから、あの微弱なチェレンコフ光の見事なリング画像がリアルタイムで観られる。

ミューオンニュートリノ



チェレンコフ・リングがはっきりと見える。ミューオンニュートリノは水中の陽子などと反応してミューオンに変化する。実際に検出するのは、そのミューオンが放出したチェレンコフ光である。右上の外水槽の光電子増倍管はほとんど光を受けていない。

電子ニュートリノ



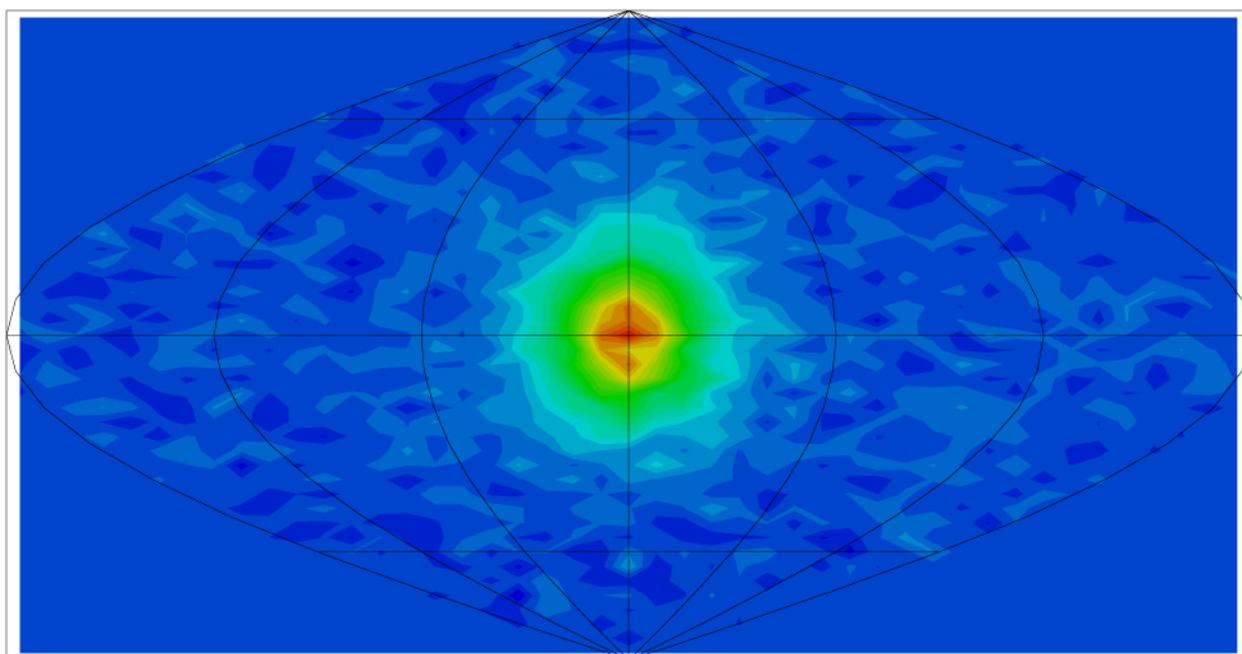
電子ニュートリノは水中の電子を叩き出す。電子は水中で電磁シャワーを発生するため、チェレンコフ・リングがぼやける。

このような画像化により、ニュートリノ天文学が本格化した。つまり、望遠鏡の条件をクリアすることである、恒星の観測のように

方角、明るさ（光度）、色（温度）

が観測できること、に近づいてきている。ちなみに「太陽ニュートリノ観測」においては、次のような画像まで再現できたという。ニュートリノで天体を観ることの端緒に着いたのである。あとは、第三世代のハイパーカミオカンデにより精度を上げるだけで、電波望遠鏡に肩を並べそうだ。なお、地球すらコアで核分裂が起きて地球ニュートリノが発生しているという。

SKによるニュートリノで見た太陽



横軸は日心黄径で、縦軸は日心黄緯。SK-Iの太陽ニュートリノデータを日心座標上に射影。

<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/physics/solamu.html>

## ニュートリノ振動

SKの観測の中で、驚くべき事象がみつかった。なんとニュートリノ振動という現象である。これにより、東大宇宙線研究所所長の梶田隆章教授が2015年ノーベル物理学賞に輝いた。つい最近の出来事で、日本人は誰もが意気高揚した覚えがある。さすがに日本人の学識レベルは欧米に対向できるまでに成長したのだと。しかも、アジアでは群を抜いて他に誰もいない。あれほど覇権主張だけしかない日本バッシングの中国でも、さすがに、国際学会に出たとしても、頭は上がり胸も張れないことが臉に浮かんで、私たちは溜飲をさげる。とはいえ、私たちは梶田教授の成果を理解しているのだろうか。そこは筆者も深く反省している。理解していないのに威張るのは、虎を後ろ盾にした鼯（イタチ）になってしまう。

そこで、いつもの素人感覚で、「質量がある分け」、「振動の解明」、「重さの推定」という3点でニュートリノ振動に分け入ってみよう。

### ニュートリノ振動によりニュートリノに質量（重さ）があると、どうして判るのか？

振動というと振り子の様子が思い浮かぶ。仮に、輪ゴムを天井にぶら下げてもう一つの切った輪ゴムをそっと掛けたらどうなるか、たぶん微動だにしない。厳密にはわずかに揺れるかもしれない。錘（おもり）を引っ掛けたら上下に振動するのは目に見えている。これが振動すること自体、重さがあるということなのだろう。喩え話としては的確でないかもしれないが。理解するためには、私たちの感覚で受け止める手法として適切になるのではないか。



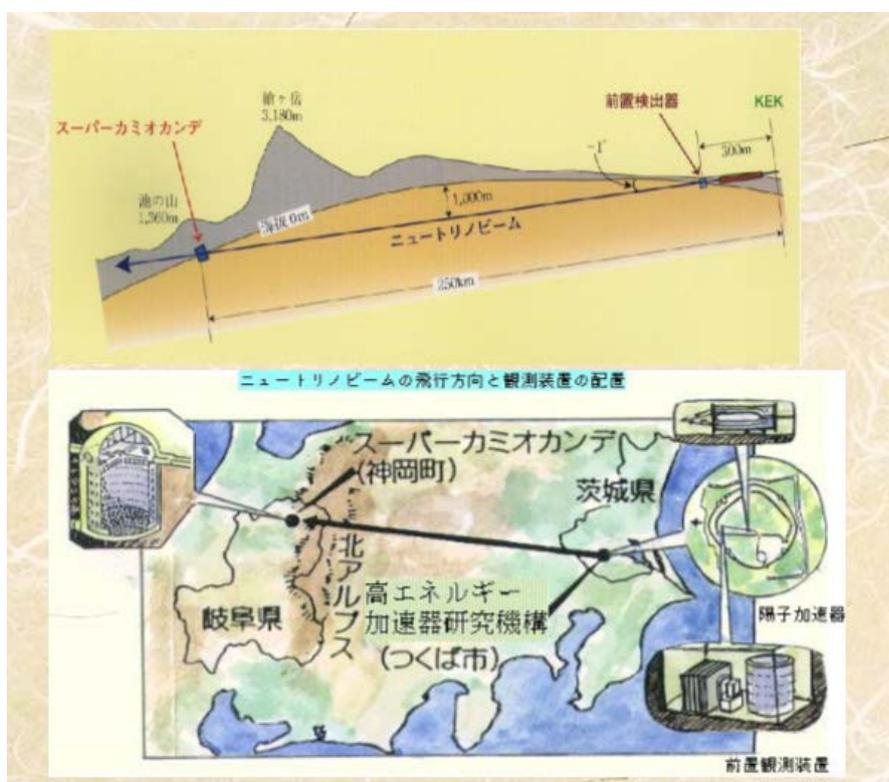
光は電磁波であり、素粒子論では「光子」と呼ばれて粒子類なのであるが、質量がゼロである。だから振動は起きない。というか、そのまま変化せずに伝搬する。光は発信源の情報をそのまま伝えてくれる。いくら遠くてもスペクトルを見ると元素の吸収線や輝線が運ばれ、人類は発信源の恒星にどのような元素があるか解る。質量ゼロなので変化しないのだ。

ニュートリノは超軽量だが、たくさん集まれば結構な質量になり、一時は、ダークマターの候補にもなった。ダークマター：暗黒物質はこの広い宇宙にあるらしく、見えなくて何物もすり抜けるのに重さだけがあるという代物なのだが、次回「銀河」にて解説する。

## ニュートリノ振動は、どうして判明したのか？

それは、SKにおける大気ニュートリノの観測で、地球の裏側から地球を貫いてくるものの数が表側の半分しかなかったのだ。もともとは旧いカミオカンデで太陽ニュートリノ観測において理論より少ないことが判ったことから研究が始まったのである。大気においても宇宙線が空気の分子にぶつかっていろいろな粒子を二次的に飛ばしている。ほとんどのケースでニュートリノが発生するという。中間子や陽電子の発見も宇宙線観測にて行われた歴史もある。

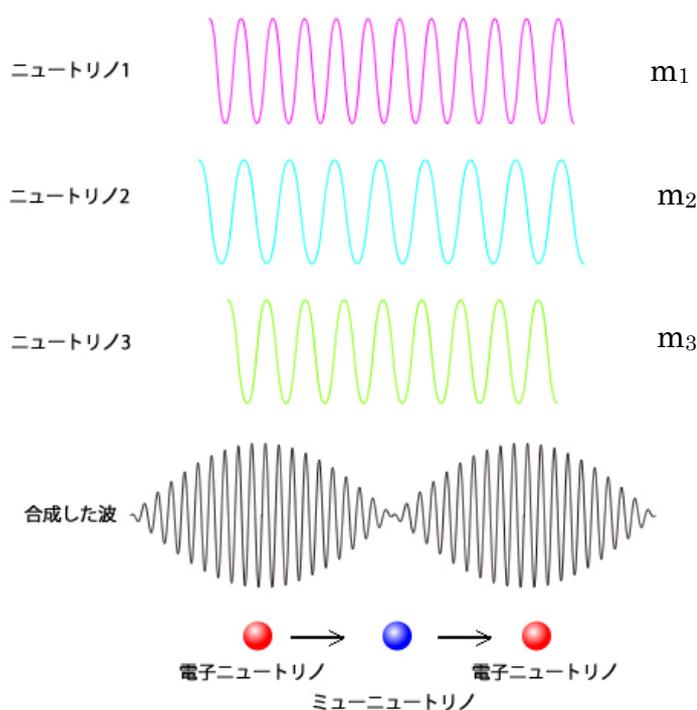
この振動現象をさらに人工的な実験が必須として、K2Kなどの実験が行われた。つくば市にある高エネルギー加速器研究機構（KEK）から神岡のスーパーカミオカンデ（SK）にニュートリノ・ビームを飛ばすという構成で試みたから“K2K（K to K）”と呼ばれている。これにより「振動」の様相の確証が得られた。



「ニュートリノ振動：島根大学集中講義 2009. 02」より

[http://osksn2.hep.sci.osaka-u.ac.jp/~naga/kogi/shimane-class09/shimanelec6\\_nuosci.pdf](http://osksn2.hep.sci.osaka-u.ac.jp/~naga/kogi/shimane-class09/shimanelec6_nuosci.pdf)

その様子は、KEK発の電子ニュートリノがミューニュートリノに変化する実験結果が東大宇宙線研究所から、次の戯画で説明されている。



異なる振動数を持つニュートリノの波が合成されてうなりが生じ、空間を飛ぶ間にニュートリノのフレーバーが移り変わる。  
<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/sk/neutrino.html>

ニュートリノは「質量」という分類で分けることもでき、 $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$  という3つの異なる質量を持ち、それらの重ね合わせでフレーバーの種類ができる。具体的な関係は次表のとおり。

< <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/sk/neutrino.html> >

フレーバー	質量による分類		
	$m_1$	$m_2$	$m_3$
電子ニュートリノ	○	+ ⊙	+ ●
ミューニュートリノ	○	+ ⊙	+ ●
タウニュートリノ	○	+ ⊙	+ ●

この結果、標準理論におけるフレーバー（香り）という妖しい、都合だけでとってつけたような机上の理論の浅はかさが暴露したのである。標準理論でノーベル物理学賞受賞した学者たちも大勢いるから、おおかたの物理学者は、建前上、「標準理論を超えた物理への突破口になる」と、控えめに言及しているが、早い話が「見直せ！」という神の命令に等しい。

## 重さはどのくらいに推定できたのか？

実験結果として、ニュートリノの質量は電子やクォークの質量に比べて **100 万分の 1** 以下と判明した。なぜ非常に小さいのかという問題は依然として謎に包まれているという。

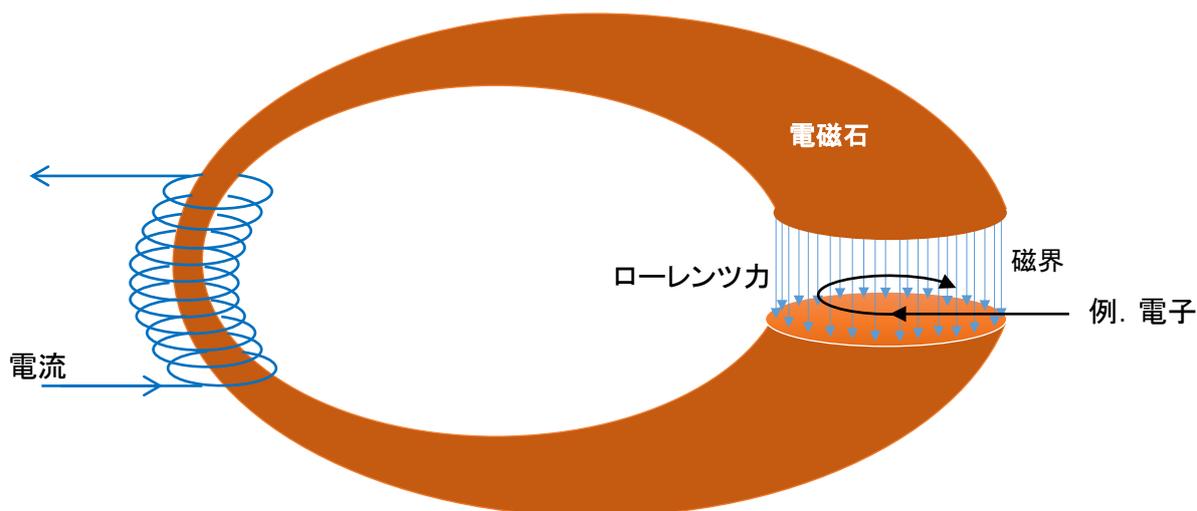
具体的には、静止質量になるが、

陽子の質量は  $1.673 \times 10^{-27} \text{ g}$  (約 1 GeV)

電子の質量は  $9.109 \times 10^{-31} \text{ g}$  (約 0.5 MeV)

であり、陽子の質量は電子の質量の約 1800 倍であり、ニュートリノの軽さの程度がわかるであろう。でも、質量はあるのだ。

どうして陽子と電子はこんなに細かく測れたのかという疑問があろう。それは、上下に真っすぐな磁界があつて、そこを真横から通すと陽子も電子もきれいな円形を描いて曲がる。これをローレンツ力といい、曲がり方で質量が確実に計算できるのである。ただし、これは荷電粒子の場合であつて、中性子やニュートリノのような中性粒子は、磁場や電場の影響を受けないから、あらかじめ質量が解っている他の粒子と衝突させて弾き飛ばされた粒子の運動量やガンマ線、チェレンコフ光などの光子の強度から推定すると言われている。すなわち間接実験結果ともいえる。



### ローレンツ力

荷電粒子の磁界内での運動 (荷電粒子が磁界に垂直に入射した場合の運動)

電気量  $q$ [C], 質量  $m$ [kg] の荷電粒子が磁束密度  $B$ [Wb/m<sup>2</sup>] をの磁界に垂直に  $v$ [m/s] の速度で進むとき、荷電粒子が磁界から受ける力は常に速度と垂直な方向に  $qvB$ [N] の大きさで力を受ける。これを円運動とすると次のようになる。

$$m \frac{v^2}{r} = qvB$$

力の向きはフレミング左手の法則より求められる。



<<http://www14.plala.or.jp/phys/hs-phys/35.html>>

### 人間模様

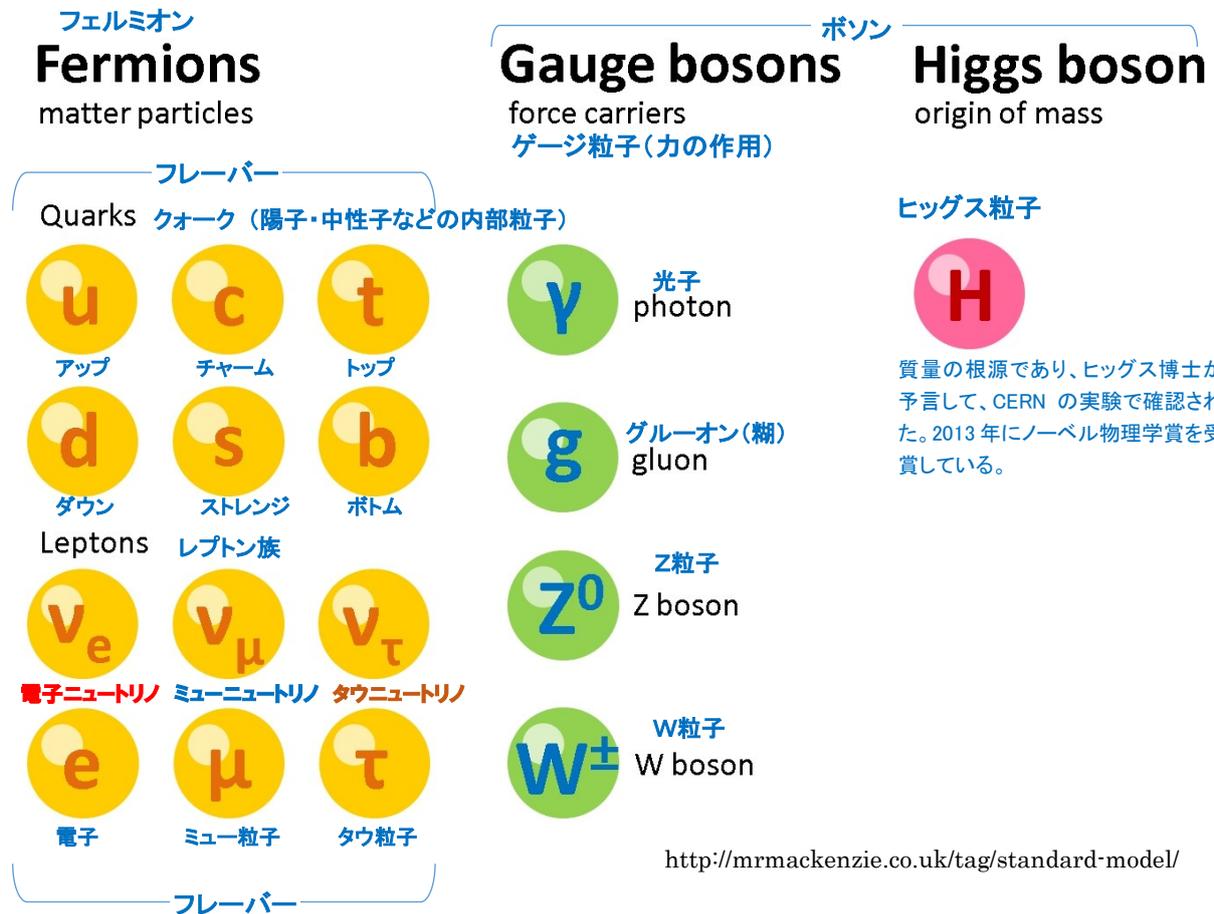
これらの驚くべき研究成果は、小柴親分の大政・小政ともいうべき戸塚洋二教授と梶田隆章教授のコンビにより達成されたことはあらためて述べておきたい。戸塚教授は2008年に惜しくも66歳の夭さで他界された。ノーベル賞受賞確実と皆が信じていた。結果として、梶田教授受賞となってしまったが、運命というのは余りにも酷すぎる。NHK特集で彼の最後をみたとき、さすがに背筋が寒くなった。彼は、癌の末期で意識を失うまでノートに書き込んでいたそうだ。それは、己が感じる痛みと内服薬効果の推移、それから五体・五感の減退を克明に付けたのだ。つまりデータを自ら取ったのである。なんと、奥様への遺言によれば、その記録を病院に渡してくれと。同じ病気の人達への内科的あるいは精神的な療法の助けになればとの思いだったのだ。最後まで己れの実験物理学者としての天職と、癌という天命に殉じたのである。男としての凄みを感じるのは私だけではないだろう。

梶田教授は、ノーベル賞受賞の直後の2016年2月に兄弟子戸塚教授の著書「地底から宇宙をさぐる」（岩波書店）を増補・改版した、あたかも兄弟子に報告するように。

いま私はそれを読み耽っている。

## ニュートリノはたくさん種類があるの？

素粒子物理学においては標準理論があり、それにてニュートリノは3種あることになっている。あのノーベル賞（2008年）を受賞した益川・小林理論（1973年）が、「CP対称性の破れ」も含めて最終的にとりまとめて予言したものである。その最新版は次のとおり。



1960年代からあちこちの宇宙線観測、加速器での衝突実験により百種類以上の粒子が発見されて、それをまとめる必要性が叫ばれていたが、上図のような標準理論（モデル）が提唱されてひとまず落ち着いた。

しかしながら、1998年のニュートリノ3種が相互に変化（振動）することがSK実験で証明されたことから、さっそく綻び始めて理論物理学者たちを再び活気づけている。併せて、まだ見ぬ“クォーク”も半分以上、人工的な都合理論でもあり、陽子の中にあるならどうして陽子崩壊で外に出ないのか。米国の高エネルギー加速器による衝突実験でさえ、お手玉の中の“小豆”のようにしかクォークは観測されていないのだから。私には解らない。ただ、言えることは、陽子は宇宙開闢以来、壊れていないことが、秦の始皇帝が求めた永遠の生命をもつ粒子であることが明確になったことである。小柴先生の挑戦が少しかだけ判ったような気がする。つまり、物理学とは「この広い宇宙の摂理」を解明する学問であると。

## パルサー発見

イギリスのケンブリッジ大学の博士 (Ph.D.) 課程の学生がいた。名はジョスリン・ベル (1943 年-) という。1967 年、彼女は博士論文とすべき研究課題に取り組んでいた。それは、電波天文学という分野における新たな電波発信天体の探査観測である。

最初の仕事は実験や観測でなく受信アンテナの建設工事である。ブドウ畑のような、テニス・コート 57 面分 (約 80,000m<sup>2</sup>) の野原にダイポール・アンテナを張り巡らす重労働であったという。ダイポールとは、昔の TV アンテナの中心にある芯アンテナであり、長さは受信する周波数：81.5MHz の半波長、すなわち 1.8m もある。

この周波数は、今の日本では J-WAVE という FM 放送局が使っているから、たぶん、イギリスではラジオ局に割り当てられていない帯域であったのであろう。指定に従って杭を打ち込み、これを 2 千本も建てたそうだ。そして、200 km もケーブルを接続したという。

観測作業は、アンソニー・ヒューイッシュ教授の監督を受けてこれらのアンテナ望遠鏡の運用とデータ分析を行うことであった。データとは、今のコンピュータに記録されたものではなく、30 m ほどのペン・レコーダー記録紙の目視点検である。2 ヶ月ほど過ぎた頃、うなじの毛みみたいな周期的パルス信号が見つかった。赤経 19 時 19 分の方角である。夜間だけ起きている。ペン・レコーダーの速度を上げて詳細に観測したら、1.337 秒間隔で起きていたので、指導教官のヒューイッシュ教授に報告した。最初は、人工的なものと無視されたのであるが、次の日、教授が来た時にその周期的パルスが現れて、彼は目を見張った。なお、ペン・レコーダー出力のほかにスピーカーから音も出るようになっていた。

彼は、レーダー電波の月からの反射波か、人工衛星からの信号かもしれないと言った。研究仲間は、信号の分散を調べて、これは太陽系外で銀河系の中から来ているとした。しかも、正確な周期性から、これは太陽系外の知的生命体 ETi “リトル・グリーン・メン：LGM” から来ているのではないかと、たわむれた。

それから 1967 年のクリスマスが終わって、新年を迎えた 1 月末に科学論文で世界的に有名な“ネイチャー誌”に「パルサー発見」の記事が投稿されてしまった。たった 3 時間の観測結果だけなのに、しばらくしまっていたのに。彼女は、もう観測を後輩に渡して自分の論文作成への没頭に切り替えた。ヒューイッシュ教授は、パルサー発見の論文発表の直前に大学でセミナーを開いて発見の観測結果について講演した。出席したケンブリッジのほとんどの天文学



<http://ircamera.as.arizona.edu/Astr2016/images/extltlgrnmn.htm>



<http://ircamera.as.arizona.edu/Astr2016/images/extltlgrnmn.htm>

者たちから、彼らの興味と興奮が彼女に寄せられ、彼女はその革新的な成果への感謝を抱いた。あのガモフのビッグバン膨張論に対向して定常宇宙論を唱えたフレッド・ホイル教授から、「これは初めて聞くし、ほとんどアイディアはないが、白色矮星よりもむしろ超新星のレムナント（残骸）に違いない」という意見が出された。

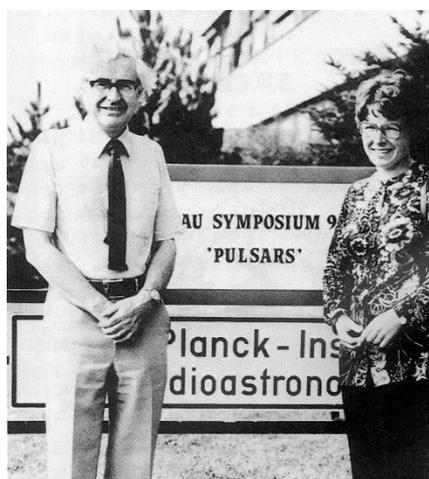
ネイチャー誌に、一旦は他の太陽系外文明（ETi：Extra Terrestrial intelligence）からの信号と述べたが、それとともに新聞の方が鳴りやんだ。観測チームに女性がいたことも静かになった。彼女はアンテナ群のある野原の土手に上ったり降りたり座ったりして、「君が発見したんだ！」と湧いてくる興奮に浸った。そして、博士課程論文を仕上げ、他の土地に移って結婚した。

その後、1974年にヒューイッシュ教授が「パルサー：PSR B1919+21 発見」でノーベル物理学賞を受賞したとき、彼女はいろいろな人々から共同受賞の権利を主張するべきと言われた。しかし、彼女は、第一に指導教官と学生間の論争は解決しないこと、第二に研究プロジェクトが成功しても失敗しても責任はすべて指導教官に負わされること、などから特にクレームはしなかった。実際は、パルサー論文には彼女の名も連なっていたから、審査したノーベル賞選考団体こそ責められるべきだった。翻って、第三の事由は、仮にノーベル賞選考団体が特別な例外的ケースを除いて参画した学生たちを賞したらその格式を落すことになるし、「パルサー発見」がその稀な例外の一つになるとは思わなかったと、彼女は断言している。まさに極めつけの正論である。これはかえって彼女の信念の大きさを天文学界で永遠に確立してしまったと言ってもよい。すなわち生きながらのレジェンド（伝説）である。

彼女が電波天文学から去ったときには、にわかに、パルサー天体の観測にまつわるX線天文学からガンマ線天文学が流行り出した。彼女は、結局、

MSSL (Mullard Space Science Laboratory of the University College London) に籍を置いて、X線天文学の研究に身を投じた。

ヒューイッシュ教授とジョスリン・ベル

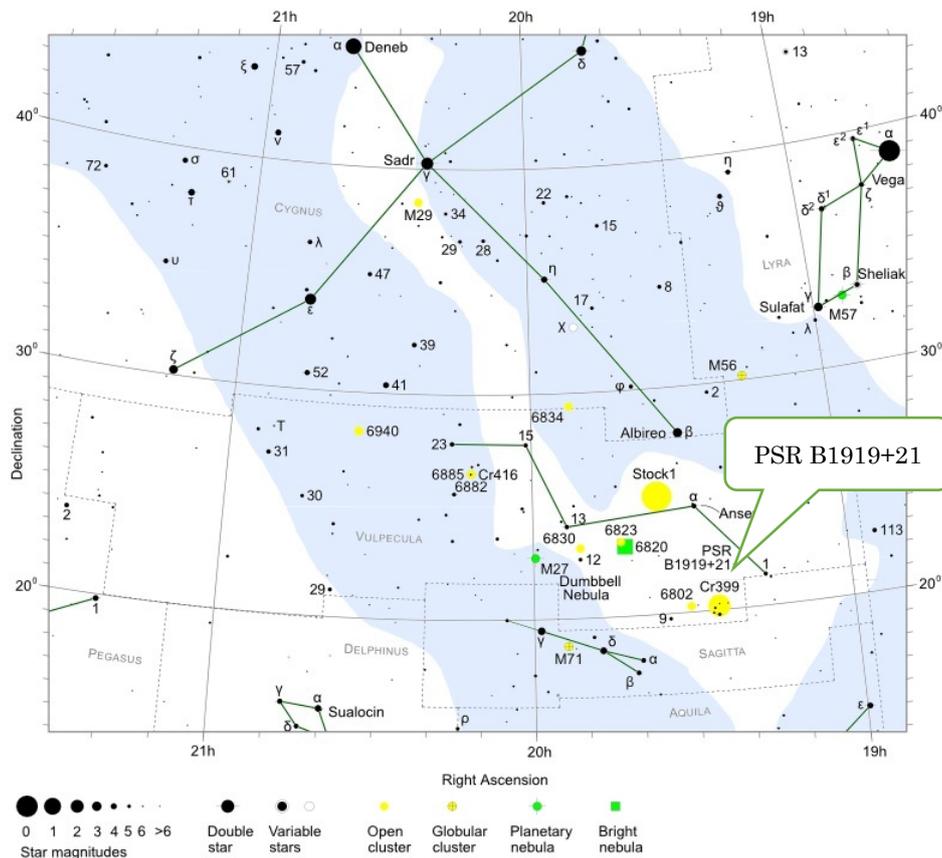


<http://www.st.sophia.ac.jp/scitech/prmags/no10/no10toku03.html>

.....参考 <http://ircamera.as.arizona.edu/Astr2016/images/exttlgrnmn.htm>

## 中性子星 : PSR B1919+21

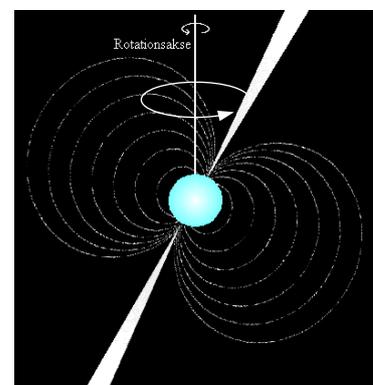
ジョスリン・ベルが1967年に発見したパルサーは、その後、中性子星であることが判明した。その名は、PSR B1919+21 と名付けられた。それは、白鳥座のそばの“こぎつね座”にある。太陽からの距離は、2283光年と計測された。正確な位置は、下図に示すように赤経19時19分で赤緯+21度である。



<https://freestarcharts.com/constellations/14-guides/constellation/16-vulpecula-constellation-guide>

そもそも、パルサーは中性子星が回転して強い磁界に自らを包み、その磁極自体が地球の歳差運動のように回転しているから、磁極から発せられる強烈かつ鋭い電波ピームがたなびいて地球に向いたときに電波パルスとして観測されるのである。その歳差運動が地球のように悠々と26,000年で一周するのではなく、そそくさと1.337秒で回転しているので、パルスの周期がそれと同じになっている。

中性子星とは、中性子の塊でII型超新星爆発後にできると言われている。中性子だけになった超新星の残骸部中心に取り残されたもので、直径10kmしかないのに重さが太陽ほどあって、密度は角砂糖1個分(1cm<sup>3</sup>)で10億トンもあるから、その角砂糖を地球上に置いた瞬間に穴があいてマンタルを抜けてコアに落ち込んでしまう。



<http://www.rundetaarn.dk/observatoriet/stjerne/pulsarer/>

## 超新星の種類

先に超新星1987Aについて、その爆発による多量のニュートリノ放出をカミオカンデが検出したことを述べた。これにより15年後の2002年にやっとノーベル物理学賞が小柴昌俊教授（当時）に授与された。それからほどなく、弟子の梶田隆章教授が「ニュートリノ振動」の解明で重さゼロと思われていたニュートリノがわずかな質量を持つことが解った。この広い宇宙の探索が本題なのに、なぜか素粒子の世界に分け入ってしまったが、実は広大な宇宙を知るには微細な原子の世界にも立ち入らざるを得ないのである。

次に、超新星のレムナント（残骸）に取り残されたパルサーすなわち中性子星がどのように発見されたのか、について述べた。原子核の中にじっとしている中性子は、通常、おとなしいが、核分裂というカオス（破局）で放射能の中心的粒子として暴れ出てくる。その中性子の塊がどのようにして超新星の中で作られていくのかは、私の中では宿題になっている。

いずれも20世紀の大発見である。それらの過程には、初期の実験観測目標とは余り関係ない事象が成果になっているという共通点がある。世にも不思議な現象である。しかしながら、発見とはそういうものである。つまり、コロンブスもインド上陸を目標に西への大航海に出航したが、結果、アメリカ大陸を発見したのだ。だから、その原住民はインディアンとか、インディオとか呼ばれるようになった。また、キューバやジャマイカなどを西インド諸島と呼ぶのも変だが、コロンブスの勘違いでそうってしまった。言葉は間違いでも歴史が刻まれる。

なにごととも想定どおりなら「発見」とは言わないのではないか。未知に遭遇するから人が感動するのではないか。

さて、パルサーすなわち中性子星は、超巨星の最後になる超新星爆発において、コアに固まった中性子の塊が残されて出来るという爆発理論がある。

超新星には次のような種類があると、いろいろな超新星天体の観測結果から解ってきた。

<b>I 型</b>	水素無し	シリコンあり		<b>I a 型</b>	白色矮星の爆発
		シリコン無し	ヘリウムあり	<b>I b 型</b>	
			ヘリウム無し	<b>I c 型</b>	
<b>II 型</b>	水素あり	H吸収線が狭い		<b>II n 型</b>	超巨星の爆発
			光度減少が早い	<b>II p 型</b>	SN1987A
			光度減少が緩やか	<b>II l 型</b>	かに星雲
		H吸収線が弱い		<b>II b 型</b>	

## 白色矮星

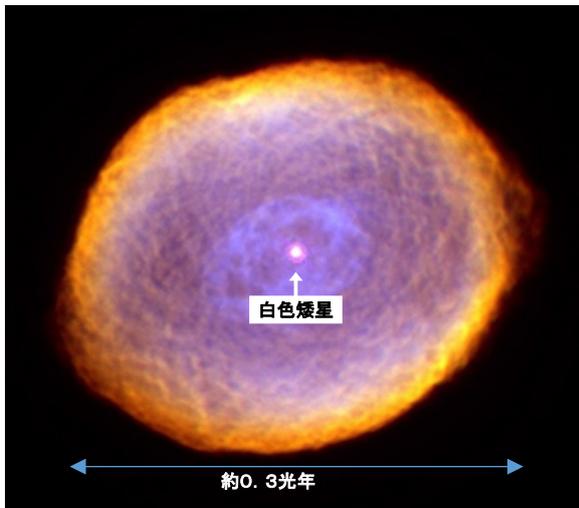
第2回で述べたように、太陽クラスの恒星は、水素の核融合により膨大なエネルギーを放出し、惑星を温めるということが、私たちの感覚的知識である。ところが、これは外観的な観測であって、実際は、溜まり溜まった水素ガスやヘリウムガスは、自らの重力でつぶされるのである。この猛烈な重力収縮が進むと温度が上昇して、コアの温度が1千万度を超える。すると、水素の核融合に適した環境が出来、核エネルギーを生み出して輝き始めて周りの惑星らを照らすのである。

恒星内部では、内向きの重力と外向きの核融合膨張圧力がバランスがとれて安定した核融合エンジンが始動する。これをP P (Proton-Proton)連鎖反応と呼ぶが、100億年も続く。さすがに、その末期ではヘリウム核融合も始まり、CNOサイクルという状態に突入して熱を上げて膨張し、表面のガスを押し出す。次第に燃やすものが少なくなると、重力に負けて収縮するが、温度が上がり、またCNOサイクルが始まり膨張する。これが繰り返されるので、はるか遠くからみると「変光星」として観測される。これらが推移してコアが炭素と酸素の電子縮退という形態に落ち着き、押しも引いてもびくともしなくなる。

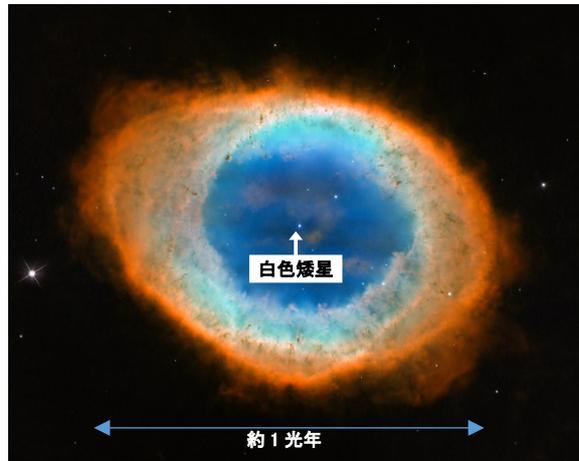
最後は、表層のガスを宇宙空間にぜんぶ吐き出して、縮退圧に支えられた炭素と酸素のコアが残り、ガチンガチンの硬さで鋼鉄やダイヤモンドよりも硬い**白色矮星**として取り残される。それは地球サイズほどの大きさであるが、太陽質量に近い重さがあるので、角砂糖一つぐらいに切り取ると10トン以上もあるという。10万度ほどの高温のため白く輝く。

周りにまき散らしたガスは何層にもわたり、美しい**惑星状星雲**として観測できる。中心星から放射される紫外線によって電離され、以前は星の外層だった水素やヘリウム、また酸素や窒素などが元素特有の波長で光を放っている。「惑星状星雲」(Planetary Nebula)という名は、天王星を発見したハーシェルが、ぼやけた惑星みたいに見えたことからそう呼んだことに由来しているという。

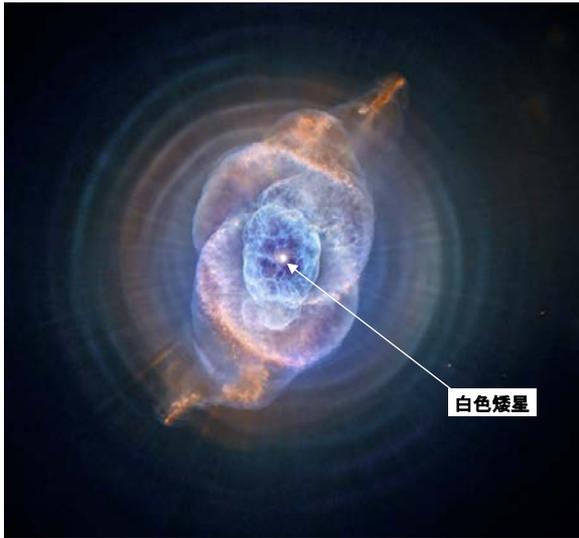
この世のものとは思えないハッブル宇宙望遠鏡：HSTの画像のいくつかを観覧してみよう



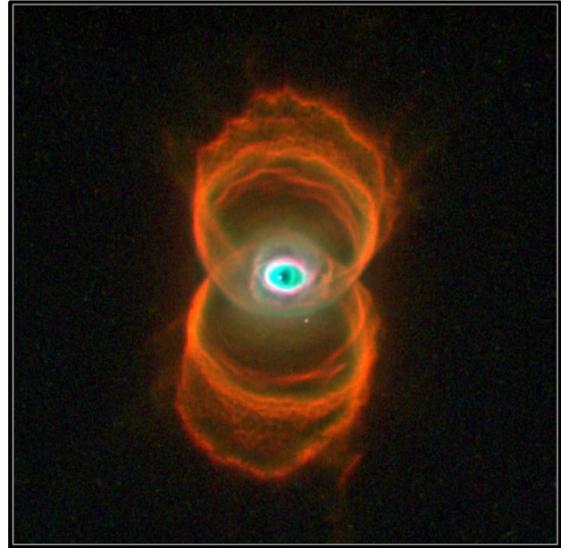
Spirograph Nebula(スピログラフ星雲)  
2,000 光年先 スピログラフ:呼吸運動記録器



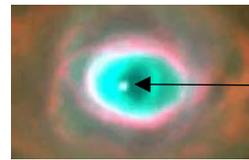
M57: The Ring Nebula(リング星雲)  
2,000 光年先  
太陽の最後(50 億年後)に近いイメージ



The Cat's Eye Nebula: 3,000 光年先  
(キャッツアイ星雲)



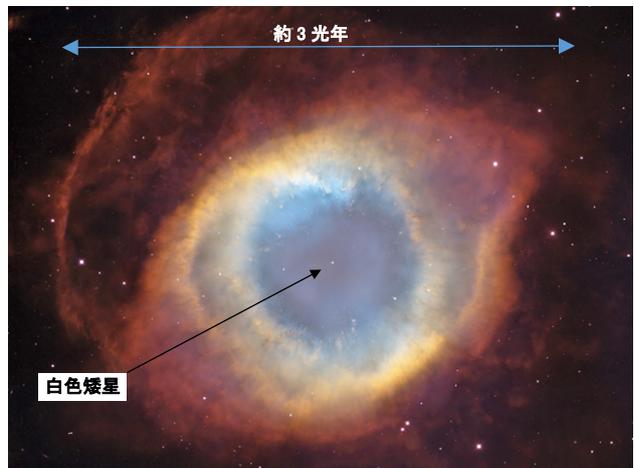
Hourglass Nebula(砂時計星雲): 8,000 光年先



中心部拡大図  
白色矮星



Butterfly Nebula(蝶々星雲); 4,000 光年先



Helix Nebula(ら旋星雲): 700 光年先  
太陽系に一番近い

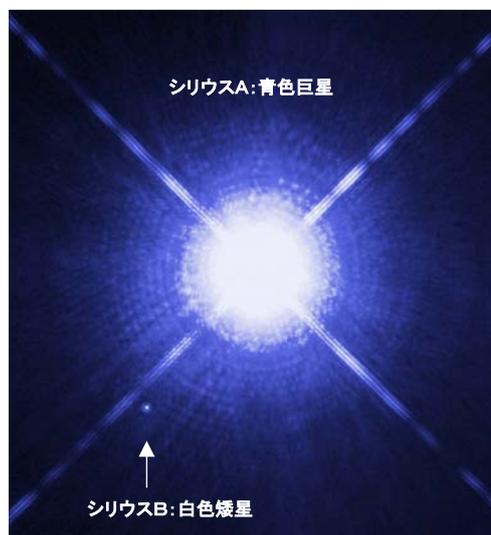
<https://nasasearch.nasa.gov/search/images?affiliate=nasa&commit=Search&cr=true&page=2&query=HST+planetary+nebula&utf8=%E2%9C%93>

## I a 型超新星

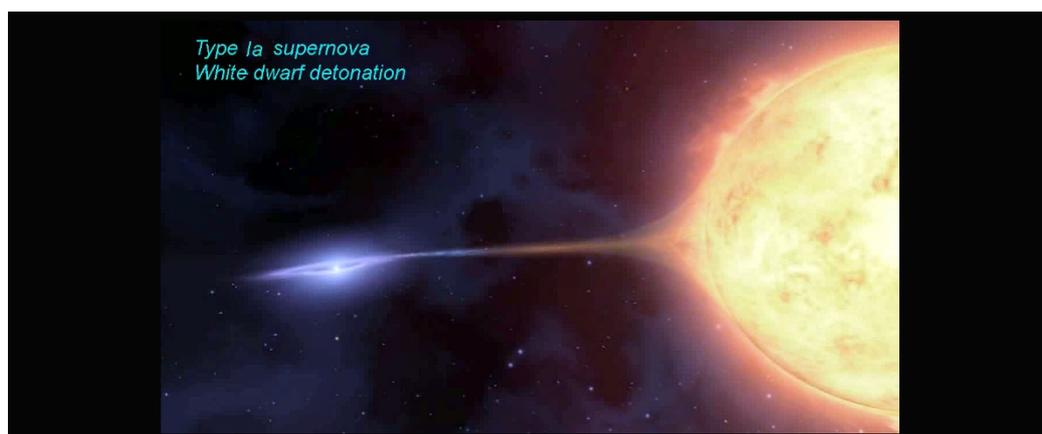
I a 型超新星は、連星系における白色矮星の最後である。チャンドラセカールの限界質量に達するまで連星相手の恒星からガスを吸い込んで爆発して最後を飾る。太陽質量の 1.44 倍がその限界=爆発である。もともと白色矮星は、太陽級の恒星の終末期に膨張を繰り返して表面のガスを宇宙空間にまき散らした後に残される。このため、膨大な水素ガスやヘリウムガスなどが無くなり、核融合反応の産物である酸素や炭素が固まった硬いコアが白色矮星になる。単独であれば、自然に宇宙を漂いながら冷えていって黒色矮星になり消えていくという。

ところが、連星系の片割れが白色矮星になると、相手の恒星からガスを吸い込んで膨れ上がる。この連星系は、この広い宇宙では意外に多い。例えば、第2回で述べたように、太陽系近傍でも第2回に掲げたシリウスA&Bや $\alpha$ ケンタウリなど、列举に暇がかからない。

白色矮星が連れ合いの主星からガスを吸い込む様子について、NASAによる想像図は次のとおり。このような現場は、いまだ私たちの天の川銀河では捉えられていない。おそらく、太陽系から観えない反対側の天の川では起きているかもしれないが、中心部のバルジ（胴体）の巨大な星間雲に隠されているからともいえる。



太陽から 8.6 光年先



<http://www.universetoday.com/103172/this-supernova-had-a-delayed-detonation-nasa-says/>

In a Type Ia supernova, a white dwarf (left) draws matter from a companion star until its mass hits a limit which leads to collapse and then explosion. Credit: NASA

このガスの吸収が進んで白色矮星の質量がチャンドラセカール限界に達すると、次の図のように爆轟 (detonation) する。爆轟とは強烈すぎる爆発の表現で、米国産でもあるが、その爆轟に至るシナリオはまだ理論的にも解明されていない。

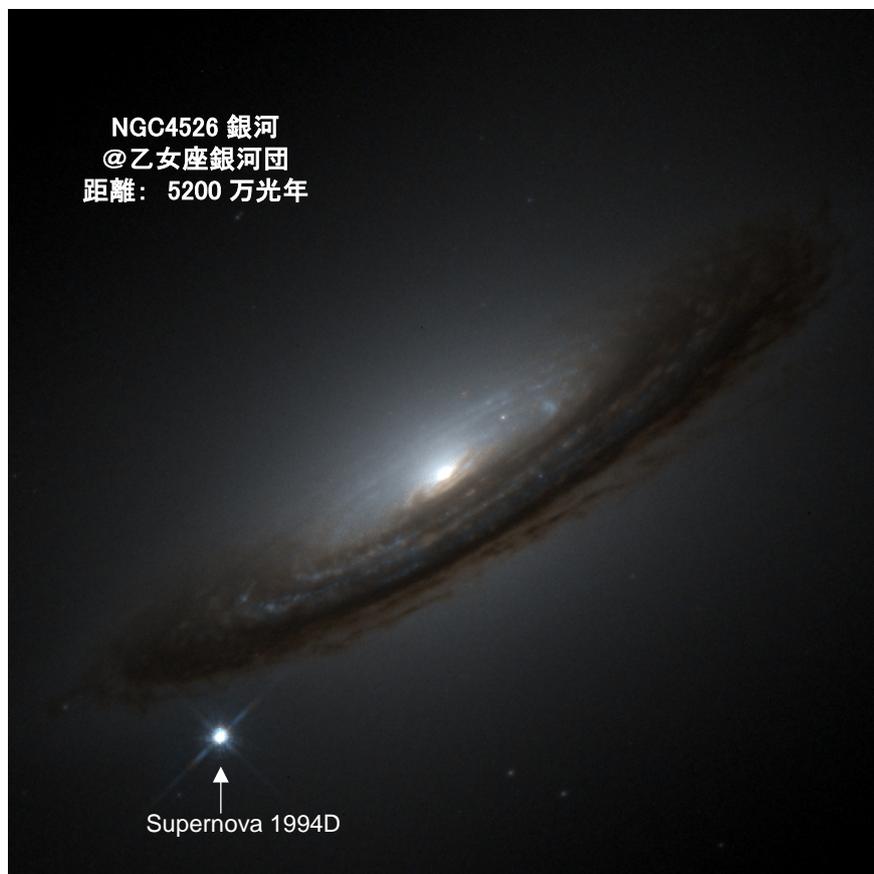


A supernova is a large explosion that takes place at the end of a star's life cycle. **Credits: NASA**  
<https://www.nasa.gov/audience/forstudents/5-8/features/nasa-knows/what-is-a-supernova.html>

しかしながら、何億光年も遠くの銀河では発生しており、すでに数百個が観測されている。その中でも次に掲げるものは、当該銀河の明るさと比べて遜色ない。たった一つのI a型は、なんと太陽の30億倍ほど明るく輝く。II型よりもはるかに明るい。一つの銀河における恒星数が1千億程度だから、銀河に匹敵すると言っても差し支えない。

以下に、具体的なI a型の具体的画像を紹介する。

**SN 1994D** <<https://apod.nasa.gov/apod/ap000312.html>>



[説明] そのむかし(5,200 万年前)、遠くで星が爆発した。それは超新星1994Dと言い、円盤銀河NGC4526の外側スカートで発生し、画像の左下に明るく光るスポットとして見える。SN1994Dは、その異常さでなく、むしろ他の超新星にいかかに似ているかである。実際、爆発後の数週間に放たれた光はI a 型超新星のなじみの特徴を備えている。すべてのI a 型が同じ本質的な明るさを持っているなら、その検光センサーはかなり遠くの超新星でも捉えるにちがいない。精密な光度・距離関係を調整計算することによって、天文学者たちは膨張宇宙の速度(パラメータ;ハッブル定数( $H_0$ ))を見積もれるだけでなく、宇宙地図(オメガ: $\Omega$ やラムダ: $\Lambda$ のパラメーター)における私たちの場所も分かる。この数年間に測定された超新星までのだいたいかつ大まかな距離は、かつて予想されていた宇宙を示すようになった。 <<https://apod.nasa.gov/apod/ap000312.html>>

**SN 2011fe／風車銀河(2,100 万光年先)** <<http://newscenter.lbl.gov/2011/12/14/sn-2011fe/>>



2011 年 8 月 24 日にパロマ天文台の PTF 望遠鏡は、北斗七星(おおぐま座)の近くにある風車銀河の中に SN2011fe を捉まえた。2,100 万光年先での爆発の数時間後に見つけ、最も近くて若い I a 型に惹きつけられた。

## SN 2009dc (2億9千万光年先)

<[http://th.nao.ac.jp/MEMBER/tanaka/press\\_Ia.html](http://th.nao.ac.jp/MEMBER/tanaka/press_Ia.html)>

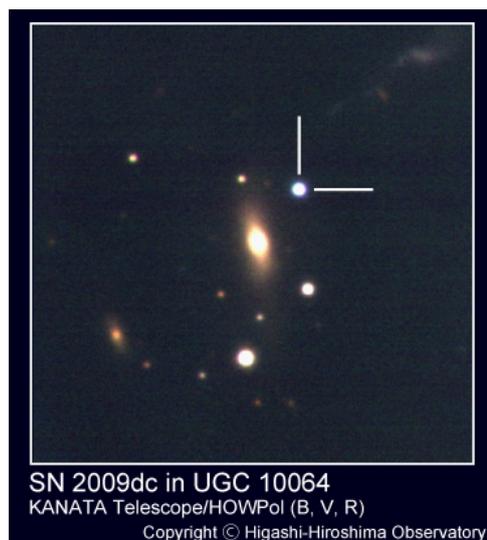
東広島天文台“かなた望遠鏡”で撮影された 史上最高の明るい Ia 型超新星 SN 2009dc の画像。

東京大学・広島大学などの研究チームはこの超新星が太陽の 約 80 億倍の明るさを放つ、史上最も明るい Ia 型超新星であることを発見した。これまで平均的光度は太陽の 30 億倍とされてきた。

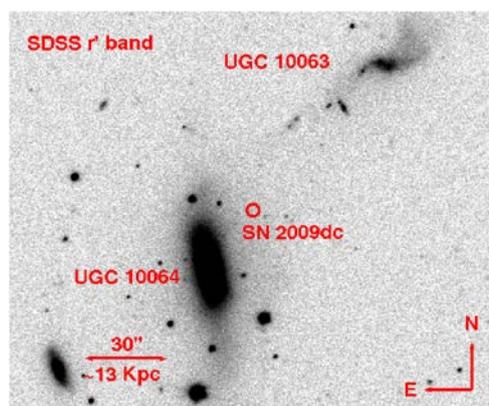
爆発を引き起こした白色矮星は、確かにチャンドラセカールの限界質量：太陽の 1.44 倍を超えていた。理論上、白色矮星が高速で回転している場合にあり得ることとされているが。

これまで、Ia 型超新星は一定の質量をもち、ほぼ一定の明るさをもつことから、標準灯超新星\*として重宝されてきた。セファイド同様にそれ以上に遠方宇宙までの距離測定に寄与して宇宙の膨張史を辿る研究に用いられてきた。今回発見された「限界」を越えた Ia 型超新星の存在は、そのような研究の基礎に関わる問題であり、今後の研究に大きなインパクトを与えるだろうとされている。

[\*標準灯超新星とは、“Standard-Candle Supernovae”の筆者訳である。]



UGC 10064 (距離:89.3Mpc)にて発見  
東広島天文台提供



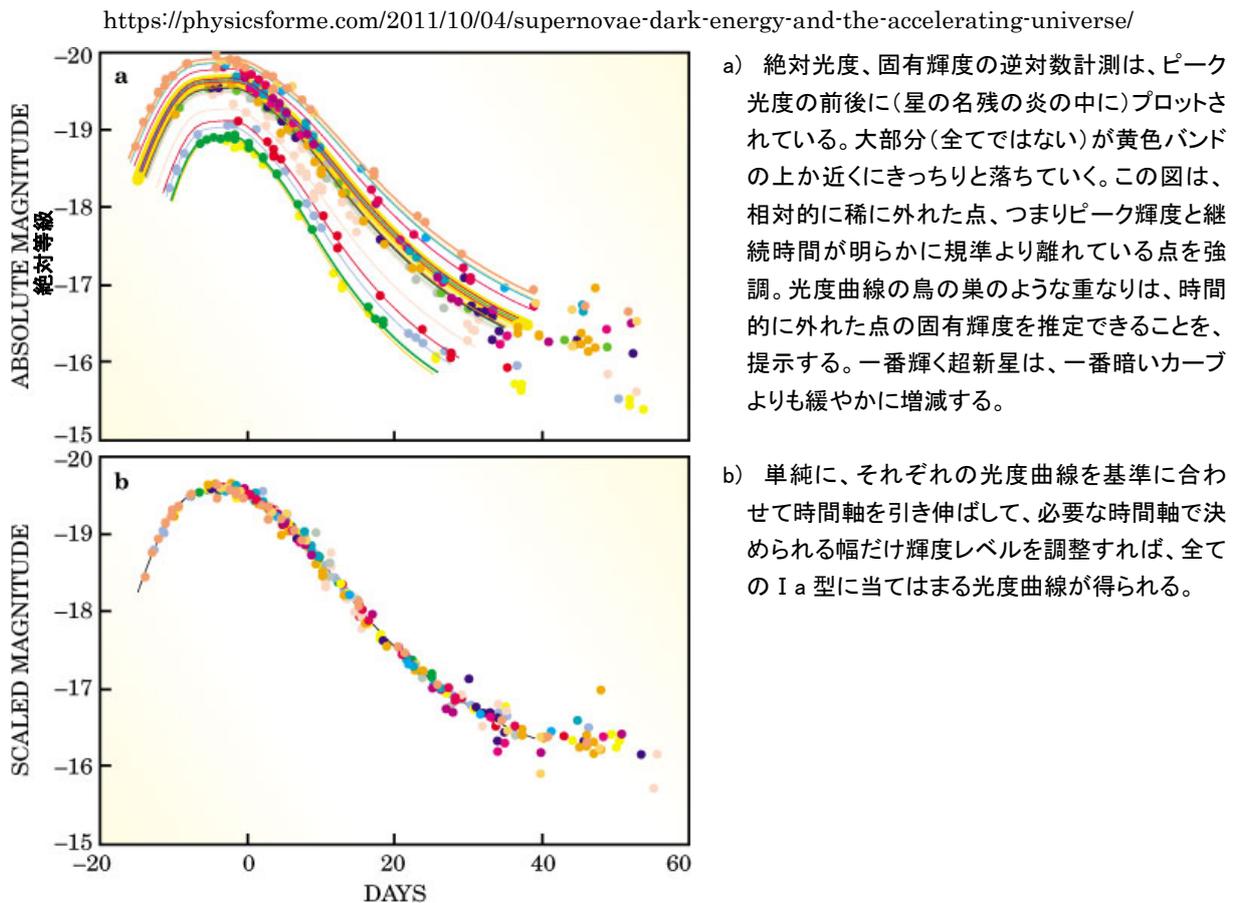
UGC 10064:

<https://asd.gsfc.nasa.gov/Rubab.Khan/SCSNe/>

## I a 型超新星の特徴

この超新星は、II型と違って何も残さず爆裂して何もかも吹き飛ばして宇宙に散る。華々しくも思い出を残さないで散っていく。この超新星は大きく二つの特徴を持つ。

その一つ目は、白色矮星が太陽の1.44倍の質量に達してから爆裂することである。このために明るさがどれでも同じ様になる。だから、どこで発生しても全く同じような明るさになる。しかも一か月ほどかけてピークの最高光度から静かに指数関数的に暗くなっていく。極めて美しい光度曲線である。



これにより **I a 型標準灯**としての光度曲線が判明したから、セファイドが見分けられないはるかに遠い銀河でも距離が推定できるようになった。これとその銀河のドップラー赤方偏移が解り、銀河の後退速度、すなわちハッブルが初めて提唱した宇宙の膨張度合いも詳しく推測できるのだ。これについては、次回の「銀河」で細目を説明することになる。

なお、光度については、ギリシャ時代からの等級がある。

厳密には次のとおり。地上から観測した見かけの等級を「実視等級」という。主な星々について実視等級を次に掲げる。「絶対等級」とは、恒星を太陽から10pc（32.6光年）離れたところに置いて観たときの等級とされている。

実視等級	倍数	具体的な星々	絶対等級の例
-20	約1億倍	太陽は-27	
-12		満月は-12.6	
-10	約1万倍		
-6			デネブ:-6.9
-5	約100倍		
-4		金星は最高-4.5ぐらい	アンタレス:-4.9
-2			
-1	2.5倍	シリウスは-1.5等星	
0	1	アンタレス:0.04等星	
1	1/2.5	デネブ:1.25等星	
2		アルデラミン:2.5等星	シリウス:1.4
4			太陽:4.38
5	約1/100		
6		こぐま座ラムダ星;6.5等星(現在の基準)	
8			
10	約1/1万		
20	約1/1億		

主な恒星の絶対等級

絶対等級	名称	星座	距離 (光年)	実視等級
-6.983	<b>リゲル(青色超巨星)</b>	オリオン座	862.43	0.13
-6.932	<b>デネブ</b>	はくちょう座	1411.26	1.25
-6.518	サドル	はくちょう座	1831.46	2.23
-5.624	カノープス	りゅうこつ座	309.00	-0.74
-5.499	<b>ベテルギウス(赤色超巨星)</b>	オリオン座	642.22	0.42
-0.568	マルカブ	ペガサス座	133.28	2.49
-0.510	カペラ	ぎょしゃ座	42.78	0.08
-5.059	<b>アンタレス</b>	さそり座	553.48	1.09
-4.225	ミンタカ	オリオン座	692.14	2.392
-4.222	エニフ	ペガサス座	689.22	2.404
-3.593	<b>ポラリス(北極星)</b>	こぐま座	432.36	2.02
-3.450	スピカ	おとめ座	249.62	0.97
-2.804	ベラトリックス	オリオン座	252.32	1.64
-1.090	ドゥーベ	おおぐま座	122.83	1.79
-0.692	<b>アルデバラン</b>	おうし座	66.61	0.86
-0.307	アルフェラッツ	アンドロメダ座	96.97	2.06
-0.082	アルゴル	ペルセウス座	89.88	2.12
0.604	<b>ベガ(織姫)</b>	こと座	25.03	0.03
0.615	カストル	ふたご座	50.84	1.58
1.064	ポルックス	ふたご座	33.77	1.14
1.146	カフ	カシオペア座	54.72	2.27
1.434	<b>シリウス(青色巨星)</b>	おおいぬ座	8.60	-1.46
1.574	アルデラミン	ケフェウス座	49.02	2.460
1.923	デネボラ	しし座	35.86	2.13
2.210	<b>アルタイル(彦星)</b>	わし座	16.72	0.76
2.611	プロキオン	こいぬ座	11.46	0.34
4.82	太陽		1.5 億km	-26.75

<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%98%8E%E3%82%8B%E3%81%84%E6%81%92%E6%98%9F%E3%81%AE%E4%B8%80%E8%A6%A7>

絶対等級で並べてみると、太陽はなんと 5 等星程度になってしまう。

見かけの等級＝実視等級：m より、絶対等級：Mは、次の表から求められる。

距離(pc)	1	10	100	1000	10000	100000	1000000
m-M	-5	0	5	10	15	20	25

<http://www.s-yamaga.jp/nanimono/uchu/kousei-2.htm>

pcという単位は前回述べたように、パーセク：parsec のことであり、1pcは3.26光年である。

逆に、恒星の絶対等級がわかれば、見かけの等級はその恒星の光度を測ればわかるので、上の表からその恒星までの距離を求めることができる。例えば、見かけの等級 (m) が18で恒星の絶対等級 (M) が3だと判れば、m-Mの値が15なので、上の表から、その恒星までの距離は10,000pc＝約3万2千光年であることがわかる。

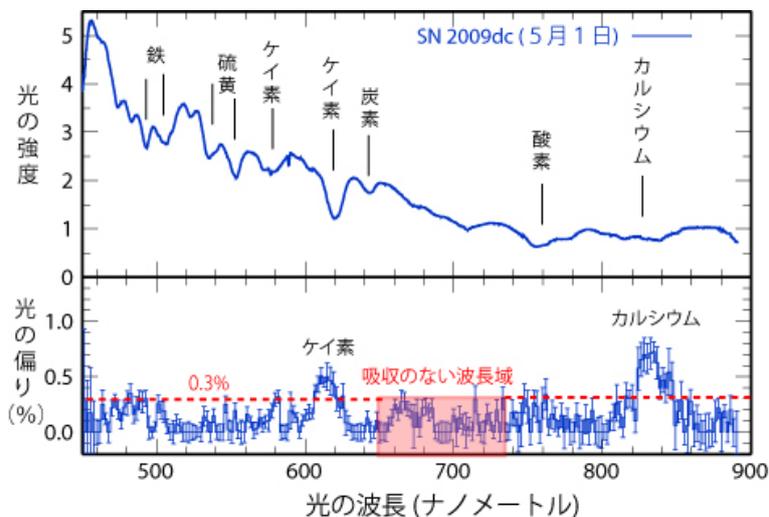
計算式は、次のとおりであるが、これ以上は専門家にまかせよう。

$$m - M = 5 \log(r / 10) \quad [r \text{ は恒星までの距離}]$$

実際的には、Ia型超新星の光度曲線に沿って絶対等級Mが判るようになったから実視等級mの光度曲線が測定されれば、距離が求められる。Ia型は極めて貴重な**標準灯**となったのである。ちなみに、超新星のピーク絶対等級が-20である場合、太陽の絶対等級が4.4だから、その超新星はおおむね太陽の40億倍以上の光度を持つことになる。雑な計算ではあるが、平均的に30億倍と言われていることが計算法も含めて肯ける。

二つ目の特徴は、Ia型の爆裂により宇宙に散らばるガスや塵の分析である。その中で水素の吸収線が無いことは先に言及したが、もともと赤色巨星が表層の水素とヘリウムのガスを全部吹き飛ばしたあとの残骸：白色矮星だから、あるはずがない。

すばる望遠鏡 FOCAS で観測したSN 2009dcのスペクトルを右に掲げる。



[http://th.nao.ac.jp/MEMBER/tanaka/detail\\_Ia.html](http://th.nao.ac.jp/MEMBER/tanaka/detail_Ia.html)

Ia型超新星の爆発に伴い、鉄、硫黄、ケイ素、炭素、酸素やカルシウムなどの元素が生産されて宇宙空間にバラまかれる。これらが分子雲の原材料となり、やがては重力の作用により固まって原始恒星系を成して、新たな星の誕生に貢献するのである。爆裂という世にも恐ろしい現象が、実は、私たちの太陽と惑星系を造ってきた元素を産み、100億年以上もかけて天の川銀河系も造成してきたのだ。宇宙創成期には水素とヘリウムしかなかったのに。

## II型超新星

SN 1987Aの観測でも解ったように、II型のスペクトル（色の分光波長帯）には、水素の吸収線があるということだから、表層に水素がある巨星の爆発になる。Ia型と違って単独の恒星の最後に起きる。私たちの太陽系の近隣にあるオリオン座のベテルギウスが赤色超巨星になってきており、第2回に述べたようにいつ爆発してもおかしくない。その意味はアラビア語で狩人オリオンの「腋の下」という。ただし、いま炸裂しても640年後に巨大な閃光が太陽系によせてきて判ることになる。あした来るなら、640年前の室町時代に爆裂したことになるが。

昼間でも太陽に匹敵するほど明るく見えるから、未開人には太陽が二つできたと思われるかもしれない。ただし、数時間前に超新星ニュートリノがスーパーカミオカンデで観測され、ニュースが世界を駆け巡って大騒ぎになるであろう。地球に大きな被害はないと言われているが、予測を超えて各種の放射線が降りそそぐ。

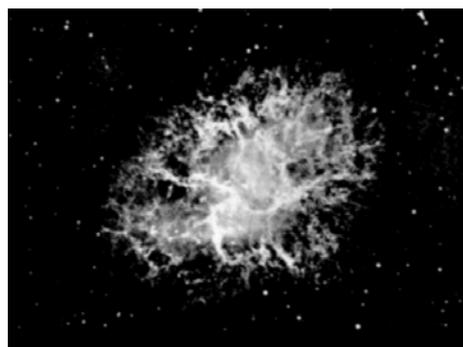
人類への危難を避けるためにも、超新星の観測と探求は必須なのである。出来れば、何年も前に兆候が判ればこの上ない。SN 1987Aの爆発前は青色超巨星だったという天文学者の報告もあり、ベテルギウスの今後の推移で同じように青色に変わるのかどうか、そうならば随分前に判るといふ素人の甘い考えも浮かぶ。

要するに、私たちは地震予知に神経を尖らせてきているが、それどころではない宇宙の激しさにも目を離してはいけない。私たちの太陽は穏やかな地球環境を育んできているけれども、そのエネルギーは、太陽コアにおけるP・P連鎖反応という核融合、あの忌まわしき水素爆弾が爆裂して生産されている。それがどうして外にキノコ雲が出てこないのか、それはコアの外側に膨大かつ重厚な水素ガスが取り巻いており、その巨大な重力で押し込められて熱だけが対流しながら飛び出してくるからである。その前に小さな太陽ニュートリノが先走るけれども。

すなわち、穏やかさにはその内に激しさがあることを知るべきであり、この広い宇宙のどこにでもある恒星が輝く所以であることも知らなければならない。天文学者や物理学者に任せとけばよい、ではなく、彼らを先導者としてついていく必要がある。これからの人類の文明の発展は、この広い宇宙をどのように開拓していくか、この一点に絞られよう。だから戦争などしている暇はないのだが、国々の間に経済格差や知識格差がある限り無理であろうか。

### かに星雲：M1

誰もがおどろく「かに星雲」がおうし座に見える。昔は、ぼやけて「蟹」のように見える星雲であってメシエのカタログでM1の名誉を博している。地球から6500光年先の天体であり、その大きさは10光年もあるというから、せいぜい半径1光年の太陽系がいくつも収まりそうである。

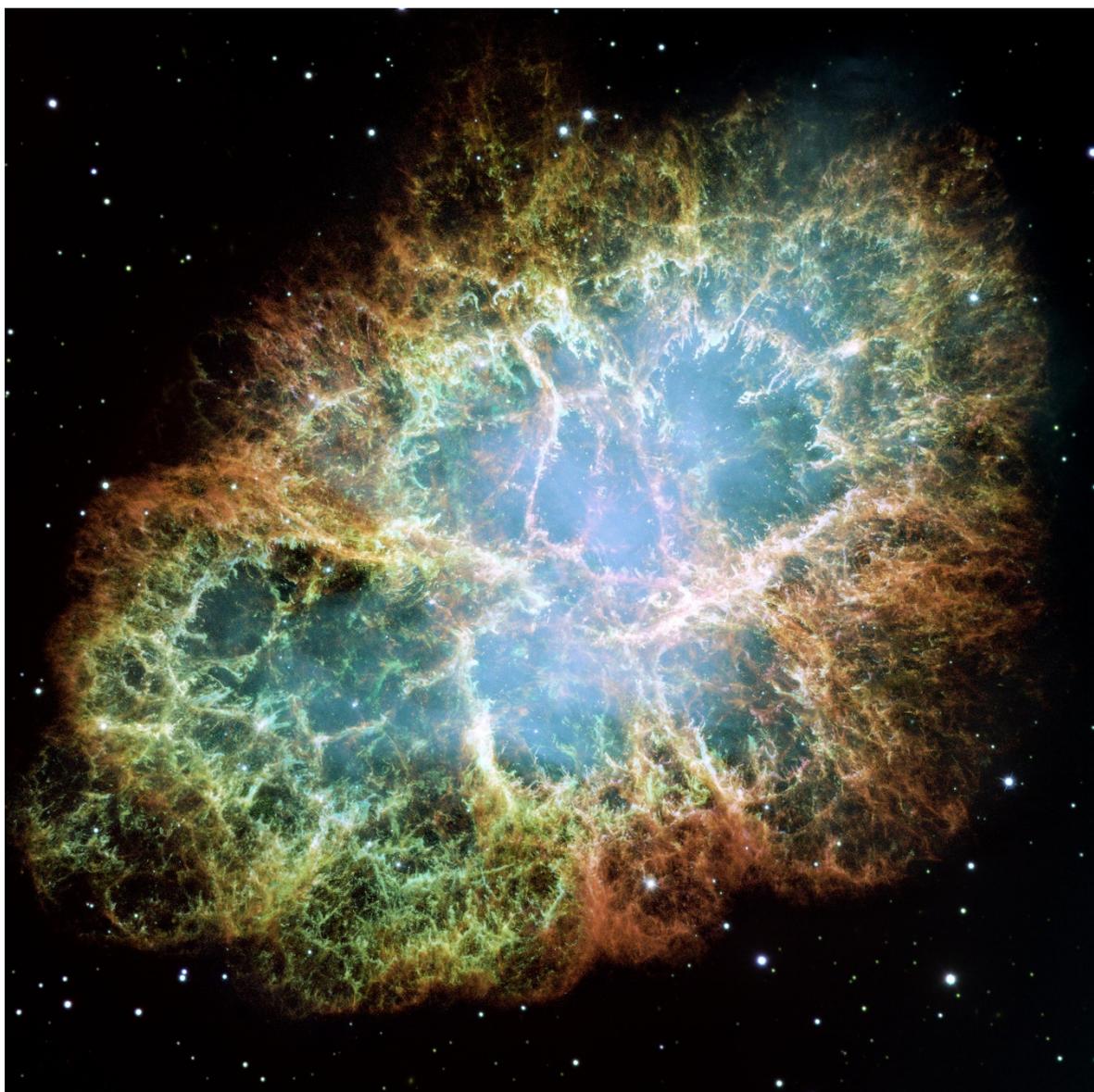


<https://eaae-astronomy.org/WG3-SS/WorkShops/CrabNebula.html>

右に掲げる画像は1942年に撮られたものであり、メシエが観測した19世紀当時の画質に近いものとなる。まさに蟹だ。

私たちが観ている画像は、昨今のハッブル宇宙望遠鏡：HSTで2010年にNASAが撮ったものであり、その克明さに驚いているのである。さらに、観測技術の長足の進歩にも驚嘆すべきでもあろう。その爆風は、秒速2千km以上で広がっているようだ。

[https://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image\\_feature\\_1604.html](https://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_feature_1604.html)

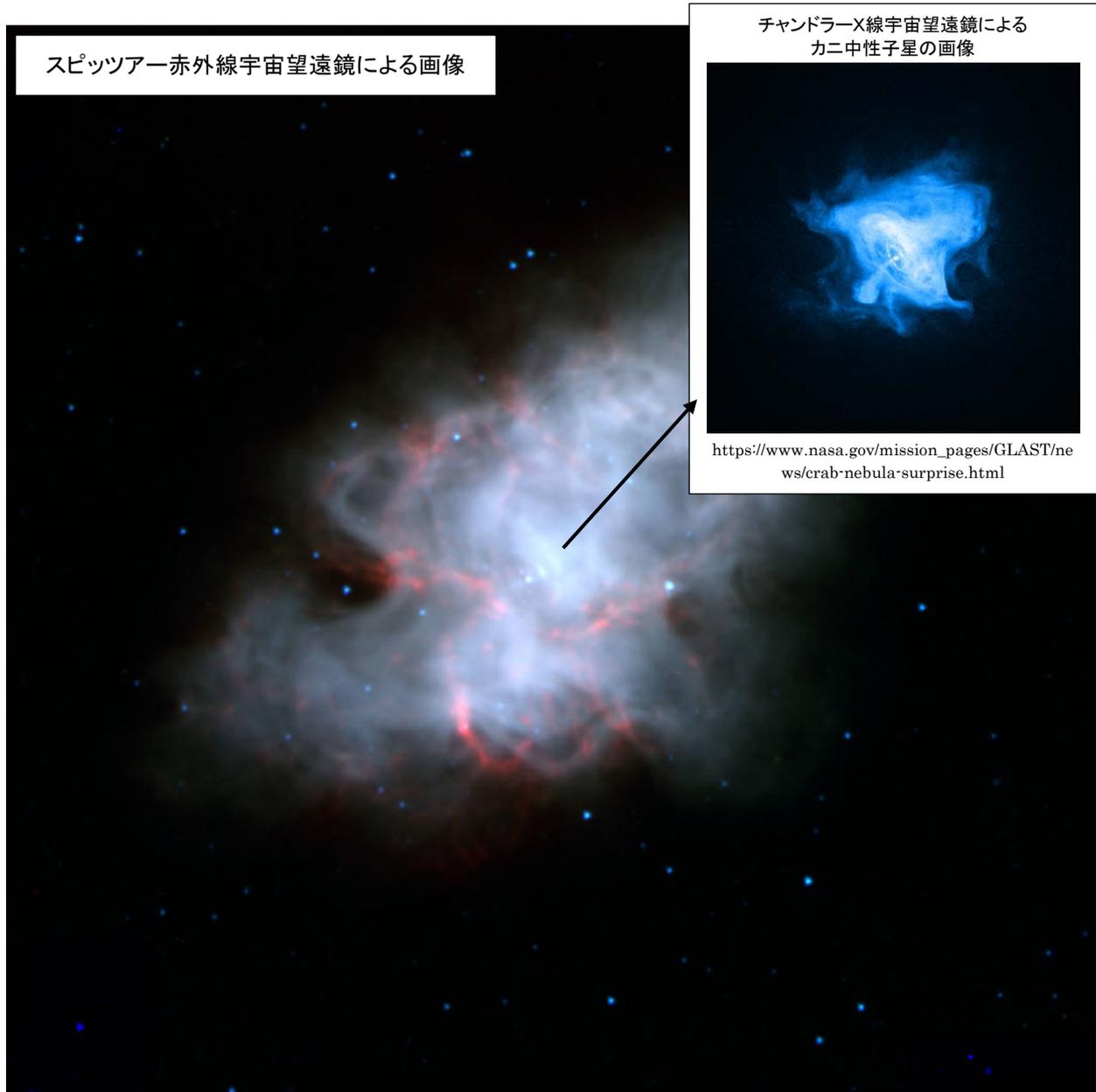


歴史的には、1054年に起きたことが藤原定家の「明月記」に記されており、夜空の位置もおうし座の方向と明記されている。中国の記録も含めて天文学者が後で調べたところ、おうし座に超新星爆発のレムナント（残骸）が見つかり、SN1054という名が付けられた。

さらに、その中心あたりにNASAのチャンドラーX線望遠鏡（衛星）が向けたところ、なんと1秒間に30回転しているパルサーの画像まで撮ることができた。

この画像から明確に「中性子星」が判明し、誰もがパルサーは中性子星そのものということまでわかった。あのジョスリン・ベルが発見したパルサー達が何とこの広い宇宙のアイドル・スターになってしまった。

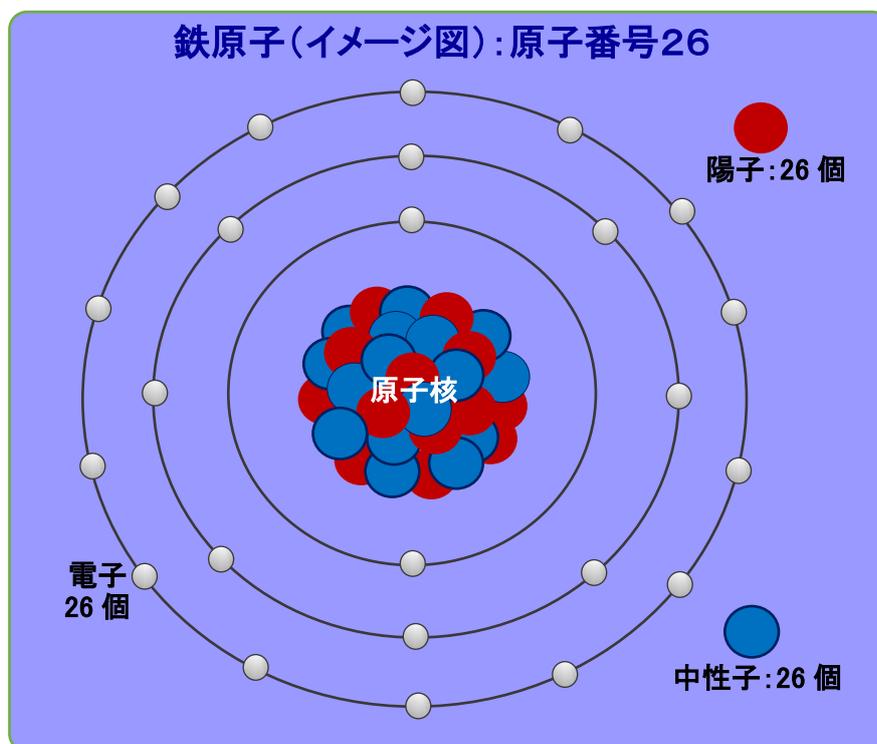
次の画像は、スピッツァー赤外線宇宙望遠鏡によるものであり、中心部に中性子星が回転しているのがわかる。可視光域では見えない模様が見られる価値は大きい。



[https://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image\\_feature\\_567.html](https://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_feature_567.html)

赤外線は、超新星が吹き飛ばすガスや塵に影響されないため、レムナントに隠されて見えない中心部の超新星の核がおぼろげながら見えてくる。そこにX線望遠鏡を当てると、取り残された中性子星が明瞭に写し出されたのである。H S Tも含めてすべて観測衛星によるが、それらの高度な観測技術の粋にはあらためて驚嘆を禁じ得ない。

星のコアにできる硬い鉄が強大な重力と熱でバラバラにされて、陽子に電子に分かれ最後に無理やりに結合されてできるすき間が無い中性子の塊となる。こうして出来る中性子星は、大きさ10 kmぐらいなのに強烈な重力場をもって周辺のガスや荷電粒子などを引き込んでいる。このカニ・パルサーは1秒間に30回転しているので、荷電粒子が引きずり回されてものすごい磁場を回転軸の周りに形成し、強いX線を発射して、それが観測できるのである。



## II型超新星の特徴

単独の赤色超巨星の最後に爆発するのがII型である。質量は太陽の8倍以上で30倍未満の恒星であるというが、30倍以上はいろいろな形態があり未解明のところが多い。最も有名なケースはブラックホールができるという説であろうか。ただし、いまだに観測されていない。

特徴は、その爆発のシナリオ、光度変化特性および元素発散という三つである。

### ① II型超新星の爆発

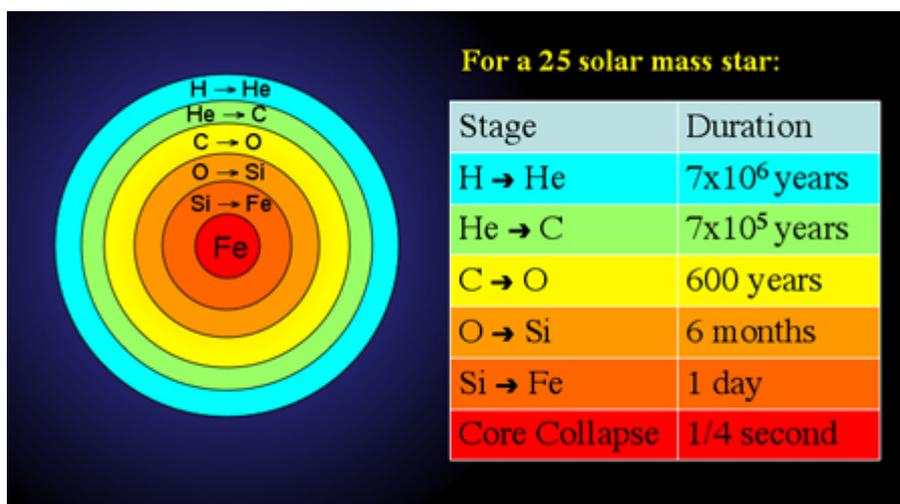
爆発は、核融合で燃やすものが尽きて起きるという考えがシンプルである。Ia型は、爆轟(Detonation)といい、何も残さないでことごとくを吹き飛ばす。これに対してII型は、コアの重力崩壊によるリバウンド爆発と言われ、中性子星を残す。Ia型の方が爆発の規模は大きい。

実は核融合には段階がある。恒星は、水素がコアで核融合燃焼するとヘリウムを合成してヘリウムが溜まる。溜まりすぎると重くなって数億度の高熱を発する。それからヘリウムが燃え出すと炭素や酸素ができて、Ia型同様にコア(芯)は炭素・酸素に変貌するがそれも重すぎて圧縮されて、また、数十億度の超高熱となりシリコンと鉄が合成される。これが固まるとび

くともしなくなるが、それでも重圧は収まらない。ついには、硬くて安定しているはずの鉄の原子核まで崩壊する。すると鉄の陽子と電子が暴れ回り、結果、中性子として結合する。こうなれば中性子同士がくっついて中性子コアが出来上がる。核力\*という強烈な力で結びつきコンパクトになって、どうにもこうにもならない。おそらく、宇宙における最硬度の物体ができる。

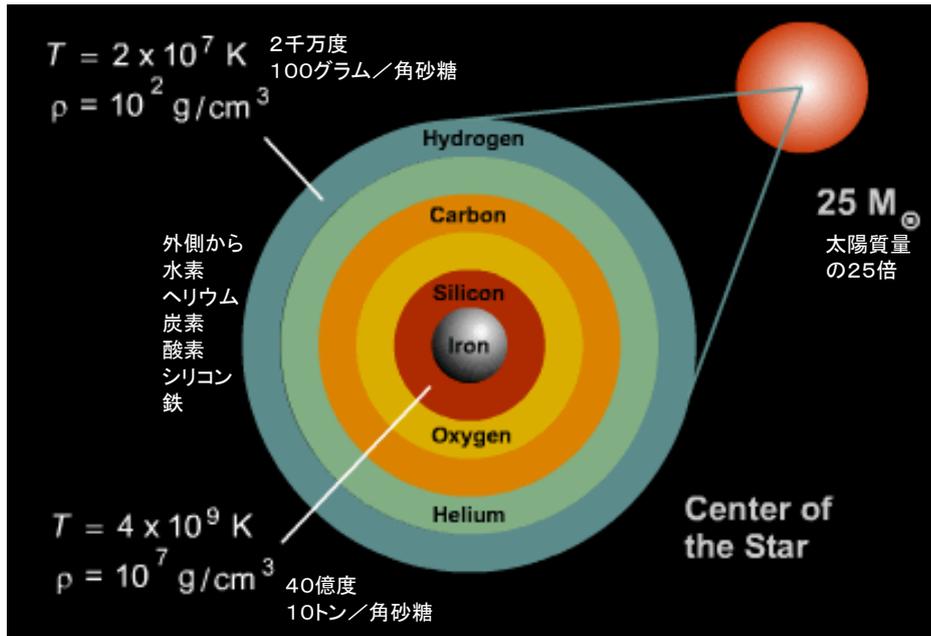
これが次図のような玉ネギ構造（オニオン・シェル）を成す。

\*）核力は原子核として陽子や中性子などを結び付ける力で、強い力と弱い力の2種類がある。強い力は陽子どうしの反発電気力をしのいで緊密に粘着させる強大な力であり、弱い力は電子を陽子に付けて中性子を構成する力であり強くない。だから単独の中性子はβ崩壊がすぐに起きて、電子をはきだして陽子になりニュートリノまで飛び出る。強い力を開放する現象が核分裂であり、原爆開発の基礎理論として、物理学者リゼ・マイトナー女史(1878-1968年)の研究:1938年に端を発している。

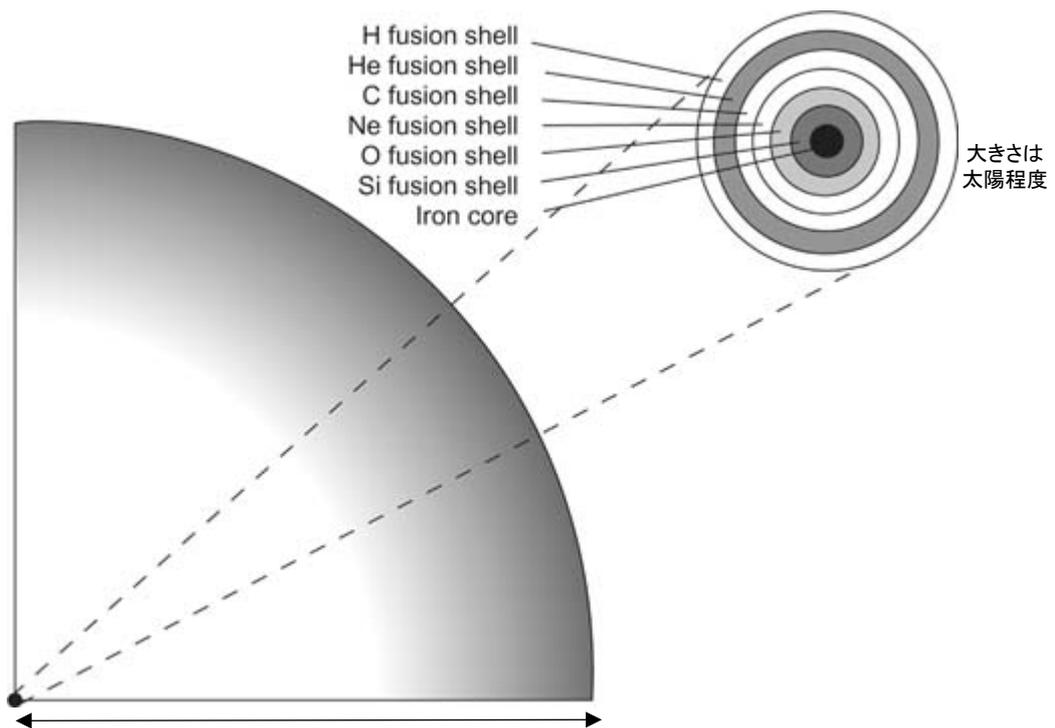


<http://astronomy.swin.edu.au/cosmos/C/core-collapse>

もう少し、分かりやすい玉ネギ構造は、赤色超巨星の中の芯の部分で形作られる。芯の大きさはおおむね太陽程度である。それぞれの殻は、核融合（フュージョン）の激しい反応が進行している。それぞれが光と熱を激烈に飛ばすが、余りにも強い重力により押さえつけられて赤色超巨星の表層（約3500度）まで届かず、くすぶる。また、熱の対流も生じて攪乱されて表層まで伝わりデコボコに膨張させる。これが冷えると縮んでコアに重力をかけて、また核融合反応を促進させる。これが何度も繰り返されて変光星のように、遠くからは見えることになる。



<http://astronomyonline.org/Stars/HighMassEvolution.asp>

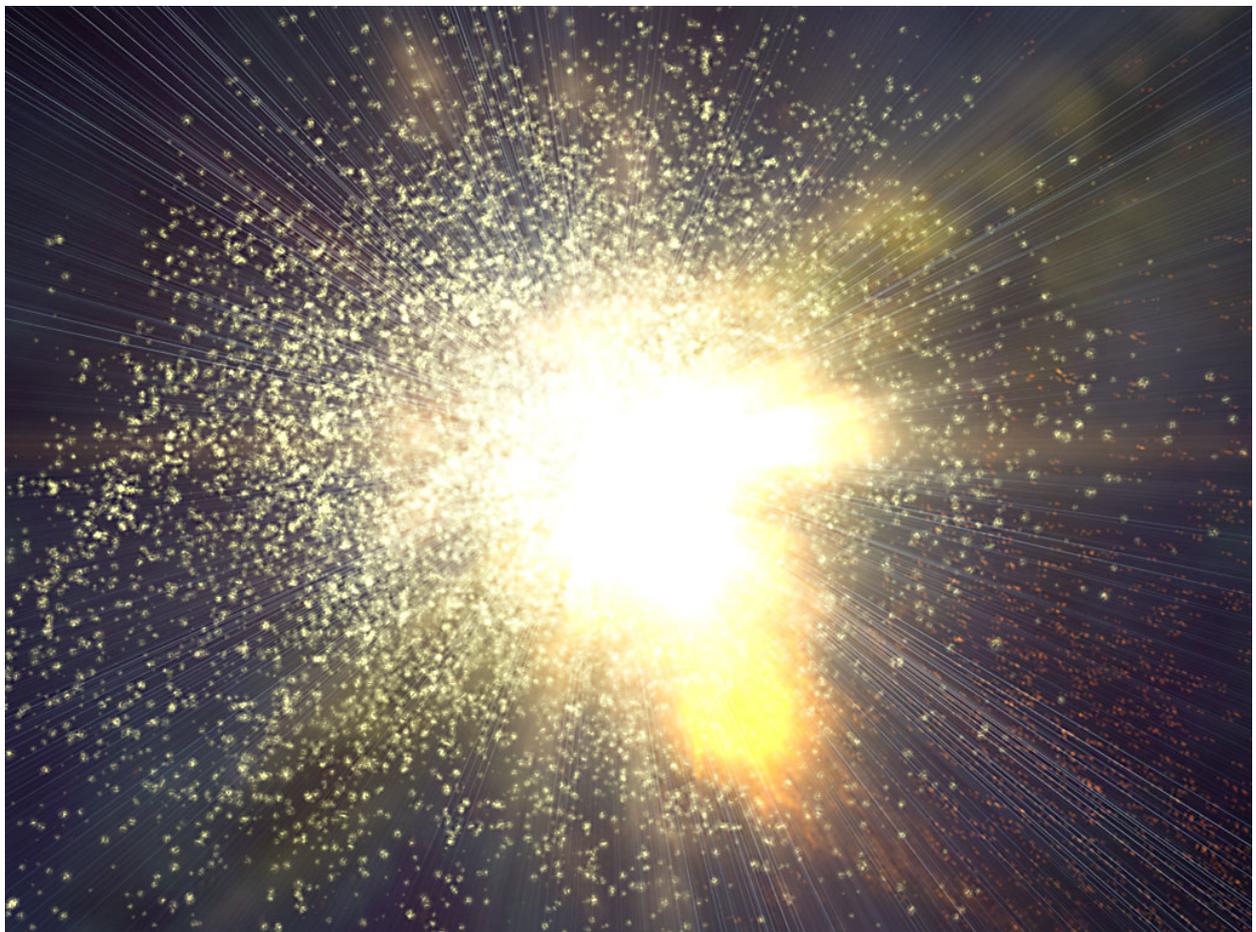
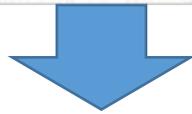
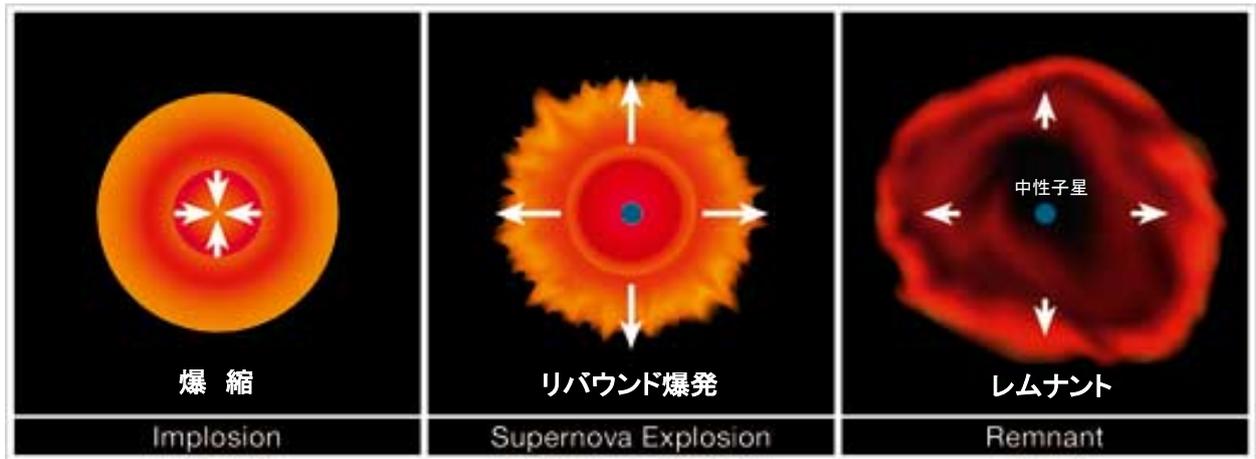


ベテルギウスの場合その半径は太陽の千倍=約8億km太陽系では木星軌道と土星軌道の間あたりまで  
<https://www.cliffsnotes.com/study-guides/astronomy/final-end-states-of-stars/type-ii-supernovae>  
 Onion shell model. Nuclear reactions are limited to the densest and hottest central region of the star.

## II型超新星爆発の異なるフェーズ

The different phases for Type II supernovae: core contraction, explosion, and supernova remnant.

<http://www.scienceinschool.org/2007/issue5/fusion>



<http://pics-about-space.com/supernova-explosion-nasa?p=2>

爆発は、膨張・収縮を繰り返した後に芯が1千億度に達すると中性子コアが出来て起きる。膨張した外層から次第に中心に流れ込んで加速がつき、破局的な**重力崩壊**という現象により鉄よりも10万倍ほどの密度がある中性子核が生成される。すなわち、コアの鉄原子核がバラバラになり陽子に電子が結合して中性子になってしまうと10万倍に近いスペースが出来上がる。

1秒足らずに空いた大きなすき間に玉ネギコアも崩壊されて加速がついて一気に落ち込む。これを爆縮というが、宇宙最硬度の中性子コアが同じ速度で跳ね返す、すなわち**リバウンド現象**である。硬度が無尽大に近いからぶつかったものは、その速度が保存される。秒速数万kmの猛スピードがそのまま爆発エネルギーになる。中性子コア周りに、陽子・電子の結合で出来たニュートリノが玉ネギの重圧でウロウロしていた膨大な数が先に飛び出して爆発エネルギーの99%を持ち出す。これが先に述べたようにカミオカンデで観測された超新星ニュートリノである。玉ネギ各層の元素は芯からの強烈な衝撃波を受けて抵抗するが数時間しか持たない。外層の水素ガス帯に達すると爆裂が始まり外層も玉ネギ全ても粉々に弾いて超新星となる。

残骸として取り残されるのは、これまでに何度も出てきた中性子星である。

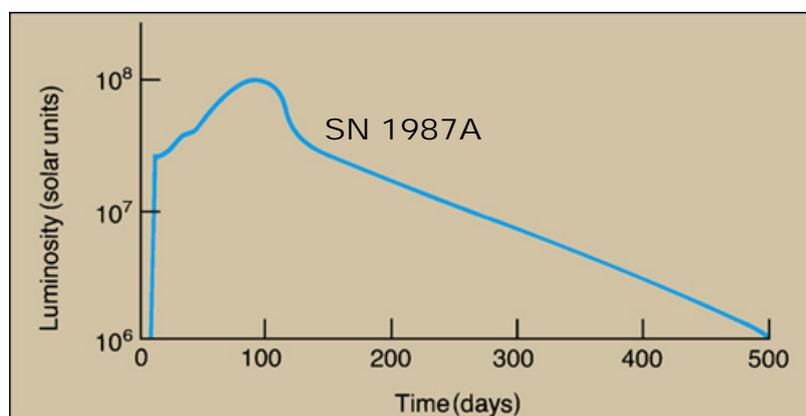
「爆縮：インプロージョン」とは、プルトニウム型原爆の構造研究で実用化された技術と言葉である。プルトニウムはウランと異なり臨界量が分からなかった。このため、濃度が臨界に達しないほどほどの状態で爆縮技術により押し潰して無理やりに臨界濃度を創り出してしまえば爆発するはずとして原爆を造った。これが“ファットマン”というコードネームがついたものである。したがって、どうしても実験が必要となったのだ。臨界というのは、地球上に降り注ぐ宇宙線により自然にウラン235やプルトニウム239は核分裂を起こすが、連鎖反応までにはいかない。この連鎖反応に達する濃度ないしは純度の塊の質量：kgを「臨界量」という。

ウラン235については、連鎖反応の理論と計算が精密にできたから、「リトルボーイ」として実験なしに、広島への投下としてそのまま使われた。

## ② 光度変化

II型超新星の花形であるSN1987Aは、16万光年先の大マゼラン星雲という伴銀河で発生したが、幸運にも人類が手にした高度な望遠鏡と観測分析技術により、天文学者や物理学者たちを躍らせた。あたかも200kgの黒マグロを前にして研ぎに研いだ包丁を持って腕が鳴っている調理人のように喩えられるかもしれない。

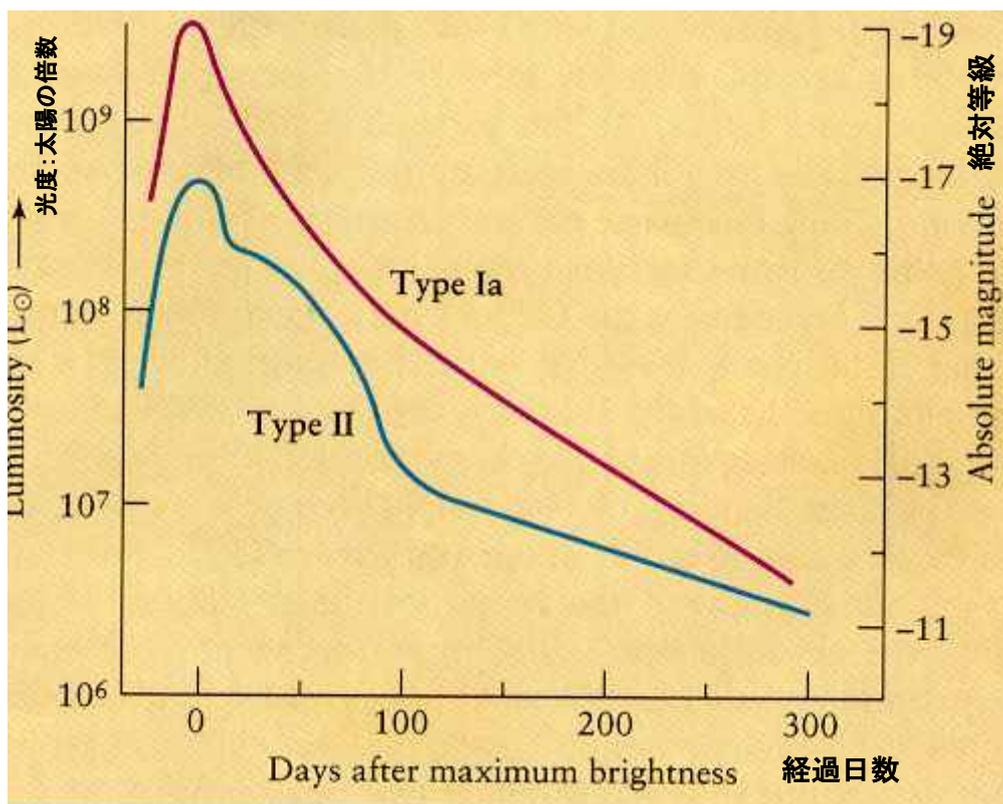
さっそく、その光度変化特性は最初のネタとなった。克明に観測された特性は次図のとおり。一切の誤差はない。これにより、同類の超新星と比較検討ができる。主なポイントはピーク時の特性が、どのような元素が燃焼して放出されて出来たのかである。少なくとも、水素が多いことは予想どおりIa型と異なることでは確証が得られている。



<http://astronomy.nju.edu.cn/~lixid/GA/AT4/AT421/HTML/D2101.htm>

I a型と比較した図をみると明らかに最光度が違う。I a型は太陽の数十億倍で、II型は数億倍であるから、いずれも少なくとも恒星数億個分に相当する。天の川銀河系には、数千億個の恒星があるようだから、230万光年も離れたアンドロメダから観ても、鮮明に見えてしまうほどである。

絶対等級では、おおむね-19等星と-17等星でI a型がII型の6倍以上も明るい。最光度からの減退は、II型は少し横ばいになる“プラトー（台地）”という状態が続いて、その後指数関数的に暗くなる。



<http://www.galaxyzooforum.org/index.php?topic=278617.0>

### ③ 元素生成

恒星が燃え尽きるまでにその内部では、玉ネギ構造のとおり各種の元素が合成される。超新星として爆発するまでの合成過程は以下のとおりと理論的に解明されてきた。

宇宙創成期：                    ビッグバン直後に、約 75%の水素、約 25%のヘリウムが出来て、これらがファースト・スター\*の材料となった。

\* 吉田直紀ら(東京大学大学院物理学専攻/カブリ数物連携宇宙研究機構)によって世界初でビッグバン後にファースト・スターが形成されるまでのシミュレーションが成された。

恒星内元素合成：                25 太陽質量程度の恒星の核燃焼段階

コアにおける燃焼段階	コアの温度	生成元素	期間
P・P連鎖反応⇒CNOサイクル	1～2千万度	ヘリウム	1千万年
トリプルアルファ反応	2億度～	炭素, 酸素	百万年
炭素燃焼過程	8億度～	ネオン, ナトリウム, マグネシウム, アルミニウム	千年
ネオン燃焼過程	16億度～	酸素, マグネシウム	3年
酸素燃焼過程	18億度～	ケイ素, 硫黄, アルゴン, カルシウム	4ヶ月
ケイ素燃焼過程	25億度～	ニッケル→コバルト→鉄に崩壊	数日

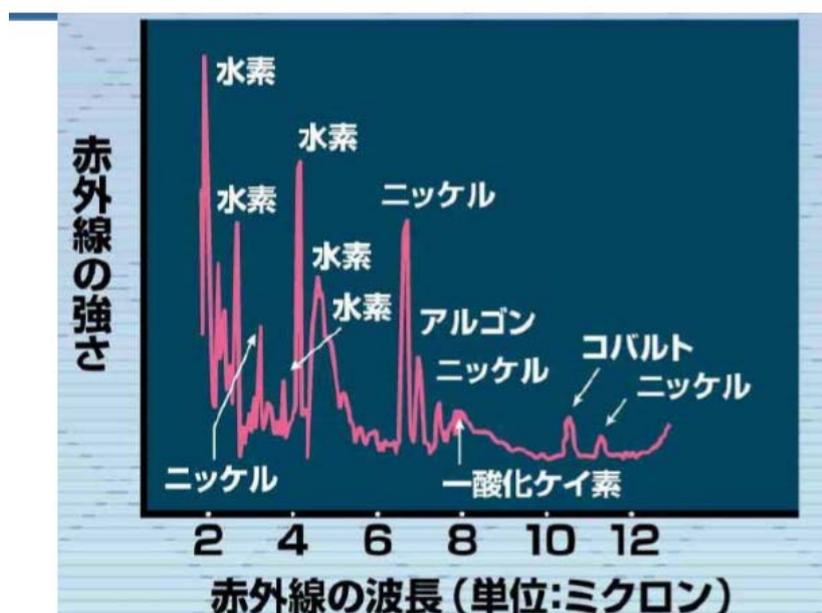
ケイ素の燃焼まで進行した恒星は、内側から、鉄の核、ケイ素の球殻、酸素の球殻、ネオンの球殻、炭素の球殻、ヘリウムの球殻、水素の最外層からなる玉ネギ構造になり、中心以外の各層で核融合が進行。

ケイ素燃焼プロセスは数日で終了し、ニッケル 56 を生成して停止。大質量星では、数分でニッケル 56(陽子 28 個)がβ崩壊を起こして、コバルト 56(陽子 27 個)に崩壊。更にコバルト 56 がβ崩壊を起こして、鉄 56(陽子 26 個)に崩壊。

超新星爆発： ケイ素の燃焼が完了した恒星は数分で収縮を始め、爆縮に発展する。数秒でコアが重力崩壊を起こし、ついには II 型超新星としてリバウンド爆発し、全元素を宇宙に吹き飛ばす。

超新星 1987A のスペクトル観測から、爆発で宇宙空間に飛び散った元素がある程度、次図のとおり判明する。とにかく、元素の周期律表における鉄までの元素は巨星で作られ超新星爆発で飛び散り、宇宙に漂い、やがては緩やかな重力場の暗黒星雲の中に集まる。

### 1987A赤外線スペクトル

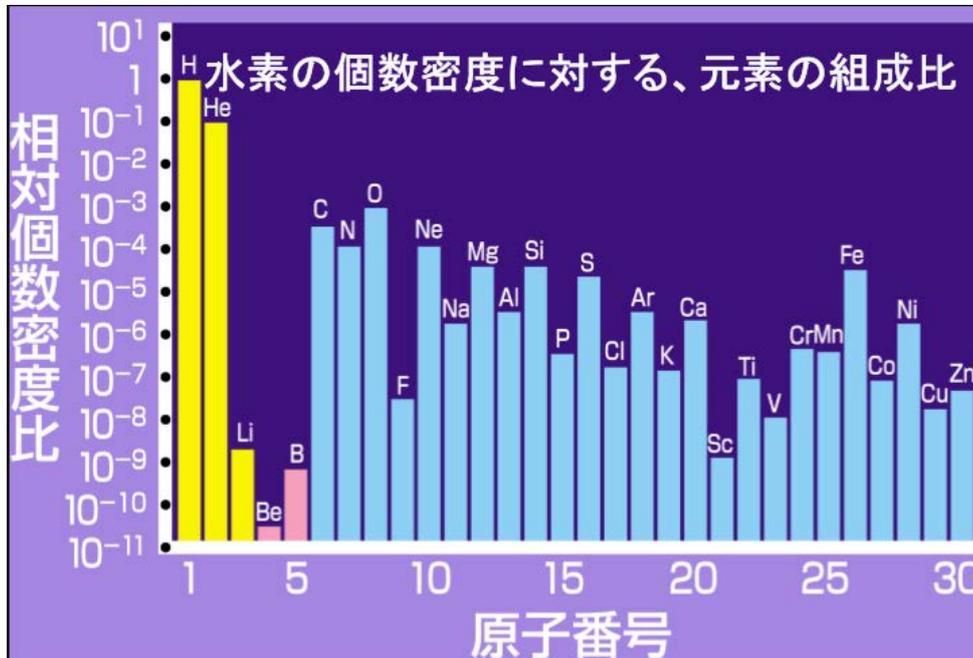




## ヒトの体内元素

現在までに判ってきた自然に存在する元素は、原子番号 92 のウランまでである。その存在割合は、この広い宇宙において次の図のとおりである。炭素や酸素は数的に水素の 1/1000 しかない。超新星の爆発までこらえていた恒星コアの鉄 Fe でさえも水素元素の数の 1/10000 で、極めて少ない。宇宙創成期に作られたという水素 H やヘリウム He が圧倒的に多い。これは、恒星内の核融合で作られ、超新星爆発で散乱され供給されるその他の元素がいかに少数か、を知らされることになる。また、この広い宇宙に始まりがあったのだ、ということも信じないわけにはいかない。宇宙がたった 1 点から膨張して爆発したという「ビッグバン理論」はフィクションではないかと思っていた私も、姿勢を正さなければと考え始めている。

宇宙における元素の存在量



<http://www.utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~suto/myresearch/element06.pdf>

一方、標準的な人体を構成する細胞の数は 37 兆個と見積もられている。その一つの細胞が平均 1000 兆個の原子から構成されているらしい。すると、 $10^{28}$  個ほどの原子で私たちは成り立っているのである。原子という物理的で冷たいものにより霊長類の頂点に立つ人間をみることは、悪寒が走るけれども、宇宙と対比するとしかたないのである。

果たして、元素の種類で比べるとどうなるか。宇宙に存在する元素の種類は水素からウランまでで 92 種ほどである。人体は何種類の元素で構成されているのか？

周期表は 1869 年にロシアの化学者ドミトリ・メンデレーエフにより作成されたことは、中学生の頃に習った。これは現在まで新元素の発見や作成で何度も改版されてきている。最近では、日本も新元素「ニホニウム Nh」を開発・作成して国際的に認められたニュースは、私たちも耳にしていた覚えがあるだろう。

最新の周期律表を次図に掲げるが、原子番号 92 のウランを越えるものは全て人工的に作られたものである。

### 元素の周期律表

hydrogen 1 H 1.0079																	helium 2 He 4.0026		
lithium 3 Li 6.941	beryllium 4 Be 9.0122											boron 5 B 10.811	carbon 6 C 12.011	nitrogen 7 N 14.007	oxygen 8 O 15.999	fluorine 9 F 18.998	neon 10 Ne 20.180		
sodium 11 Na 22.990	magnesium 12 Mg 24.305											aluminum 13 Al 26.982	silicon 14 Si 28.086	phosphorus 15 P 30.974	sulfur 16 S 32.065	chlorine 17 Cl 35.453	argon 18 Ar 39.948		
potassium 19 K 39.098	calcium 20 Ca 40.078	scandium 21 Sc 44.956	titanium 22 Ti 47.867	vanadium 23 V 50.942	chromium 24 Cr 51.996	manganese 25 Mn 54.938	iron 26 Fe 55.845	cobalt 27 Co 58.933	nickel 28 Ni 58.693	copper 29 Cu 63.546	zinc 30 Zn 65.39	gallium 31 Ga 69.723	germanium 32 Ge 72.61	arsenic 33 As 74.922	selenium 34 Se 78.96	bromine 35 Br 79.904	krypton 36 Kr 83.80		
rubidium 37 Rb 85.468	strontium 38 Sr 87.62	yttrium 39 Y 88.906	zirconium 40 Zr 91.224	niobium 41 Nb 92.906	molybdenum 42 Mo 95.94	technetium 43 Tc [98]	ruthenium 44 Ru 101.07	rhodium 45 Rh 102.91	palladium 46 Pd 106.42	silver 47 Ag 107.87	cadmium 48 Cd 112.41	indium 49 In 114.82	tin 50 Sn 118.71	antimony 51 Sb 121.76	tellurium 52 Te 127.60	iodine 53 I 126.90	xenon 54 Xe 131.29		
cesium 55 Cs 132.91	barium 56 Ba 137.33	57-70 *	lutetium 71 Lu 174.97	hafnium 72 Hf 178.49	tantalum 73 Ta 180.95	tungsten 74 W 183.84	rhenium 75 Re 186.21	osmium 76 Os 190.23	iridium 77 Ir 192.22	platinum 78 Pt 195.08	gold 79 Au 196.97	mercury 80 Hg 200.59	thallium 81 Tl 204.38	lead 82 Pb 207.2	bismuth 83 Bi 208.98	polonium 84 Po [209]	astatine 85 At [210]	radon 86 Rn [222]	
francium 87 Fr [223]	radium 88 Ra [226]	89-102 **	lawrencium 103 Lr [262]	rutherfordium 104 Rf [261]	dubnium 105 Db [262]	seaborgium 106 Sg [266]	bohrium 107 Bh [264]	hassium 108 Hs [269]	meitnerium 109 Mt [268]	unnilium 110 Uun [271]	ununium 111 Uuu [272]	unbibium 112 Uub [277]	113 Nh*	ununquadium 114 Uuq [289]					
* Lanthanide series			lanthanum 57 La 138.91	cerium 58 Ce 140.12	praseodymium 59 Pr 140.91	neodymium 60 Nd 144.24	promethium 61 Pm [145]	samarium 62 Sm 150.36	europium 63 Eu 151.96	gadolinium 64 Gd 157.25	terbium 65 Tb 158.93	dysprosium 66 Dy 162.50	holmium 67 Ho 164.93	erbium 68 Er 167.26	thulium 69 Tm 168.93	ytterbium 70 Yb 173.04			
** Actinide series			actinium 89 Ac [227]	thorium 90 Th 232.04	protactinium 91 Pa 231.04	uranium 92 U 238.03	neptunium 93 Np [237]	plutonium 94 Pu [244]	americium 95 Am [243]	curium 96 Cm [247]	berkelium 97 Bk [247]	californium 98 Cf [251]	einsteinium 99 Es [252]	fermium 100 Fm [257]	mendelevium 101 Md [259]	nobelium 102 No [259]			

<http://www.middlebury.net/op-ed/periodic-table.html>

- 1) 赤色は人体の血液に含まれるもの: 78種で自然元素総数の約85%
- 2) 青色は人工的に生成されたもの
- 3) 原子番号113番は、日本発の新元素ニホニウム。ニホニウムは理化学研究所の研究グループが合成に成功し、11月30日、名称と元素記号「Nh」が国際組織で正式決定された。

NHKの「コスミック・フロント: 元素と生命 (2009.9.22)」の番組をみたとき、フランスのポー大学の微量原子分析装置にてヒトの血液を分析した場面に驚いた。たった一滴の血液の中に、なんと 78 種の元素が含まれていたのだ。上図の周期律表において赤欄で示してあるが、ウランまでである。宇宙にある全 92 種の元素のうち、約 85%がヒトの体内にあるのだ。

つまり、私たち一人一人がマイクロ・コスモスであることにも驚嘆する。

## エピローグ

超新星の観測と研究はひきもきらない。成果情報も自然科学では、おそらく癌研究と双璧になっていることは容易に想像がつく。それらが始まった時代も同期している。

いまや、この広い宇宙で毎日のように超新星は発見されている。すべては天の川銀河系の外のおびただしい数の銀河で起きている。たまたま、遙か遠くで私たちには見えないから他人事のように知らんぷりしているが、太陽系の身近で起きたら昨今の東関東大震災どころではない。映画「ディープインパクト」を観れば、題材は超新星爆発とは違って彗星の衝突であるが、そのカオスのリアルさが視聴体験できる。

問題は人間の視野にある。私は敢えて「未知」と「無知」を区別している。無知は見ようもしないが、未知は「なんだそれ?!」という意識を絶えずはらんでいる。まるで子供のように追及してしまうのが未知であろう。

この広い宇宙の実態に突入してみると、未知という意識力が欠かせないことが判った。知らないけどいいや、でなく、知らないけど知ってみようとする力はもともと人間に備わっているのだから使わない手はない。それは、脳の知識空間に働く重力のようでもある。

車椅子の理論物理学者スティーヴン・ホーキングは、30歳で五体すべての運動能力を失っても残った貴重な、かつ強力な知力を使って70歳を超えて見事に鮮やかに生き抜いている。彼は、毎日数十の新しく発表されたばかりの論文を読むという。正に絶えず「未知」を追い掛けているのだ。その彼が「UFOは本当にいるのか?」という中学生の質問に答えて言っていた。「この広い宇宙には私たちのような知的生命体はいる。ただ、遠くて来れないし、来るまでに文明が自滅してしまうこともある。だから、地球環境を大切にしなければいけない。」と。

健康な五体を持っている私たちのアクションは、言わずもがなであろう。

今回は、数千億もあるという銀河に迫ってみる。

別当 勉

<betobetoven@mail2.accsnet.ne.jp>

<参考図書等>

No.	題名	著者	発行元
1	ニュートリノ天体物理学入門 「知られざる宇宙の姿を透視する」	小柴昌俊	ブルーバックス;講談社
2	地底から宇宙を探る 「ニュートリノ質量が発見されるまで」	戸塚洋二 梶田隆章	岩波書店
3	ガンマ線バースト 「どこから来るのか、なぜ起こるのか」	村上敏夫	ブルーバックス;講談社
4	中性子星とパルサー	柴崎徳明	培風館
5	超新星 1987A に挑む 「壮烈な星の最期をさぐる」	野本陽代 野本憲一	ブルーバックス;講談社
6	ブラックホールを見つけた男 (スプラマニアン・チャンドラセカール)	アーサー・I. ミラー 阪本芳久:訳	草思社
<放送コンテンツ>			
101	コスミック・フロント「元素と生命」 2009.9.22	NHK-BSプレミアム	NHK
<インターネット・サイト>			
201	<a href="http://ircamera.as.arizona.edu/Astr2016/images/extl1t1grnmn.htm">http://ircamera.as.arizona.edu/Astr2016/images/extl1t1grnmn.htm</a> Little Green Men, White Dwarfs or Pulsars? By S. Jocelyn Bell Burnell		