

## ■本資料のご利用にあたって(詳細は「利用条件」をご覧ください)

本資料には、著作権の制限に応じて次のようなマークを付しています。  
本資料をご利用する際には、その定めるところに従ってください。

**\*** : 著作権が第三者に帰属する著作物であり、利用にあたっては、この第三者より直接承諾を得る必要があります。

**CC** : 著作権が第三者に帰属する第三者の著作物であるが、クリエイティブ・コモンズのライセンスのもとで利用できます。

 : パブリックドメインであり、著作権の制限なく利用できます。

なし : 上記のマークが付されていない場合は、著作権が東京大学及び東京大学の教員等に帰属します。  
無償で、非営利的かつ教育的な目的に限って、次の形で利用することを許諾します。

- I 複製及び複製物の頒布、譲渡、貸与
- II 上映
- III インターネット配信等の公衆送信
- IV 翻訳、編集、その他の変更
- V 本資料をもとに作成された二次的著作物についての I からIV

ご利用にあたっては、次のどちらかのクレジットを明記してください。

東京大学 Todai OCW 学術俯瞰講義  
Copyright 2013, 小島憲道

The University of Tokyo / Todai OCW The Global Focus on Knowledge Lecture Series  
Copyright 2013, Norimichi Kojima

# 平成25年度学術俯瞰講義

## 「物質の神秘」その生い立ちから私たちの未来まで

コーディネータ    小島憲道(教養学部)  
ナビゲータ        永田 敬(教養学部)

自然界に存在する元素は約90種類存在するが、これらは宇宙の膨張過程および星の中で誕生した。また、人類は、元素の変換から生み出される新しいエネルギーを発見し、約30種類に及ぶ人工元素が合成された。人工元素を含む約100種類の元素をもとに合成された分子は1000万種以上にも及び、現在も新しい化合物が合成されている。

本講義では、「物質の神秘」を主題テーマとして、宇宙創世と元素の誕生、膨張する宇宙の運命、正体不明の暗黒物質を探る研究、物質の性質を支配する法則とそれを応用した金属、半導体から高分子にわたる物質の科学、新しい医療技術を生み出す物質の科学、自然エネルギーを活用し持続的社会を支える材料の科学などを最先端の分野で活躍している教員が解説する。

# 学術俯瞰講義

「物質の神秘」その生い立ちから私たちの未来まで

小島憲道(教養学部)

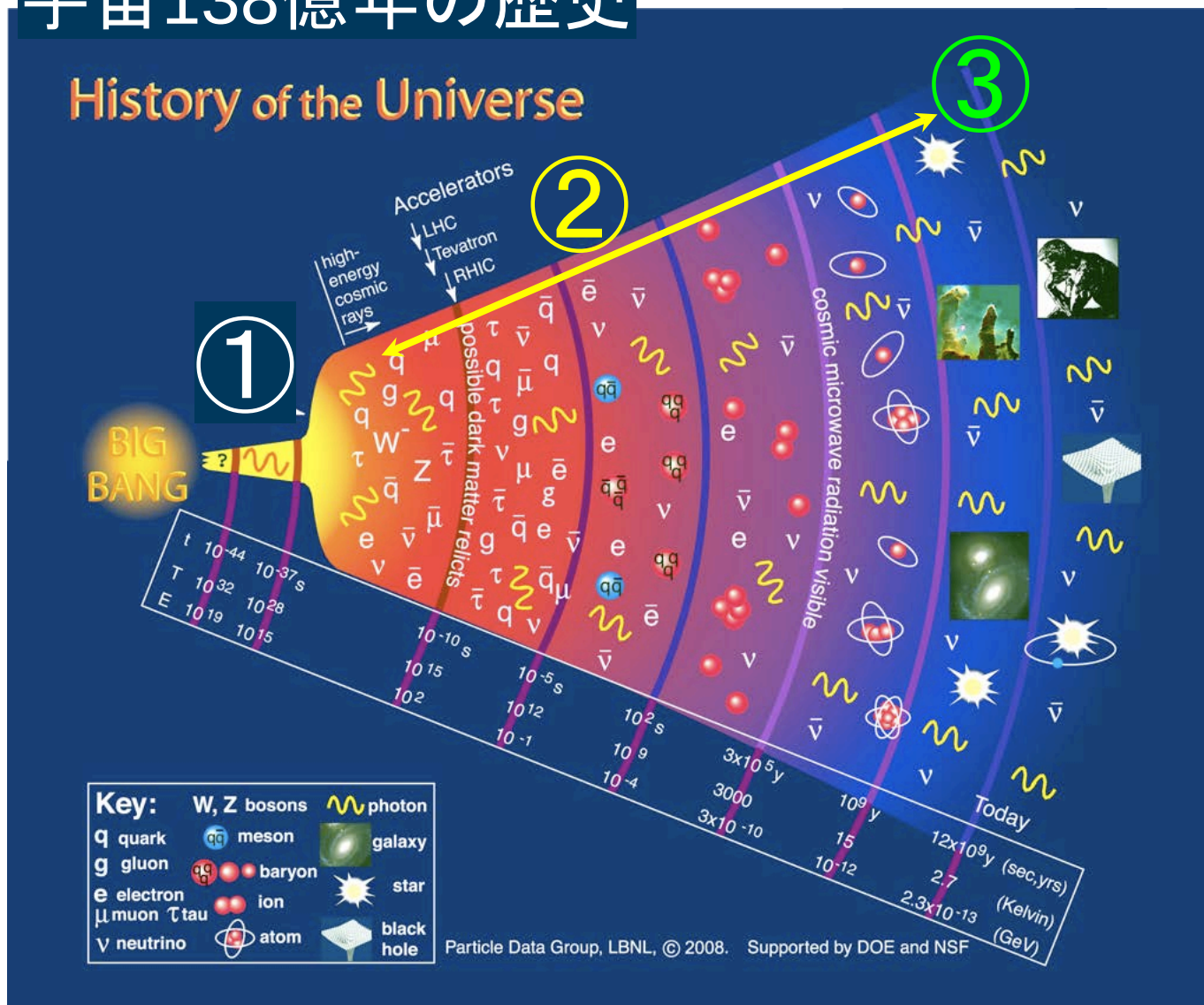
|    |       |                                   |      |
|----|-------|-----------------------------------|------|
| 1  | 4月 8日 | 宇宙になぜ我々が存在するのか:宇宙誕生               | 村山齊  |
| 2  | 4月15日 | 宇宙になぜ我々が存在するのか:物質誕生               | 村山齊  |
| 3  | 4月22日 | 宇宙になぜ我々が存在するのか:銀河誕生               | 村山齊  |
| 4  | 5月 7日 | 物質科学ことはじめ:現代社会と物質科学, 原子・分子・物質の構造  | 家泰弘  |
| 5  | 5月13日 | 物質科学ことはじめ:物質の個性(物性)はどこから生まれるか     | 家泰弘  |
| 6  | 5月20日 | 物質科学ことはじめ:奇妙な量子の世界                | 家泰弘  |
| 7  | 5月27日 | 現代社会と物質:金属の科学と材料としての応用            | 小関敏彦 |
| 8  | 6月 3日 | 現代社会と物質:アクアマテリアル:持続性社会実現のための我々の挑戦 | 相田卓三 |
| 9  | 6月10日 | 現代社会と物質:半導体量子ドット ~電子や光子を操るナノの世界~  | 荒川泰彦 |
| 10 | 6月17日 | 現代社会と物質:放射線のリスクと防護の科学             | 飯本武志 |
| 11 | 6月24日 | 現代社会と物質:チューインガムの物理                | 土井正男 |
| 12 | 7月 1日 | 現代社会と物質:光機能性材料の科学:化学に基づく新医療技術の創出  | 浦野泰照 |
| 13 | 7月 8日 | 現代社会と物質:物質科学が拓く新エネルギーとサステナビリティの未来 | 瀬川浩司 |



# 宇宙になぜ我々が存在するのか

村山 齊 (数物連携宇宙研究機構)

## 宇宙138億年の歴史



\* Credit: Particle Data Group, Lawrence Berkeley National Lab

- ・この宇宙にどうして我々が存在するのか
- ・物質はどうして生まれ、星や銀河はどうして形作られたのか

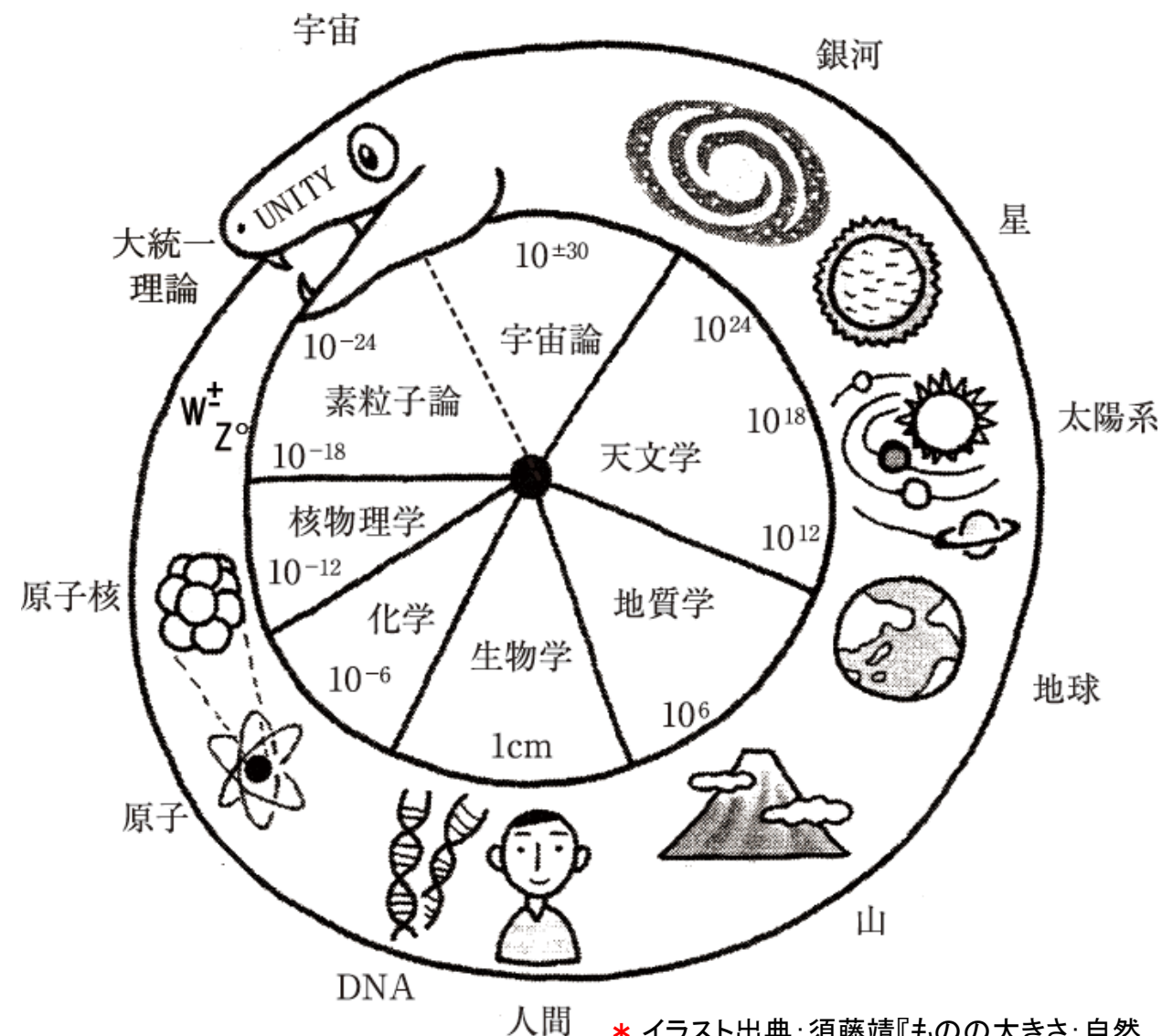
### ① 宇宙誕生

### ② 物質誕生

### ③ 銀河誕生

## ウロボロスの蛇

素粒子論と宇宙論の切っても切れない関係



\* イラスト出典: 須藤靖『ものの大きさ: 自然の階層・宇宙の階層』東京大学出版会、2006年、p.142 図6.1 作画: いずもり・よう

ウロボロスとはギリシャ語で“尾を飲み込む蛇”を表し、古代ギリシャでは「世界の完全性」を表すシンボルとして描かれた。

(ビッグバン).....

## 星の誕生

(主系列星)

$^1\text{H}$ を出発原料に $^4\text{He}$ が生成

## 赤色巨星

$^4\text{He}$ を出発原料に $^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$ などが生成

[重い星]

[軽い星]

$^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$ などを出発原料に  
 $^{56}\text{Fe}$ までの重い原子が生成

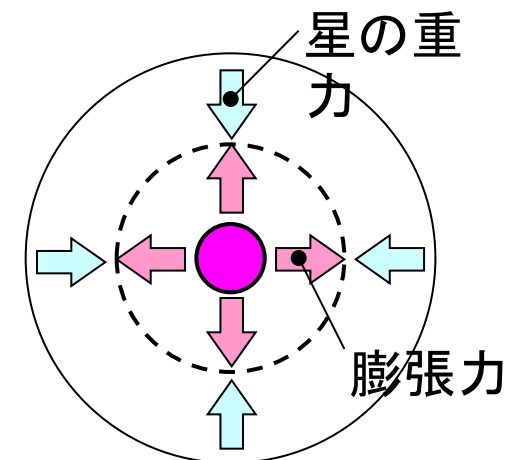
質量放出

## 白色矮星

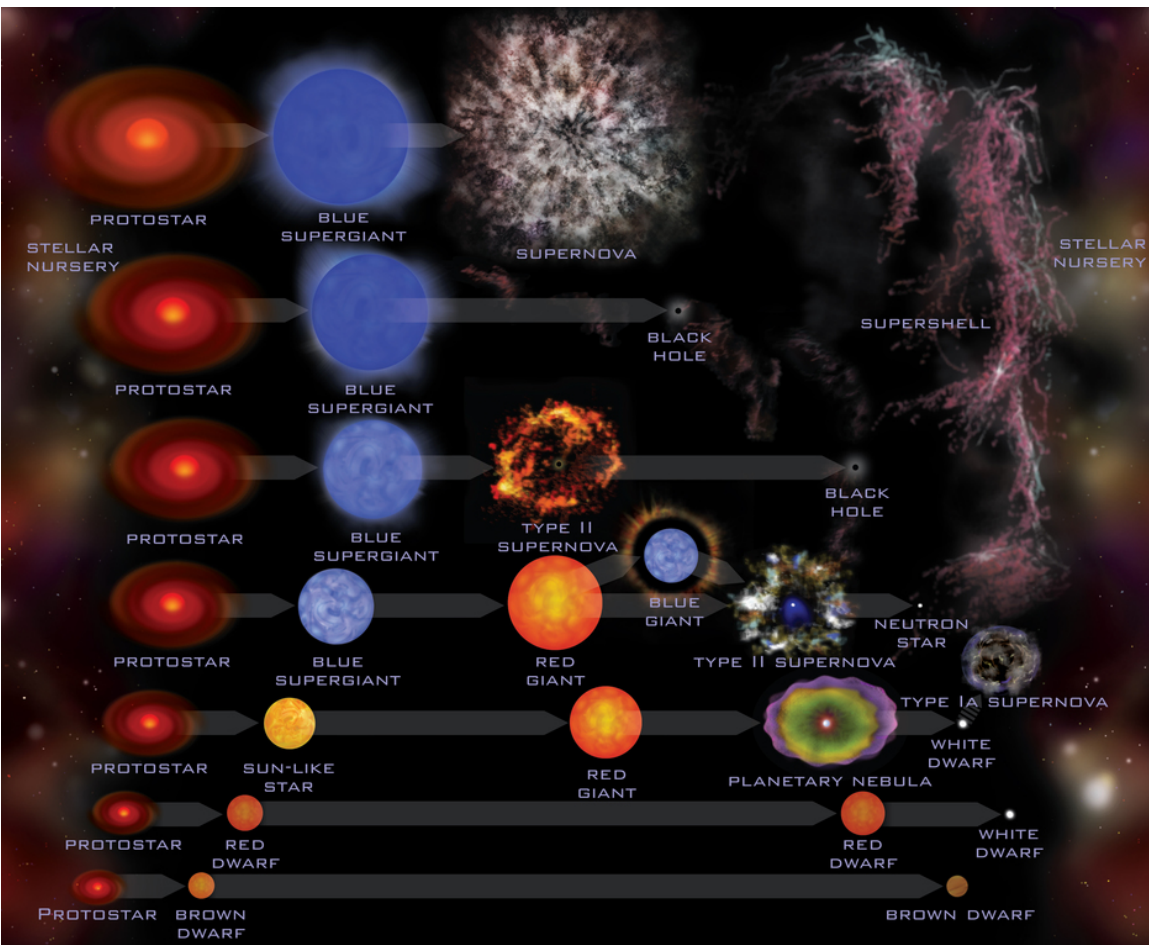
## 超新星爆発

Feなどの原子核に  
中性子が捕捉され、Feよりも  
重い原子(Uなど)が誕生する

中性子星  
ブラックホール



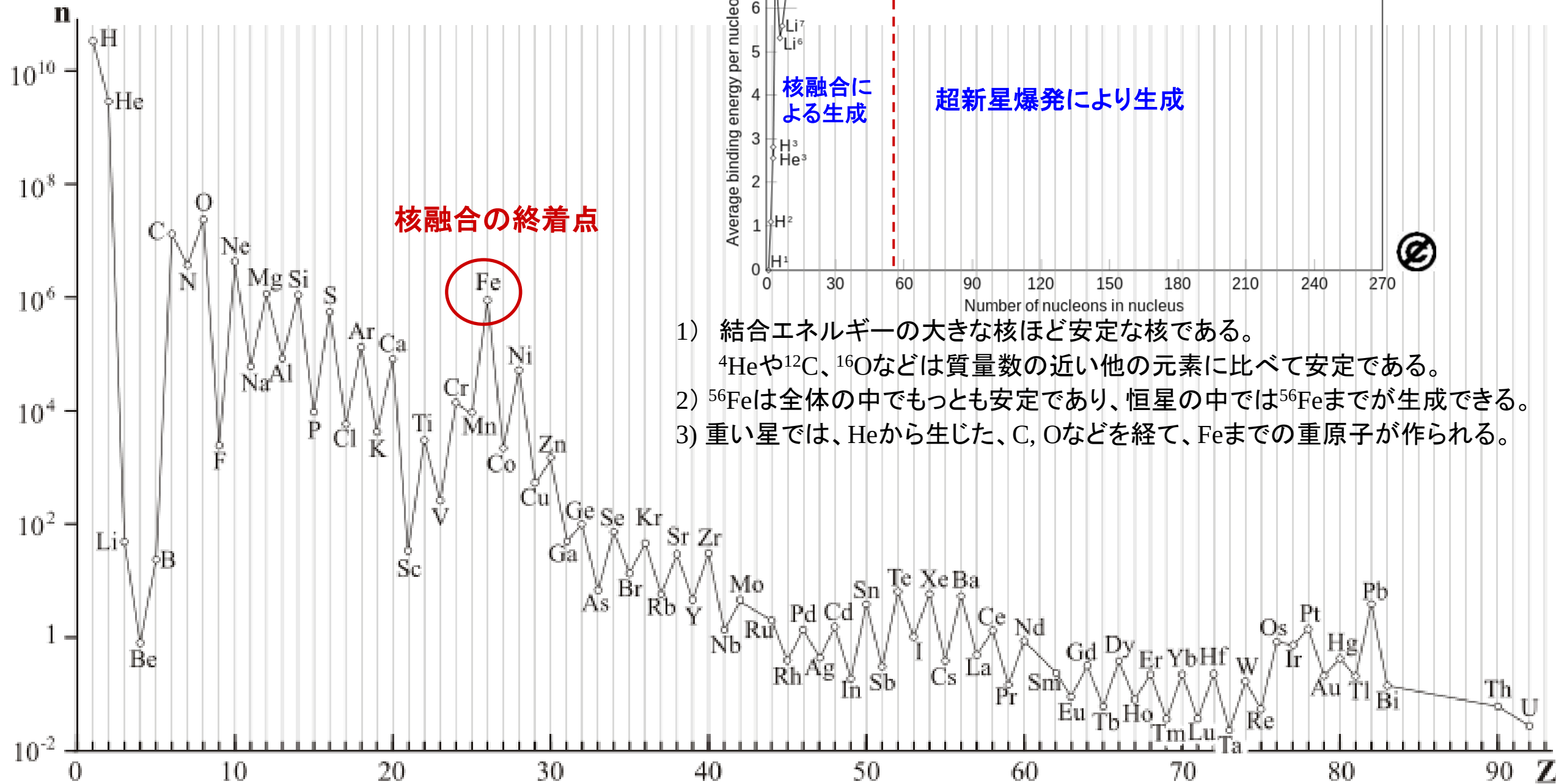
註) 太陽および太陽系惑星: 水素からウランまで含む  
→ 超新星爆発に由来する



\* Credit: NASA/CXC/M.Weiss

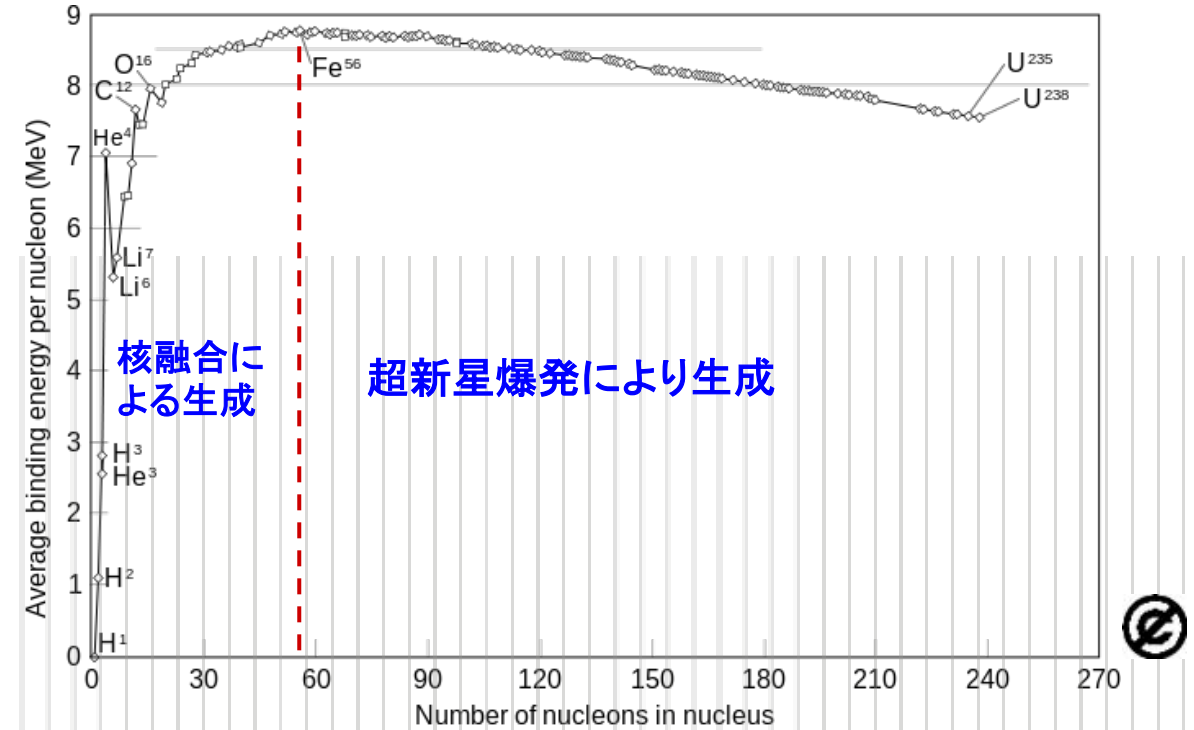
# 宇宙における元素の組成

元素の存在比の対数



核融合の終着点

## 安定核種における原子核の結合エネルギー



核融合による生成

超新星爆発により生成

- 1) 結合エネルギーの大きな核ほど安定な核である。  
 $^4\text{He}$ や $^{12}\text{C}$ 、 $^{16}\text{O}$ などは質量数の近い他の元素に比べて安定である。
- 2)  $^{56}\text{Fe}$ は全体の中でもっとも安定であり、恒星の中では $^{56}\text{Fe}$ までが生成できる。
- 3) 重い星では、Heから生じた、C、Oなどを経て、Feまでの重原子が作られる。

## ケイ素(Si)の存在比を $10^6$ としたときの相対値

原子番号

A.G.W. Cameron (1973) Abundances of the elements in the solar system, *Space Science Reviews*, vol.15 (no.1):121-146  
 に基づいた元素の組成比



# 物質科学とはじめ

家 泰弘(物性研究所)

【概要】 現代社会の基盤をなす様々な機器や材料は、多彩な物質の性質（物性）を巧みに利用したものである。物質科学はその基礎をなす学問である。あらゆる物質は約100種類の元素の様々な組合せからできている。物質の構成要素である原子からはじめて、多数の原子からなる分子の性質、さらには膨大な数（アヴォガドロ数 $\sim 10^{23}$ 個）の原子や分子の集合体である固体や液体の電氣的、磁氣的、光学的性質がどのようにして生まれるかを説き明かす。量子力学特有の効果や巨視的量子現象である超流動・超伝導にも触れたい。3回の講義で、第7回以降の「物質の応用」に関する諸講義を理解するための基礎を俯瞰する。

## 第4回 現代社会と物質科学、原子・分子・物質の構造

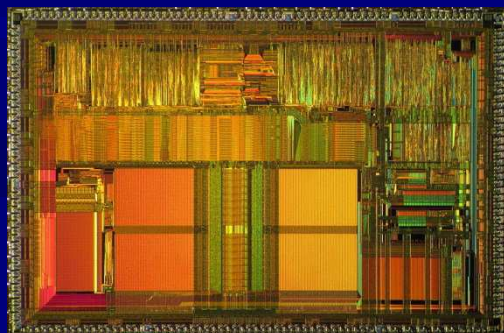
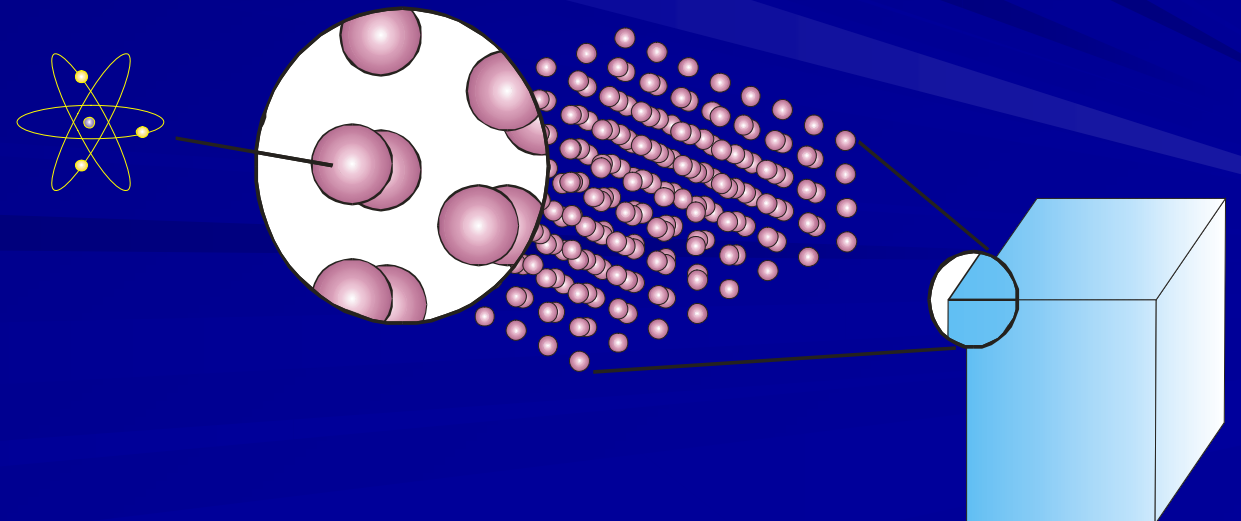


Photo by Pauli Rautakorpi, from  
Wikimedia Commons [CC BY-SA 3.0](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Intel_80486SX2_die.JPG)  
[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:  
:Intel\\_80486SX2\\_die.JPG](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Intel_80486SX2_die.JPG)



Photo by PiccoloNamek, from  
Wikimedia Commons [CC BY-SA 3.0](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:RBG-LED.jpg)  
[http://commons.wikimedia.org/wiki/Fil  
e:RBG-LED.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:RBG-LED.jpg)



# 物質科学こととはじめ

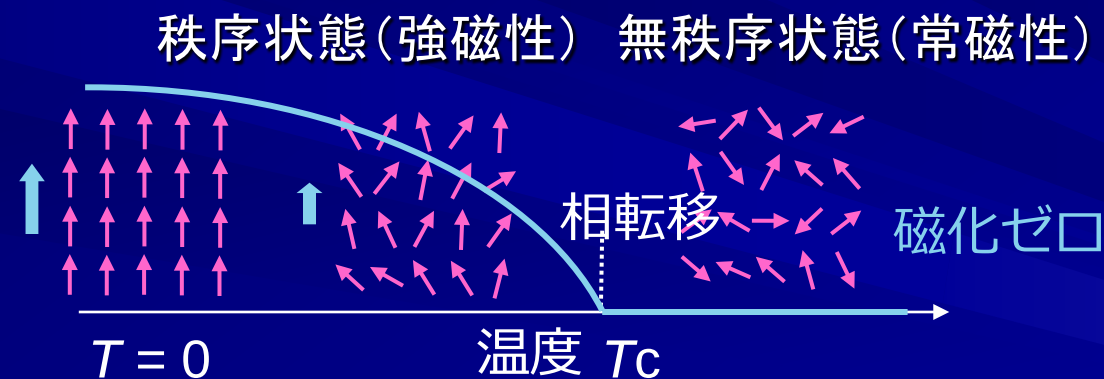
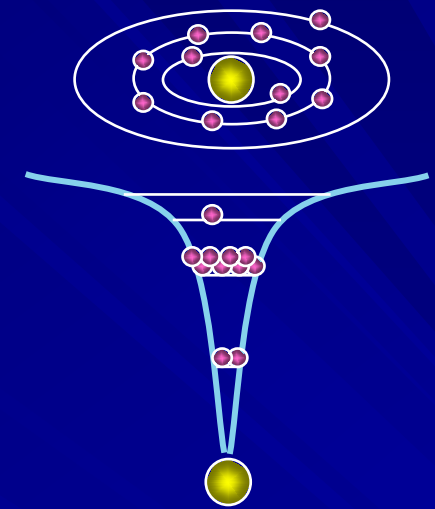
家 泰弘(物性研究所)

## 第5回 物質の個性(物性)はどこから生まれるか

### <第一歩> 原子の構造と周期律

### <第二歩> 原子から固体へ

### <第三歩> 協力現象と相転移



| I II |                                                     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | III IV V VI VII VIII |                 |     |     |  |  |  |  |
|------|-----------------------------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|----------------------|-----------------|-----|-----|--|--|--|--|
| 1    | H                                                   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 2                    | He              |     |     |  |  |  |  |
| 2    | Li Be                                               |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 3                    | B C N O F       | 10  | Ne  |  |  |  |  |
| 3    | Na Mg                                               |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 13                   | Al Si P S Cl Ar | 18  | Ar  |  |  |  |  |
| 4    | K Ca Sc Ti V Cr Mn Fe Co Ni Cu Zn Ga Ge As Se Br Kr |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 19                   | Kr              | 36  | Kr  |  |  |  |  |
| 5    | Rb Sr Y Zr Nb Mo Tc Ru Rh Pd Ag Cd In Sn Sb Te I Xe |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 37                   | Rb              | 54  | Xe  |  |  |  |  |
| 6    | Cs Ba La Ce Pr Nd Pm Sm Eu Gd Tb Dy Ho Er Tm Yb Lu  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 55                   | Cs              | 86  | Rn  |  |  |  |  |
| 7    | Fr Ra Ac Th Pa U Np Pu Am Cm Bk Cf Es Fm Md No Lr   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 87                   | Fr              | 118 | Uuo |  |  |  |  |
| 8    | Uuo                                                 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 119                  | Uuo             | 118 | Uuo |  |  |  |  |

\* Lanthanides  
\*\* Actinides

## 第6回 奇妙な量子の世界

量子効果：波動性と粒子性

量子統計（フェルミ粒子とボース粒子）、超流動・超伝導



# 現代社会と物質：金属の科学と材料としての応用

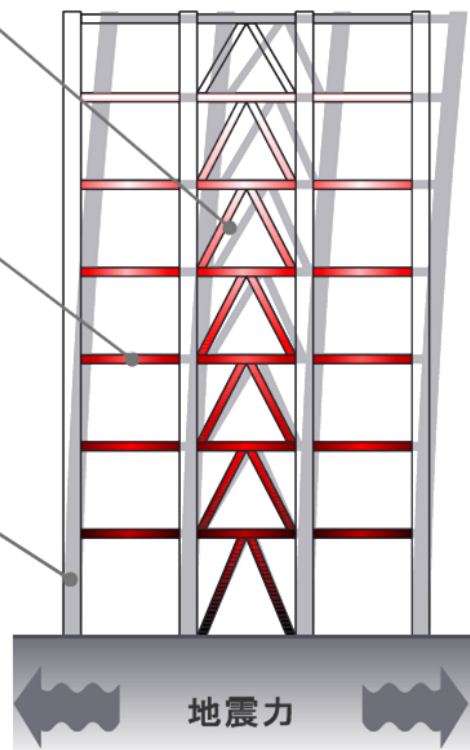
小関敏彦（工学部）

私たちの身の回りの構造体は、鉄鋼材料をはじめとする様々な金属材料からできている。金属の「強さ」「硬さ」「加工のしやすさ」「衝撃的な力に対する破壊のしにくさ」を利用している。金属の理論強度は非常に高い。しかし実用の金属は小さい力で変形することもできる。なぜでしょう？ 金属の強さや変形の基礎的なメカニズムを説明し、それを応用した様々な構造体の例を紹介します。

地震エネルギーを吸収する  
軟らかく高延性の鋼のダンパー

地震エネルギーを吸収しながらも  
破断しない高強度・高延性の鋼の梁

大地震でも曲がったり破断しない  
高強度の鋼の柱



\* 図像提供：新日鐵住金株式会社

地震に強い高層ビルを可能にする色々な鉄鋼材料

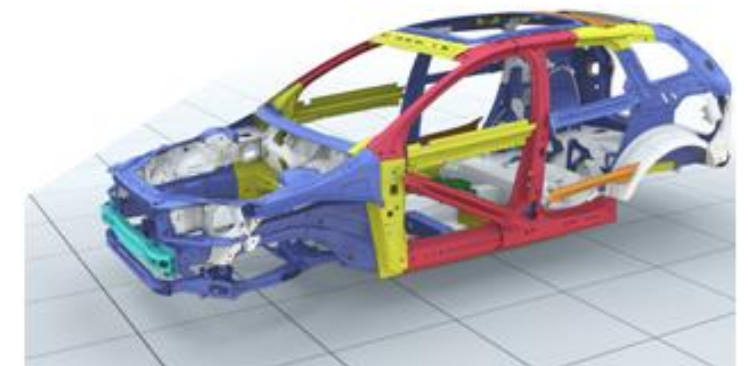


超高速を可能にする  
軽量高強度  
アルミニウムボディ

Adapted from photo by Yosemite,  
from Wikimedia Commons  
CC BY-SA 3.0  
[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:JR-Maglev-MLX01-901\\_001.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:JR-Maglev-MLX01-901_001.jpg)

軽量と衝突安全を  
可能にする様々な  
金属材料のボディ

\* 図像提供：ボルボ・  
カーズ・ジャパン



軽量で高性能、安全な移動体を可能にする  
様々な金属材料

# 現代社会と物質：超分子の科学

## アクアマテリアル：持続性社会実現のための我々の挑戦

相田卓三（工学部）

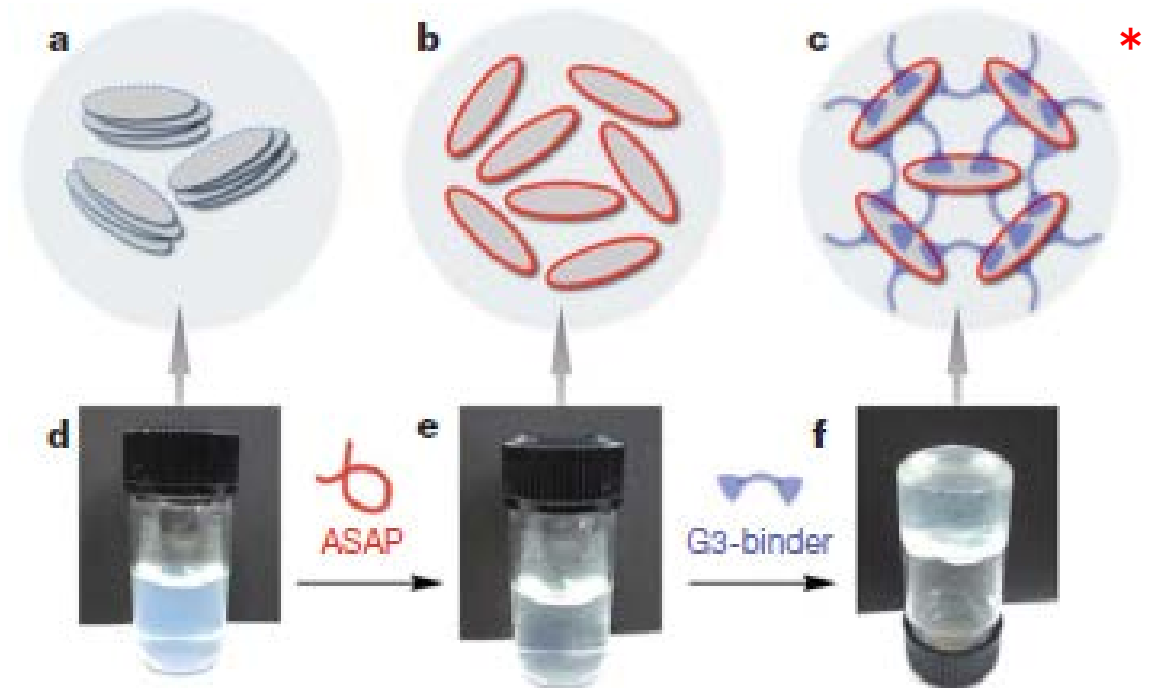
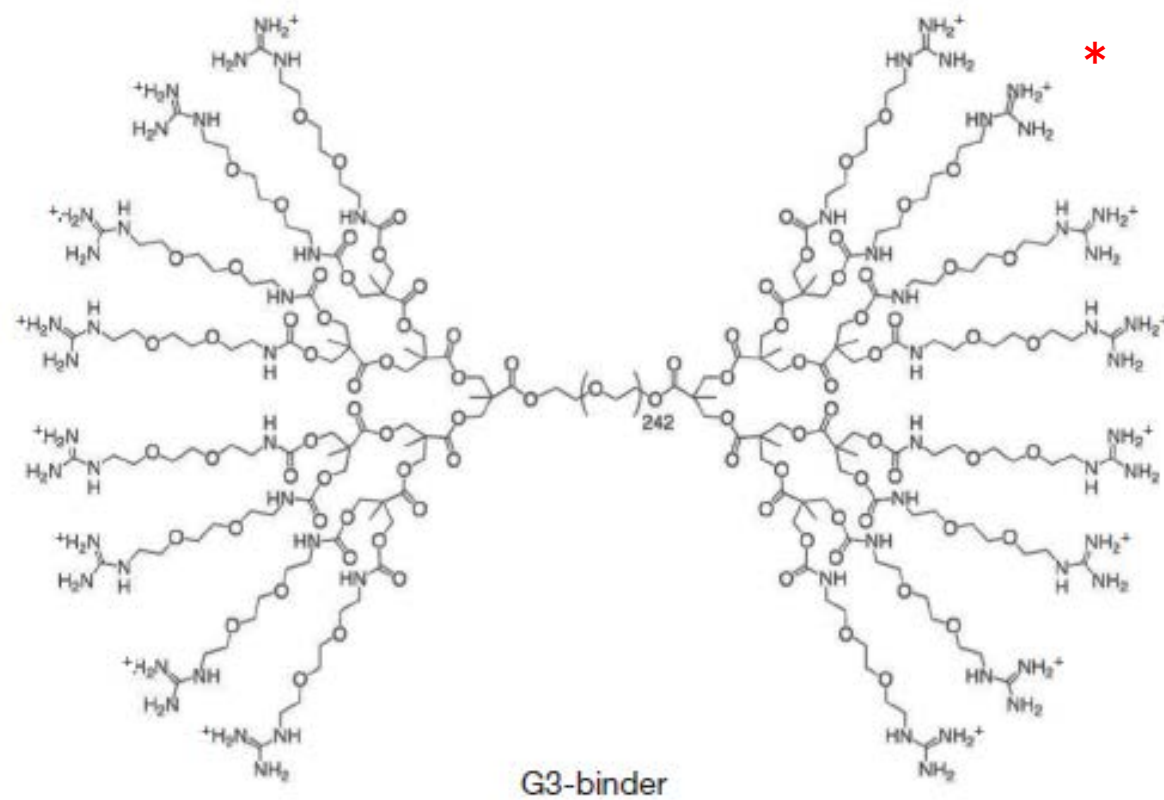


Image Credits: [upper left and right] Q. Wang, T. Aida et al. 2010. Reprinted by permission from Macmillan Publishers Ltd: *Nature*, vol.463 (no.7279):269-392, [upper left] p.340 Fig.1 and [upper right] 2(a-f), copyright 2010; [lower left and right] 相田卓三先生ご提供



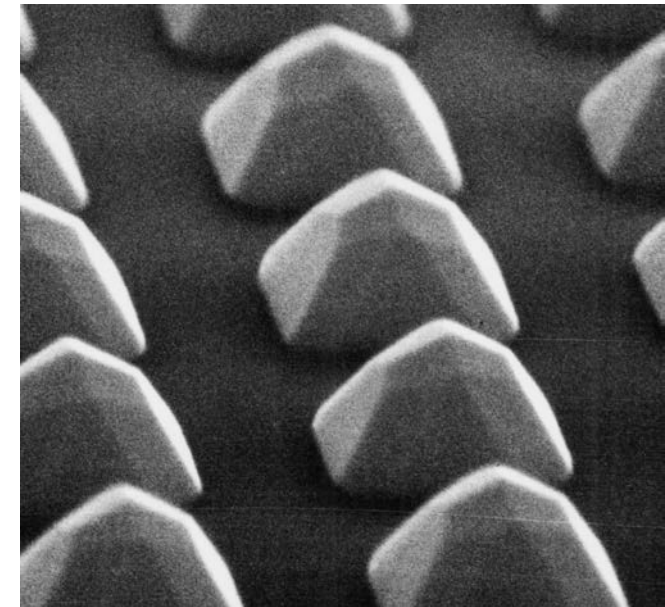
# 現代社会と物質

## 量子ドットがもたらす未来素子の夢

荒川泰彦(生産技術研究所)

### 量子ドットとは

半導体中の電子がド・ブロイ波長程度の領域に閉じ込められると波動性が顕著になる。量子ドットは、10nm程度の3次元立体構造であり、電子を3次元的に閉じ込める。



\* 東京大学 Todai OCW 学術俯瞰講義  
Copyright2013, 荒川 泰彦

### 電子物性の量子制御、光子との相互作用制御

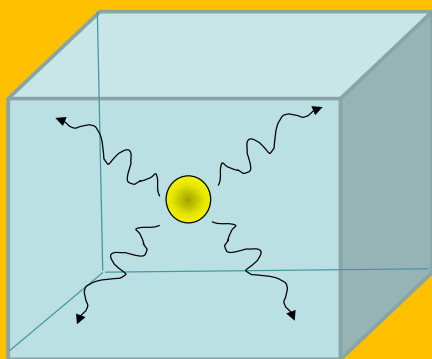
電子の量子化に伴う新しい軌道の生成(人工原子)

スピンを含め個々の電子の性質の制御が可能

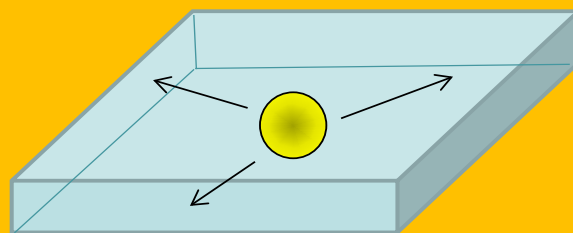
量子ドット中の電子とナノ光共振器中の光子の相互作用制御

### 新型素子への応用(通信、量子コンピューター、エネルギー変換等)

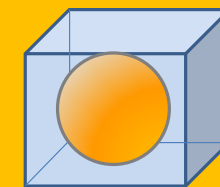
量子ドットレーザー、単一電子トランジスタ、単一光子発生素子、量子もつれ制御素子など量子コンピューター素子、超高効率量子ドット太陽電池



半導体バルク  
(3次元自由電子)



量子井戸  
(2次元自由電子)



1982年に荒川らが提案

量子ドット  
(0次元自由電子)



# 現代社会と物質

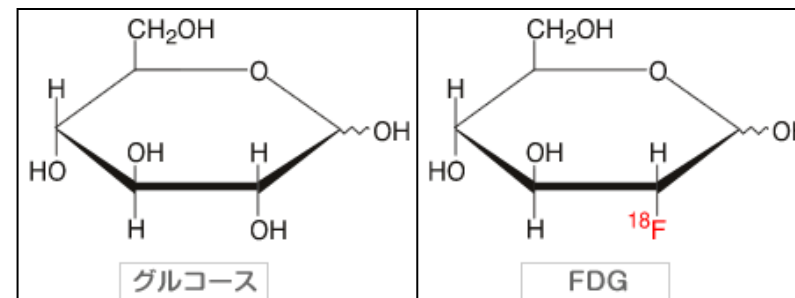
## 放射線と人体：放射線のリスクと防護の科学

飯本武志（環境安全本部）

### 医療分野で必要な放射線計測

- レントゲン検査  
（エックス線撮影検査）
- CTスキャン（CT検査）
- PET検査
- 放射線治療
- カテーテル検査/治療
- 医療機器滅菌/殺菌
- 放射性医薬品  
など

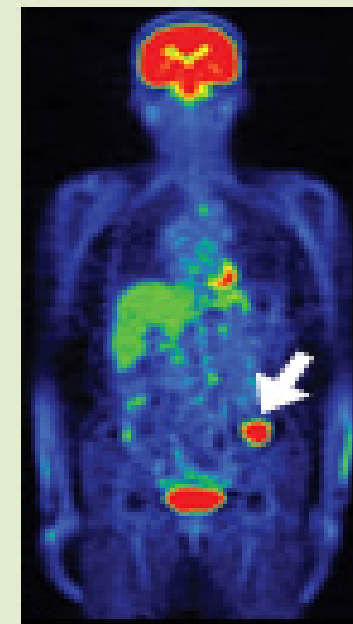
PETとは「陽電子放射断層撮影」という意味で、  
Positron Emission Tomographyの略



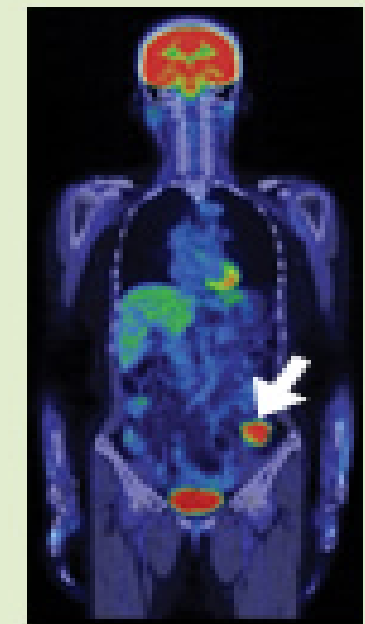
ブドウ糖とよく似た $^{18}\text{F}$ -  
FDGが癌細胞に取り込ま  
れ、陽電子を放出する。

フルデオキシグルコース( $^{18}\text{F}$ )投与後の  
悪性腫瘍診断例

### 大腸がん例



PET画像



PET/CT  
Fusion画像

# 現代社会と物質

## 高分子の科学: チューインガムの物理

土井正男(豊田中央研究所)

物理法則は普遍的であり、チューインガムの中にも、その法則は生きている

- チューインガムはなぜよく伸びるの？
- チューインガムは、なぜくっつくの？
- チューインガムとチョコレートを一緒に食べるとガムがなくなっちゃうのはなぜ？

というような問題を考えながら、チューインガムの中の物理とその応用について語りたい。



Photo by David Haberthür,  
from Wikimedia Commons  
CC BY-SA 2.0  
<http://www.flickr.com/photos/79112147@N00/496069/>

風船ガム



\* 東京大学 Todai OCW 学術俯瞰講義  
Copyright2013, 土井 正男

生ゴム(ガム)



Photo by Bill Ebbesen, from  
Wikimedia Commons CC BY-SA 3.0  
[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rubber\\_bands\\_-\\_Colors\\_-\\_Studio\\_photo\\_2011.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rubber_bands_-_Colors_-_Studio_photo_2011.jpg)

輪ゴム

# 現代社会と物質

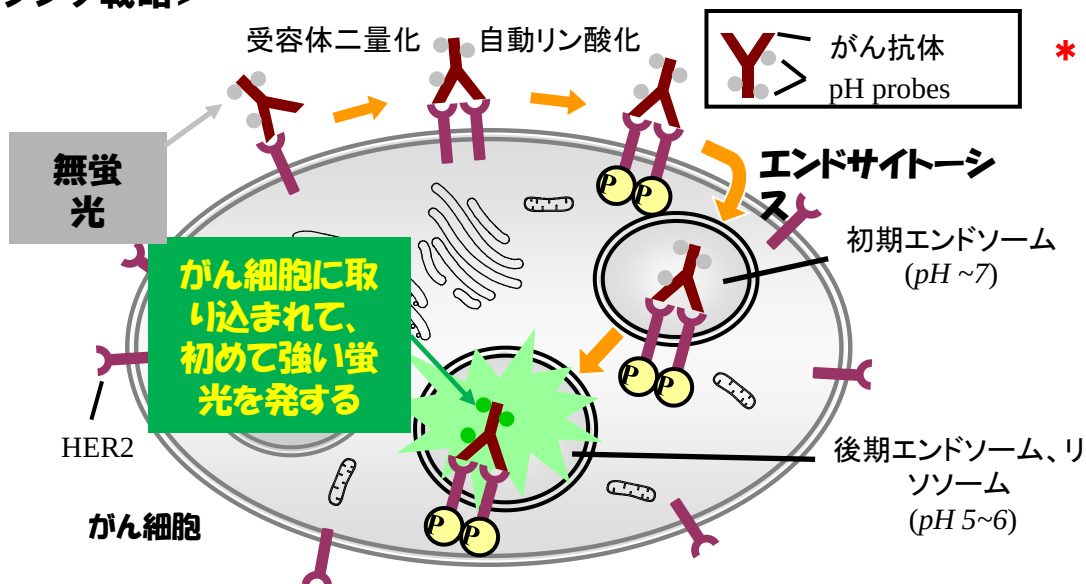
## 光機能性材料の科学—化学に基づく新医療技術の創出

浦野 泰照（医学部）

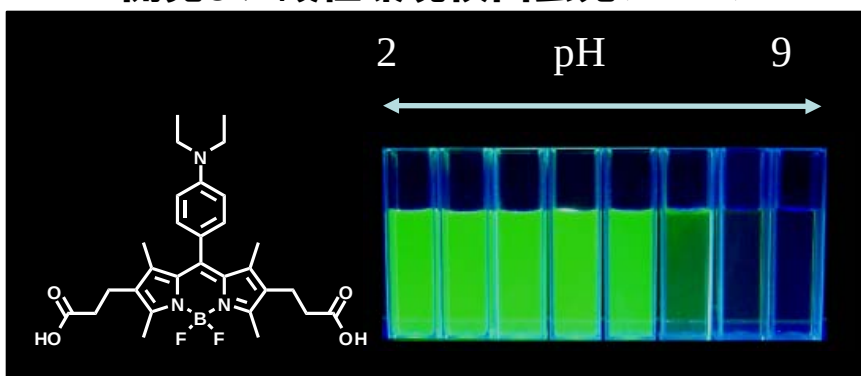
蛍光プローブという「**がん細胞だけを光らせる賢い機能を持つ分子**」を設計・開発すれば、1 mm以下の微小がんであってもこれを取り残さないがん外科手術が可能となる！ → **化学によって医療は格段に進歩する**

### 弱酸性検出蛍光プローブ—がん抗体による微小がんイメージング

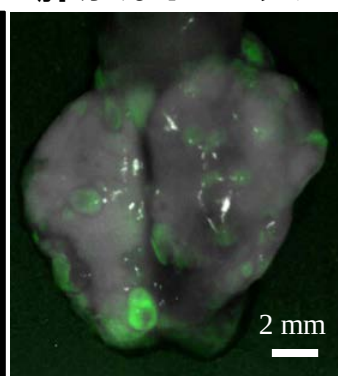
<イメージング戦略>



### 開発した酸性環境検出蛍光プローブ

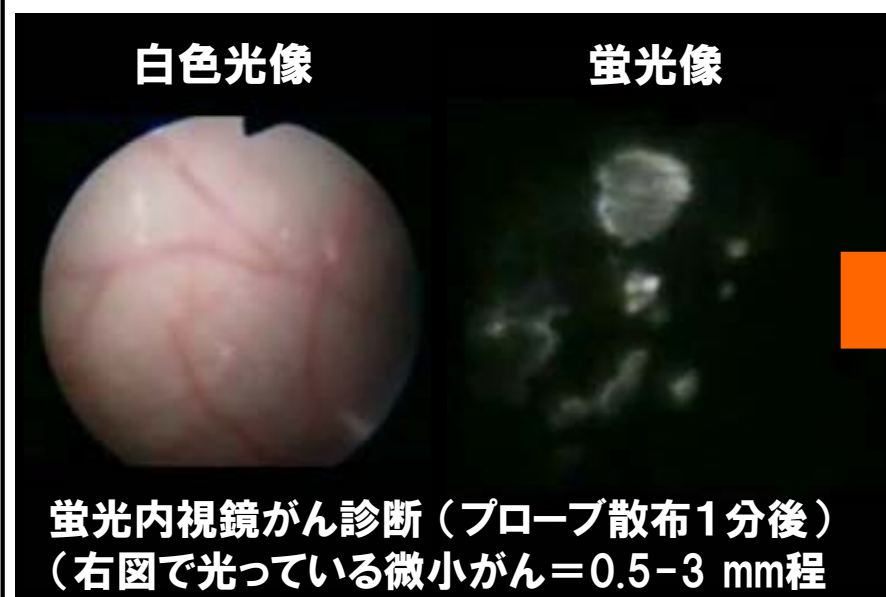
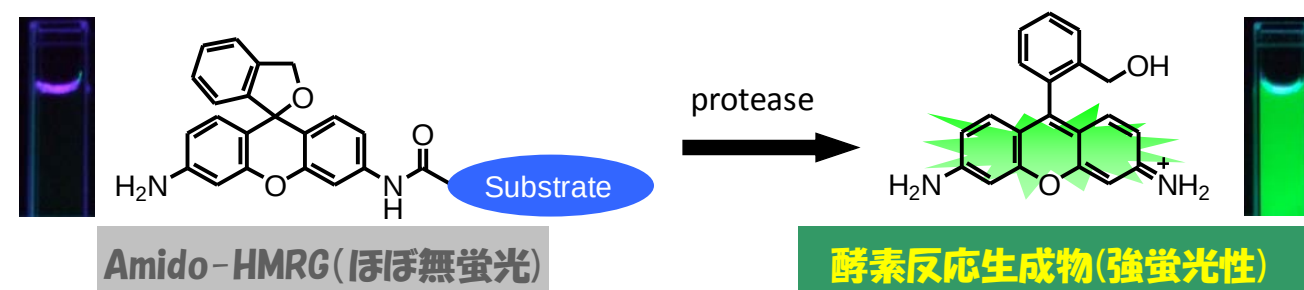


### 肺がんイメージング



Nat. Med. 2009, 15, 104-109.

### がん特異的プロテアーゼ検出蛍光プローブによる迅速がん診断の実現



ヒトがん摘出  
サンプルでの  
前臨床実験  
開始

・東大病院  
・がん研有明  
・九大別府病院  
・信州大学  
・久留米大学

Sci. Transl. Med., 2011, 3, 110ra119.



# 現代社会と物質

## 物質科学が拓く新エネルギーとサステナビリティの未来

瀬川浩司(先端科学技術研究センター)

【概要】20世紀の物質科学の進歩は、人類に豊かで多彩な生活をもたらしてきた。しかしながら21世紀に入った今、われわれはそのスタイルに限界を感じ始めている。これからの物質科学はどのような方向に進むのだろうか。

本講義では新エネルギーとサステナビリティに焦点を当て、これにチャレンジする物質科学のトピックスを紹介する。

### ●再生可能エネルギー電力への貢献 太陽光発電による持続的なエネルギー



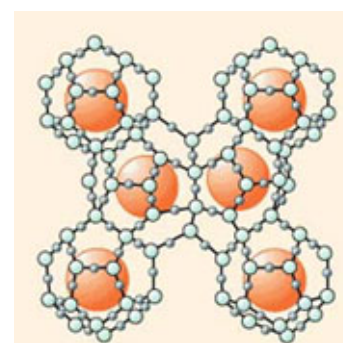
\* 画像提供: アイシン精機株式会社



\* 画像提供: ソニー株式会社



### ●新しい資源の発見と低炭素化技術



メタンハイドレートの分子構造  
●はメタン分子、○は酸素原子、  
●は水素原子を表す。

奥田義久(1997)  
「メタンハイドレート特集にあたって」  
『地質ニュース』  
第510号、6-11、  
p.6 図1。CC BY



\* USGS/Photo  
by J. Pinkston  
and L. Stern

### ●スマートなライフスタイルの実現に向けた物質科学の貢献