

# 学術俯瞰講義

## 2. 物質の生い立ち —素粒子、原子、宇宙—

理学系研究科物理学専攻  
ビッグバン宇宙国際研究センター  
佐藤 勝彦

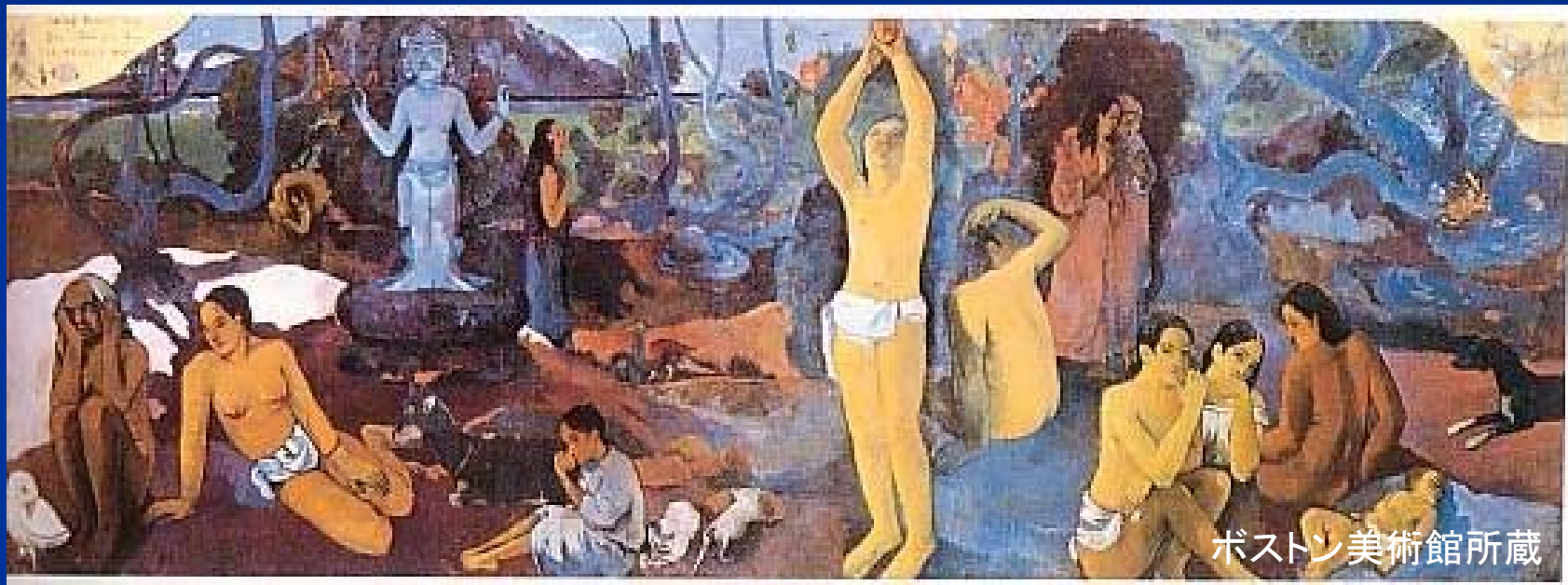
「※:このマークが付してある著作物は、第三者が有する著作物ですので、同著作物の再使用、同著作物の二次的著作物の創作等については、著作権者より直接使用許諾を得る必要があります。」

# はじめに

- 人類は自分の住んでいる世界がどのようなものなのか常に探求してきた。
- この知的好奇心により、世界を知り自然選択の中で強者として生き残った。
- ヒトは、虚弱な体にもかかわらず、おおきな脳を持つことで生き抜く戦略を選んだ。
- 20世紀になって極微の素粒子の世界から、極大の宇宙の果てまで世界の構造を知った。また、未完ではあるが、世界がどのように運動変化する法則を知った。

# 世界を知ることとは自らを知ることでもある。

「われら何処より来りしや」、「われら何者なるや」、「われら何処に去らんとするや」 「ゴーギャンの晩年の品」



- 我々は、物質世界、宇宙の中で  
自らが何者であるかを知っている。
- 人はこの宇宙の中でもっともすばらしい存在。

# 宇宙：物質世界での人間の位置

- ビッグバン宇宙開闢の瞬間に作られた水素と、星、超新星爆発で合成されたCNO等元素で我々の体は作られている。
- 宇宙の進化(構造形成)が進むなかで、銀河系、太陽、地球、生命、ヒトが生まれた。
- 生命も物質の運動形態。生物の進化も物質進化の姿。脳も化学反応・電磁法則にしたがって運動。
- 人の心も進化で決まった(進化心理学)。しかし、物理法則に従う物質である脳が自由意志を持つのか未解明。

客観的に自己を知ることは人生の指針ともなる。

## 2. 物質の生い立ち —素粒子、原子、宇宙—

- 講義1 私たちは物質世界をどのように認識してきたか —物質の階層構造—
- 講義2 物質世界はどのように運動するのか —物理法則—
- 講義3 時空 —物質の演舞の舞台—  
時空と物質は一体となって運動し世界の構造を決めている
- 講義4 宇宙の創生、進化  
—統一的自然観をめざして—

# 私たちは物質世界をどのように認識してきたか —物質の階層構造—

- 歴史
- 物質世界の階層構造
- 原子核の世界とその生い立ち
- 素粒子の世界とその生い立ち
- 暗黒物質・暗黒エネルギー
- 階層構造の極限、果ては？

# 歴史：物質世界をどのように認識してきたか

人間自らのスケール、身近な世界から次第に認識を拡大。

## ■ 肉眼で見ることのできる世界

小さい世界：昆虫、砂粒、土、..

大きな世界：大型動物、山、海、大陸、地球、..

## ■ 道具を使って見る世界

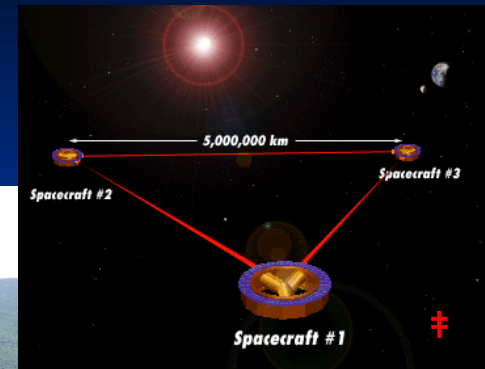
小さな世界：顕微鏡、電子顕微鏡、加速器、**宇宙膨張**

大きな世界：望遠鏡

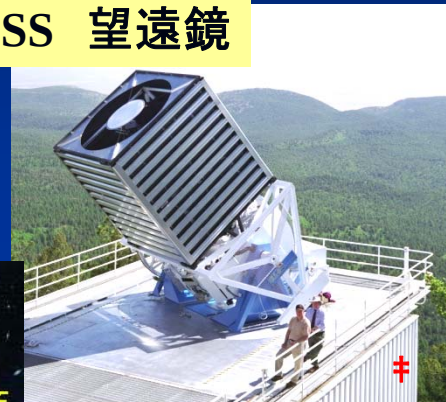
可視光だけでなく、電波からガンマ線にいたる  
電磁波の全波長、粒子線、ニュートリノ、重力波..

# 望遠鏡：深く、広く、多波長、 粒子線、ニュートリノ・重力波へ

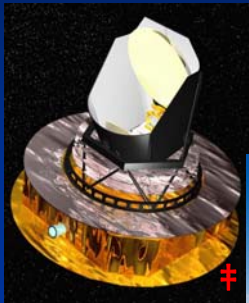
LISA



SDSS 望遠鏡



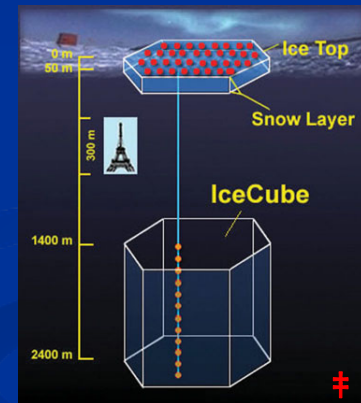
PLANCK (2009)



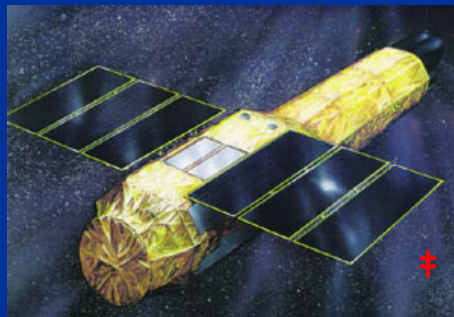
ALMA



Astro-F (IRIS)



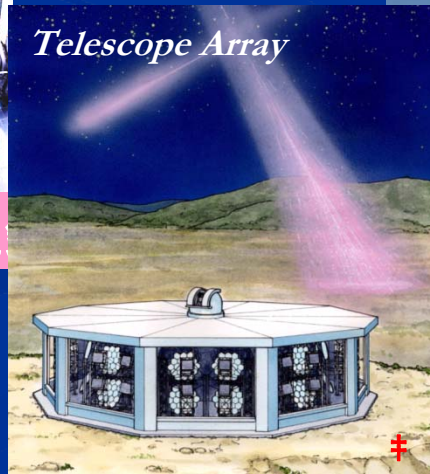
カンガルー望遠鏡



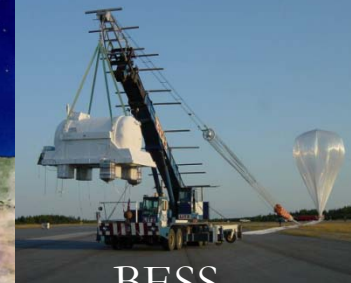
astroEII



すばる望遠



Telescope Array

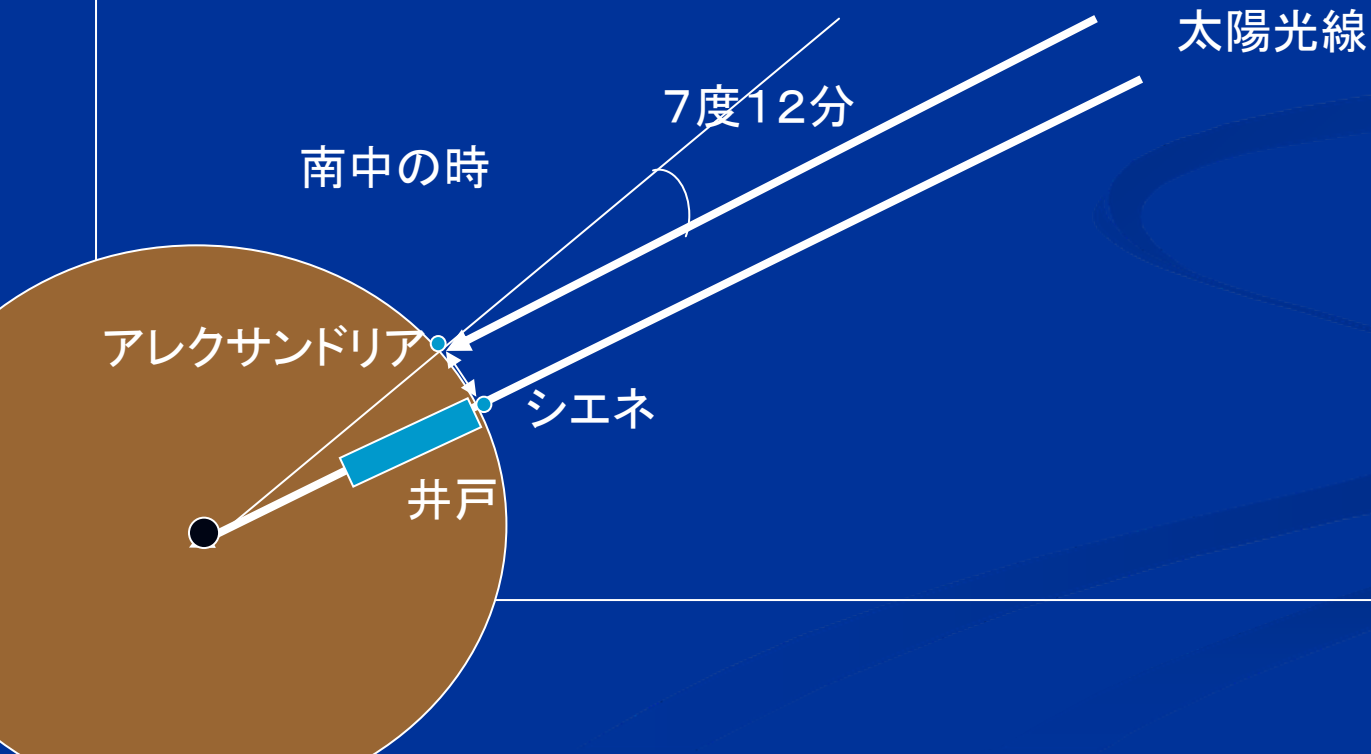


BESS

# マクロの世界

## ■ 地球 6,000km

エラステネス(紀元前276年ころ～196年ころ) 7400km



# マクロの世界

アリストテレスの体系

- 地球 6,000km

エラステネス(紀元前276年ころ~196年ころ) 7400km

- 太陽系 5.5光時間 (冥王星までの距離)

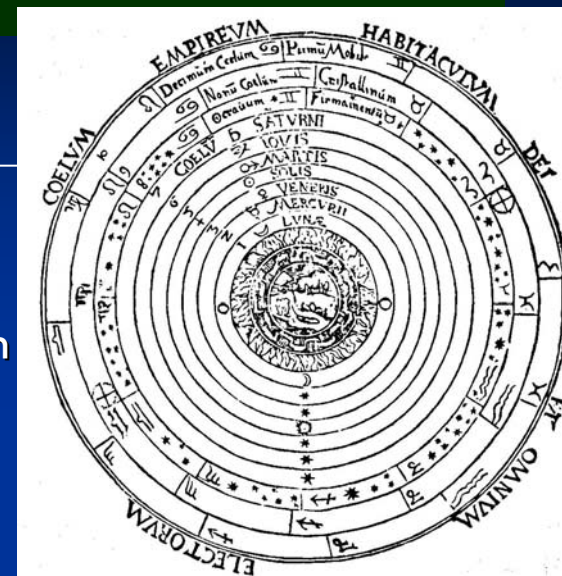
アリストテレスAristoteles 前384年 - 前322年

- 銀河系 (天の川銀河) 半径 5万光年

W. ハーシェル(18世紀)、カプシュタイン(1915)

- 超銀河団、グレイトウォール 数億光年

- 観測的宇宙の果て 百数十億光年



# 宇宙のなりたち、階層構造

SDSSプロジェクト、COBE/DIRBE  
/TNPJP/nineplanets/、須藤氏提供

太陽系

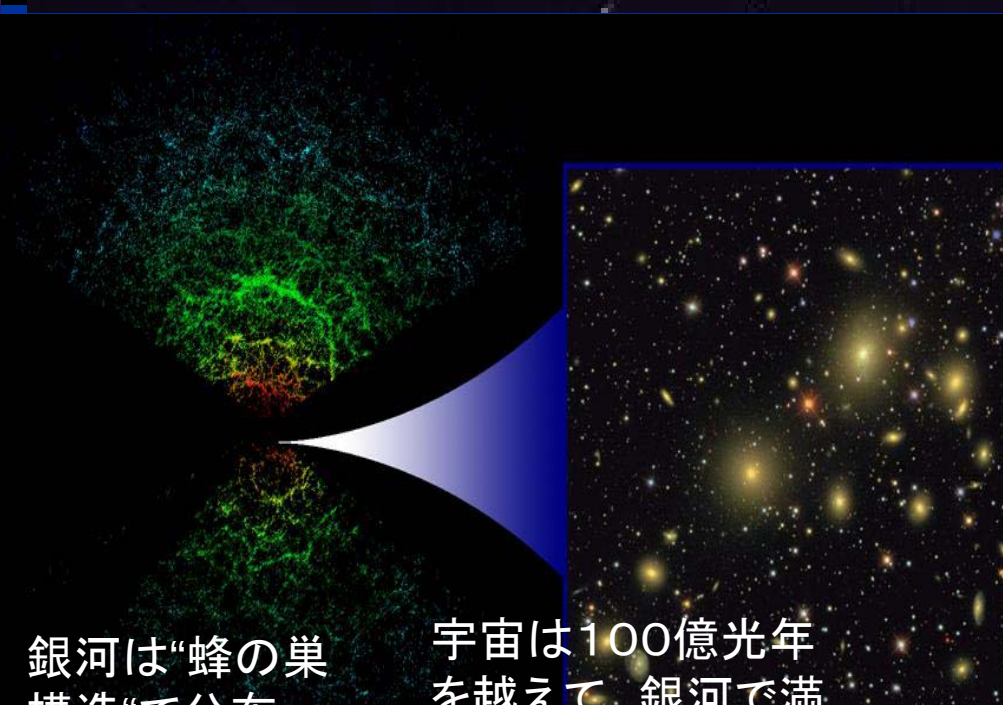
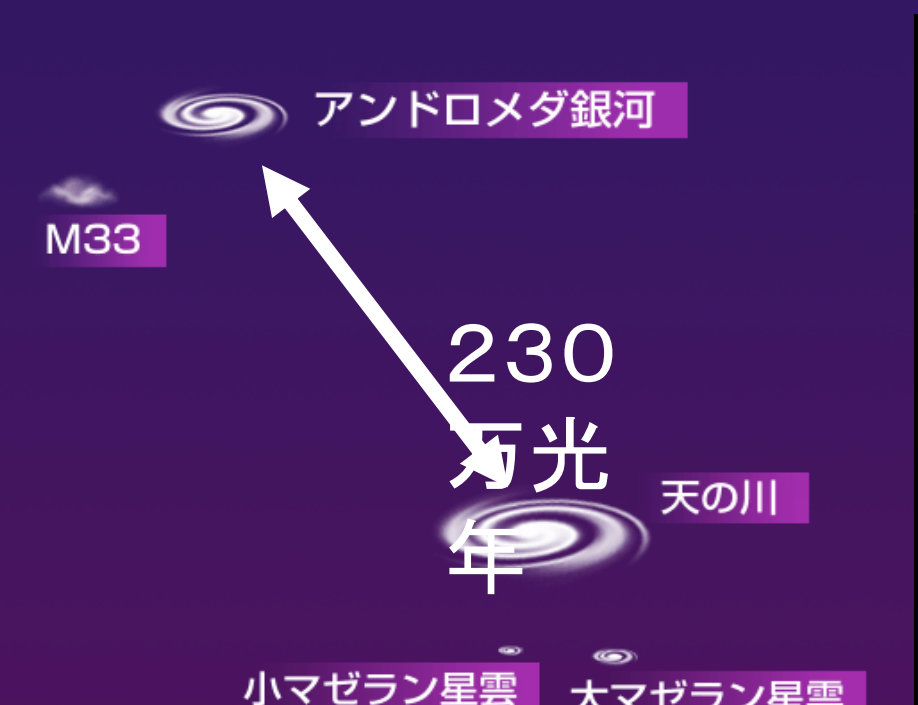
宇宙には一千億個の星の集まりである無数の銀河で成りたっている。



出典: <http://www.solarviews.com/eng/homepage.htm>

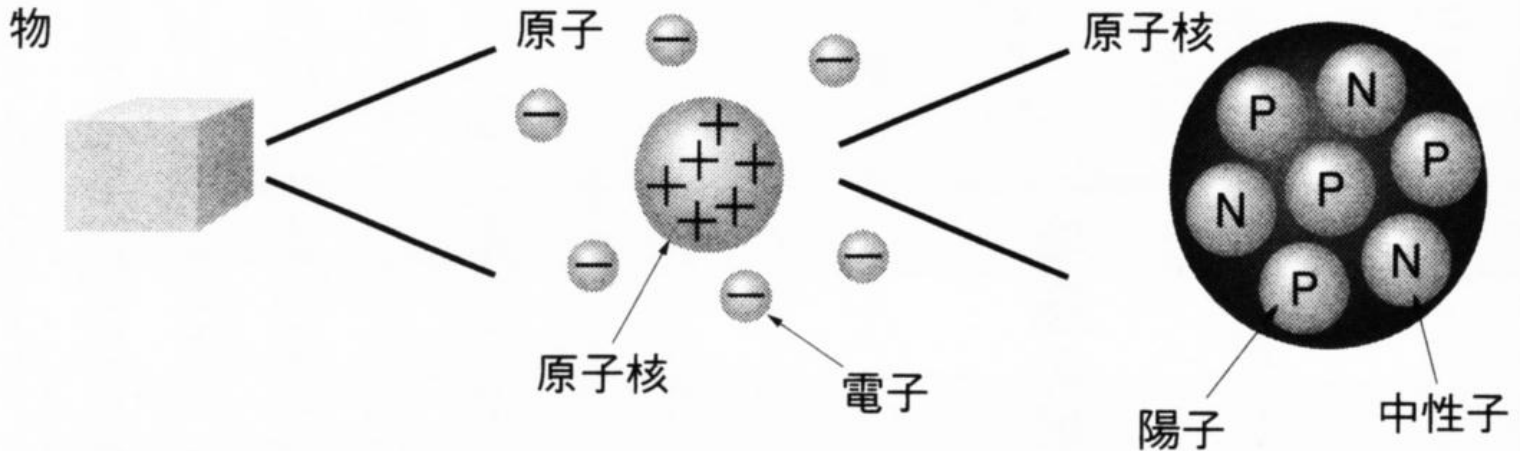


出典: <http://www.solarviews.com/cap/ds/milkyway.htm>

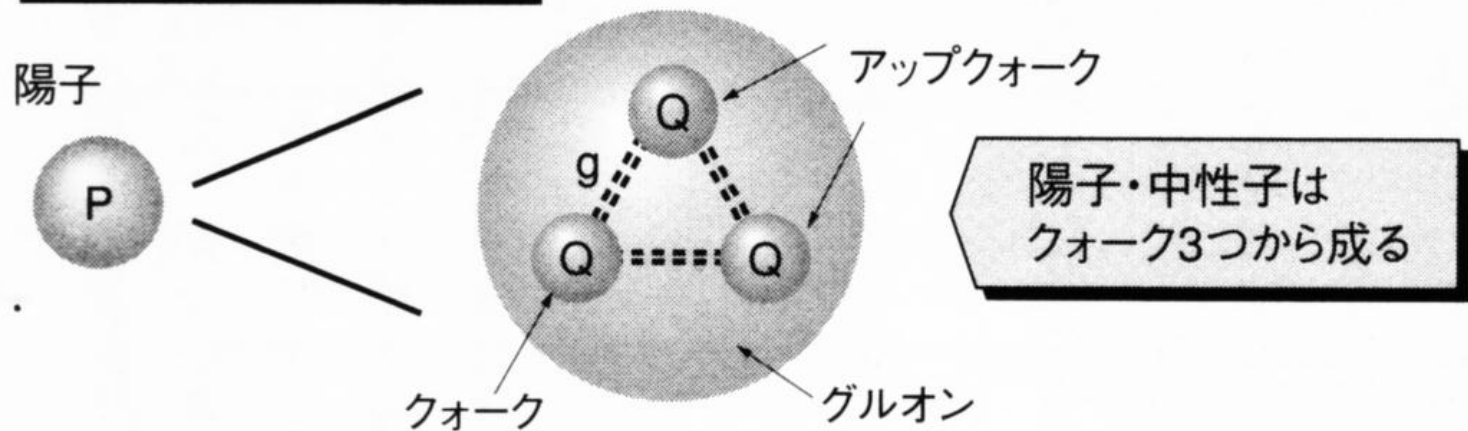


# ミクロの世界

ものを細かく分けて見ると



さらに細かく見ると



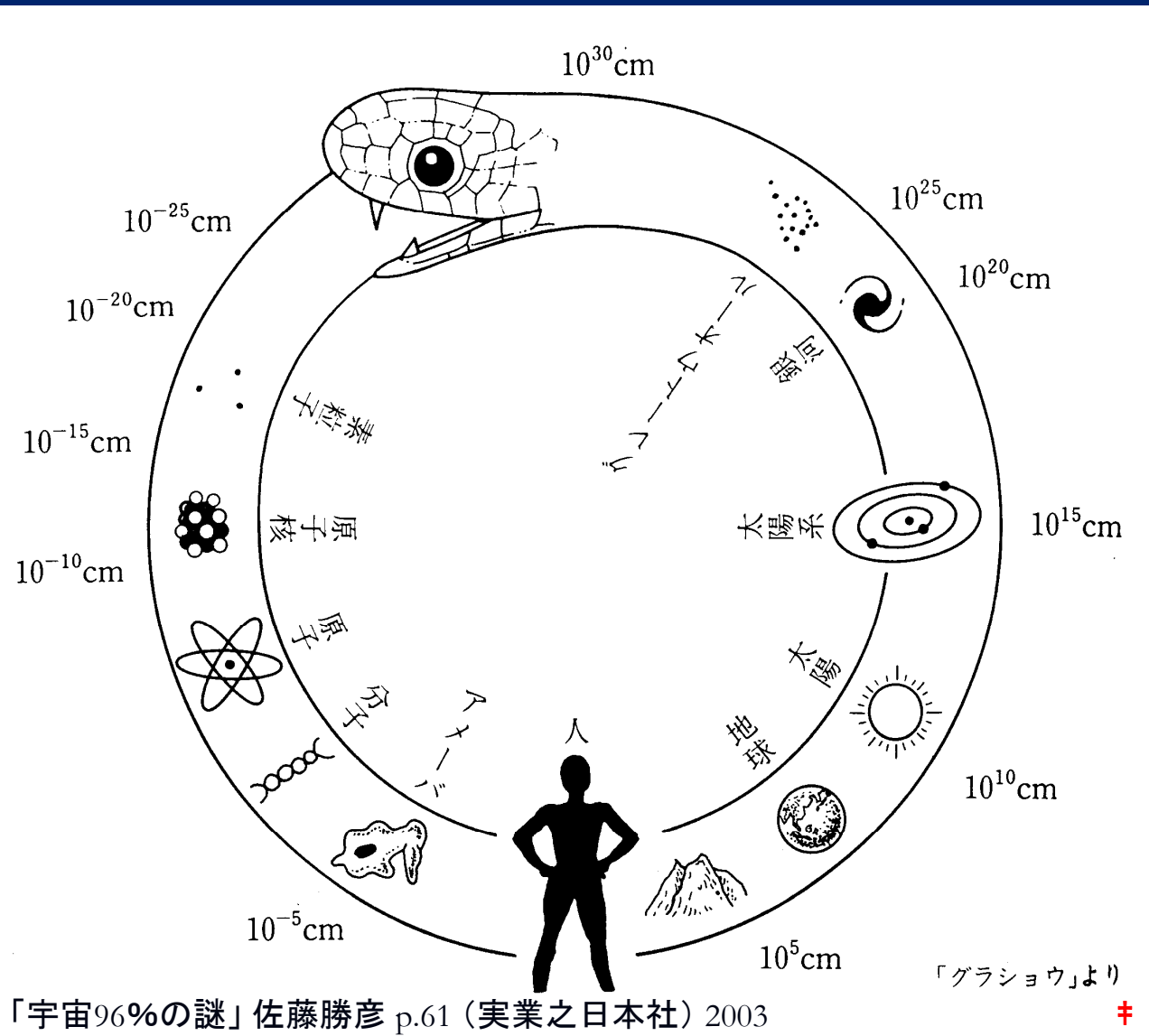
# ミクロの世界

KEK



- 微生物の世界  $\sim 100$  ナノメートル  
光学顕微鏡 レーベンフック A. leeuwenhoek (1632-1723)  
単眼鏡で微生物の世界発見
- 分子・原子の世界  $\geq 0.3$  ナノメートル  
電子顕微鏡の発明。マックス・クノール、エルンスト・ルスカ (1931年)  
最近 は 走査型透過電子顕微鏡 (STEM)
- 原子核・素粒子の世界  $\leq 10^{-14}$  メータ 加速器  
ローレンス (1930) サイクロトロン の 発明
- プランク長さ  $(G\hbar/c^3)^{1/2}$  (理論的研究で)  $\sim 10^{-36}$  メータ  
空間の最小単位: 空間が量子的に揺らいでいる (BH, WH の 生成消滅)  
プランク定数  $\hbar$  光速  $c$  重力定数  $G$

20世紀、人間は自らの大きさを基準としてミクロ世界からマクロの世界まで60桁の範囲で世界の構造を知った。



# 究極の物質の最小単位をもとめて

## ギリシャ文明の原子論

- ターレス（BC624-547）  
水は万物の根源
- エンペドクレス（BC493-433）  
4元素（火、水、土、空気）で物質世界は構成される。
- デモクリトス（BC 460 - 370）  
すべての物質は不可分な「原子」から構成されている。

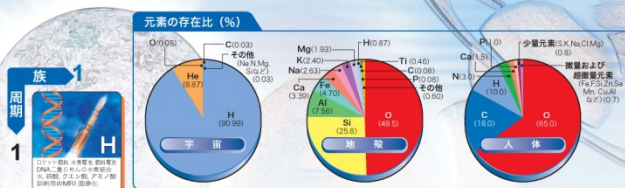
現在：身の回りの物質は 元素からできている。 物質の基本的構成要素

# 元素周期表

Periodic Table of the Elements



メンデレーエフ (Dmitri Ivanovich Mendeleev, 1834 - 1907)  
1869年、ロシアのペテルスブルグ大学の化学者メンデレーエフは、当時知られていた63種類の元素を(1)原子量の順に並び、(2)性質や塩素と類似してできる物質の組成(たとえば、ナトリウムはNaCl、マグネシウムはMgOと考える)などの性質や規則性から推定する法則「周期律」を見いだした。性質が似た元素が並びにくるよう配列した周期表をつづった。その表のなかに空欄があり、当時知られていなかった元素の性質を予測した。初めはメンデレーエフの周期表は注目されなかったが、1875年にガリウムが、1886年にゲルマニウムが発見され、それらの性質が彼の予測のとおりであったため、世界的に信頼された。現在では周期表は、すべての人が用いる化学や物理学の基本となっている。



|                                    |                                 |                                |                                   |                                  |                                  |                                  |                                 |                                    |                                  |
|------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|
| 1<br>H<br>1.008<br>Hydrogen        | 2<br>He<br>4.003<br>Helium      | 3<br>Li<br>6.941<br>Lithium    | 4<br>Be<br>9.012<br>Beryllium     | 5<br>B<br>10.811<br>Boron        | 6<br>C<br>12.011<br>Carbon       | 7<br>N<br>14.007<br>Nitrogen     | 8<br>O<br>15.999<br>Oxygen      | 9<br>F<br>18.998<br>Fluorine       | 10<br>Ne<br>20.180<br>Neon       |
| 11<br>Na<br>22.990<br>Sodium       | 12<br>Mg<br>24.305<br>Magnesium | 13<br>Al<br>26.982<br>Aluminum | 14<br>Si<br>28.086<br>Silicon     | 15<br>P<br>30.974<br>Phosphorus  | 16<br>S<br>32.065<br>Sulfur      | 17<br>Cl<br>35.453<br>Chlorine   | 18<br>Ar<br>39.948<br>Argon     | 19<br>K<br>39.098<br>Potassium     | 20<br>Ca<br>40.078<br>Calcium    |
| 21<br>Sc<br>44.956<br>Scandium     | 22<br>Ti<br>47.883<br>Titanium  | 23<br>V<br>50.942<br>Vanadium  | 24<br>Cr<br>51.996<br>Chromium    | 25<br>Mn<br>54.938<br>Manganese  | 26<br>Fe<br>55.845<br>Iron       | 27<br>Co<br>58.933<br>Cobalt     | 28<br>Ni<br>58.693<br>Nickel    | 29<br>Cu<br>63.546<br>Copper       | 30<br>Zn<br>65.38<br>Zinc        |
| 31<br>Ga<br>69.723<br>Gallium      | 32<br>Ge<br>72.630<br>Germanium | 33<br>As<br>74.922<br>Arsenic  | 34<br>Se<br>78.96<br>Selenium     | 35<br>Br<br>79.904<br>Bromine    | 36<br>Kr<br>83.80<br>Krypton     | 37<br>Rb<br>85.468<br>Rubidium   | 38<br>Sr<br>87.62<br>Strontium  | 39<br>Y<br>88.906<br>Yttrium       | 40<br>Zr<br>91.224<br>Zirconium  |
| 41<br>Nb<br>92.906<br>Niobium      | 42<br>Mo<br>95.94<br>Molybdenum | 43<br>Tc<br>98<br>Technetium   | 44<br>Ru<br>101.07<br>Ruthenium   | 45<br>Rh<br>102.91<br>Rhodium    | 46<br>Pd<br>106.42<br>Palladium  | 47<br>Ag<br>107.87<br>Silver     | 48<br>Cd<br>112.41<br>Cadmium   | 49<br>In<br>114.82<br>Indium       | 50<br>Sn<br>118.71<br>Tin        |
| 51<br>Sb<br>121.76<br>Antimony     | 52<br>Te<br>127.6<br>Tellurium  | 53<br>I<br>126.90<br>Iodine    | 54<br>Xe<br>131.3<br>Xenon        | 55<br>Cs<br>132.91<br>Cesium     | 56<br>Ba<br>137.33<br>Barium     | 57<br>La<br>138.90<br>Lanthanum  | 58<br>Ce<br>140.12<br>Cerium    | 59<br>Pr<br>140.91<br>Praseodymium | 60<br>Nd<br>144.24<br>Neodymium  |
| 61<br>Pm<br>145<br>Promethium      | 62<br>Sm<br>150.36<br>Samarium  | 63<br>Eu<br>151.96<br>Europium | 64<br>Gd<br>157.25<br>Gadolinium  | 65<br>Tb<br>158.93<br>Terbium    | 66<br>Dy<br>162.50<br>Dysprosium | 67<br>Ho<br>164.93<br>Holmium    | 68<br>Er<br>167.26<br>Erbium    | 69<br>Tm<br>168.93<br>Thulium      | 70<br>Yb<br>173.05<br>Ytterbium  |
| 71<br>Lu<br>174.97<br>Lutetium     | 72<br>Hf<br>178.49<br>Hafnium   | 73<br>Ta<br>180.95<br>Tantalum | 74<br>W<br>183.84<br>Tungsten     | 75<br>Re<br>186.21<br>Rhenium    | 76<br>Os<br>190.23<br>Osmium     | 77<br>Ir<br>192.22<br>Iridium    | 78<br>Pt<br>195.08<br>Platinum  | 79<br>Au<br>196.97<br>Gold         | 80<br>Hg<br>200.59<br>Mercury    |
| 81<br>Tl<br>204.38<br>Thallium     | 82<br>Pb<br>207.2<br>Lead       | 83<br>Bi<br>208.98<br>Bismuth  | 84<br>Po<br>209<br>Polonium       | 85<br>At<br>210<br>Astatine      | 86<br>Rn<br>222<br>Radon         | 87<br>Fr<br>223<br>Francium      | 88<br>Ra<br>226<br>Radium       | 89<br>Ac<br>227<br>Actinium        | 90<br>Th<br>232.04<br>Thorium    |
| 91<br>Pa<br>231.04<br>Protactinium | 92<br>U<br>238.03<br>Uranium    | 93<br>Np<br>237<br>Neptunium   | 94<br>Pu<br>244<br>Plutonium      | 95<br>Am<br>243<br>Americium     | 96<br>Cm<br>247<br>Curium        | 97<br>Bk<br>247<br>Berkelium     | 98<br>Cf<br>251<br>Californium  | 99<br>Es<br>252<br>Einsteinium     | 100<br>Fm<br>257<br>Fermium      |
| 101<br>Md<br>258<br>Mendelevium    | 102<br>No<br>259<br>Nobelium    | 103<br>Lr<br>262<br>Lawrencium | 104<br>Rf<br>261<br>Rutherfordium | 105<br>Db<br>262<br>Dubnium      | 106<br>Sg<br>266<br>Seaborgium   | 107<br>Bh<br>264<br>Bohrium      | 108<br>Hs<br>277<br>Hassium     | 109<br>Mt<br>268<br>Meitnerium     | 110<br>Ds<br>271<br>Darmstadtium |
| 111<br>Rg<br>272<br>Roentgenium    | 112<br>Uue<br>285<br>Ununbium   | 113<br>Uuh<br>288<br>Ununtrium | 114<br>Uuq<br>294<br>Ununquadium  | 115<br>Uup<br>289<br>Ununpentium | 116<br>Uub<br>288<br>Ununhexium  | 117<br>Uus<br>294<br>Ununseptium | 118<br>Uuo<br>294<br>Ununoctium | 119<br>Uut<br>294<br>Ununtrium     | 120<br>Uuq<br>294<br>Ununquadium |

※ここに示した原子量は、各元素の詳しい原子量の値を有効数字4桁に四捨五入してつくられたもので、IUPAC原子量委員会が承認されたものである。  
安定同位体がなく、同位体の天然存在比が一定しない元素はその元素の代表的な同位体の質量数を( )の中に示している。  
※元素名のうち、AlはAluminium, CsはCaesiumと表記することもある。  
※半減期は同位体のうち最も長いものを示してある。

※ここに示した原子量は、各元素の詳しい原子量の値を有効数字4桁に四捨五入してつくられたもので、IUPAC原子量委員会が承認されたものである。  
安定同位体がなく、同位体の天然存在比が一定しない元素はその元素の代表的な同位体の質量数を( )の中に示している。  
※元素名のうち、AlはAluminium, CsはCaesiumと表記することもある。  
※半減期は同位体のうち最も長いものを示してある。

一家に1枚周期表

科学技術週間  
http://stw.mext.go.jp/  
製作・著作：文部科学省  
企画・制作：株式会社化学同人  
2005年3月25日 第1版発行

●監修：日本化学会、日本物理学会、日本薬学会、  
●企画協力：玉尾皓平(京都大学化学研究所)、桜井  
●制作協力：高野幹夫、横尾俊信、金光義彦、小野  
大学、高尾正敏(松下電器産業株式会社)、壬生  
●イラストレーター：山崎 猛

文部科学省  
本表は、文部科学省、産業技術総合研究所 計算機化学センター、三洋ソーラーエナジシステム株式会社、ソーニャ株式会社、東洋マテリアル・テクノロジ  
株式会社、丸善出版株式会社、理化学研究所、Wacker-Chemie GmbH  
in Emley, "Nature's Building Blocks: An A-Z Guide to the Elements," Oxford University Press (2001); 山崎 実氏, 「元素の百科事典」,  
Oxford University Press (2002); 4) 奥田大輔, 「元素の事典」, 朝倉書店 (1994); 5) 奥田大輔, 「元素の事典」, 朝倉書店 (1994); 6) Mary  
Fleming (1988-1990), 7) 丸山 大輔, 「化学の基本」, 丸山 大輔 (1998), 8) 村上 隆夫, 「元素の事典」, 丸山 大輔 (2004).

| 周期 | 1 族                |                     |                    |                     |                    |                      |                    |                    |                     |                       |                      |                   |                    |                    |                   |                   | 18                |                   |
|----|--------------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|----------------------|--------------------|--------------------|---------------------|-----------------------|----------------------|-------------------|--------------------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 1  | 1<br>水素<br>H       |                     |                    |                     |                    |                      |                    |                    |                     |                       |                      |                   |                    |                    |                   | 2<br>ヘリウム<br>He   |                   |                   |
| 2  | 3<br>リチウム<br>Li    | 4<br>ベリリウム<br>Be    |                    |                     |                    |                      |                    |                    |                     |                       |                      |                   | 5<br>ホウ素<br>B      | 6<br>炭素<br>C       | 7<br>窒素<br>N      | 8<br>酸素<br>O      | 9<br>フッ素<br>F     | 10<br>ネオン<br>Ne   |
| 3  | 11<br>ナトリウム<br>Na  | 12<br>マグネシウム<br>Mg  | 3                  | 4                   | 5                  | 6                    | 7                  | 8                  | 9                   | 10                    | 11                   | 12                | 13<br>アルミニウム<br>Al | 14<br>ケイ素<br>Si    | 15<br>リン<br>P     | 16<br>硫黄<br>S     | 17<br>塩素<br>Cl    | 18<br>アルゴン<br>Ar  |
| 4  | 19<br>カリウム<br>K    | 20<br>カルシウム<br>Ca   | 21<br>スカンジウム<br>Sc | 22<br>チタン<br>Ti     | 23<br>バナジウム<br>V   | 24<br>クロム<br>Cr      | 25<br>マンガン<br>Mn   | 26<br>鉄<br>Fe      | 27<br>コバルト<br>Co    | 28<br>ニッケル<br>Ni      | 29<br>銅<br>Cu        | 30<br>亜鉛<br>Zn    | 31<br>ガリウム<br>Ga   | 32<br>ゲルマニウム<br>Ge | 33<br>ヒ素<br>As    | 34<br>セレン<br>Se   | 35<br>臭素<br>Br    | 36<br>クリプトン<br>Kr |
| 5  | 37<br>ルビジウム<br>Rb  | 38<br>ストロンチウム<br>Sr | 39<br>イットリウム<br>Y  | 40<br>ジルコニウム<br>Zr  | 41<br>ニオブ<br>Nb    | 42<br>モリブデン<br>Mo    | 43<br>テクネチウム<br>Tc | 44<br>ルテチウム<br>Ru  | 45<br>ロジウム<br>Rh    | 46<br>パラジウム<br>Pd     | 47<br>銀<br>Ag        | 48<br>カドミウム<br>Cd | 49<br>インジウム<br>In  | 50<br>スズ<br>Sn     | 51<br>アンチモン<br>Sb | 52<br>テルル<br>Te   | 53<br>ヨウ素<br>I    | 54<br>キセノン<br>Xe  |
| 6  | 55<br>セシウム<br>Cs   | 56<br>バリウム<br>Ba    | 57~71<br>ランタノイド    | 72<br>ハフニウム<br>Hf   | 73<br>タンタル<br>Ta   | 74<br>タングステン<br>W    | 75<br>レニウム<br>Re   | 76<br>オスミウム<br>Os  | 77<br>イリジウム<br>Ir   | 78<br>白金<br>Pt        | 79<br>金<br>Au        | 80<br>水銀<br>Hg    | 81<br>タリウム<br>Tl   | 82<br>鉛<br>Pb      | 83<br>ビスマス<br>Bi  | 84<br>ポロニウム<br>Po | 85<br>アスタチン<br>At | 86<br>ラドン<br>Rn   |
| 7  | 87<br>フランシウム<br>Fr | 88<br>ラジウム<br>Ra    | 89~103<br>アクチノイド   | 104<br>ラザフォード<br>Rf | 105<br>ドブニウム<br>Db | 106<br>シーボーギウム<br>Sg | 107<br>ボヘリウム<br>Bh | 108<br>ハッシウム<br>Hs | 109<br>マイトナウム<br>Mt | 110<br>ダームスタチウム<br>Ds | 111<br>レントゲニウム<br>Rg | 112<br>(GSI)      | 113                | 114                | 115               | 116               | 117               | 118               |

: ヒトに必要な常量の元素

: ヒトに必要な微量の元素

: ヒトにたぶん必須である元素



: ヒトに必要な常量の元素



: ヒトに必要な微量の元素

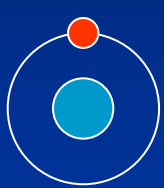


: ヒトにたぶん必須である元素

|                  |                    |                  |                       |                  |                    |                    |                    |                    |                    |                     |                      |                     |                      |                     |                      |
|------------------|--------------------|------------------|-----------------------|------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|
| 57~71<br>ランタノイド  | 57<br>ランタン<br>La   | 58<br>セリウム<br>Ce | 59<br>プラセオジム<br>Pr    | 60<br>ネオジム<br>Nd | 61<br>プロメチウム<br>Pm | 62<br>サマリウム<br>Sm  | 63<br>ユビウム<br>Eu   | 64<br>ガドリニウム<br>Gd | 65<br>テルビウム<br>Tb  | 66<br>ジスプロシウム<br>Dy | 67<br>ホルミウム<br>Ho    | 68<br>エルビウム<br>Er   | 69<br>ツリウム<br>Tm     | 70<br>イットリビウム<br>Yb | 71<br>ルテチウム<br>Lu    |
| 89~103<br>アクチノイド | 89<br>アクチニウム<br>Ac | 90<br>トリウム<br>Th | 91<br>プロトアクチニウム<br>Pa | 92<br>ウラン<br>U   | 93<br>ネプツニウム<br>Np | 94<br>プルトニウム<br>Pu | 95<br>アメリシウム<br>Am | 96<br>キュリウム<br>Cm  | 97<br>バークリウム<br>Bk | 98<br>カリホルニウム<br>Cf | 99<br>アインシュタイン<br>Es | 100<br>フェルミウム<br>Fm | 101<br>メンデレビウム<br>Md | 102<br>ノーベリウム<br>No | 103<br>ローレンシウム<br>Lr |

# 原子の世界

原子は、中心に原子核とその周りを回っている電子

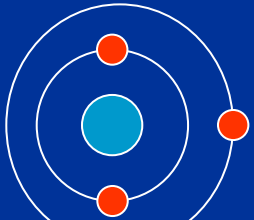


H

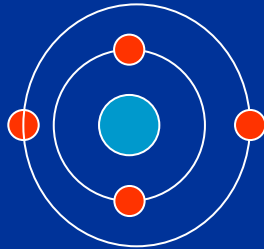


He

N=1軌道は2



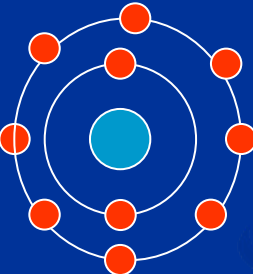
Li



Be

N=2軌道は8

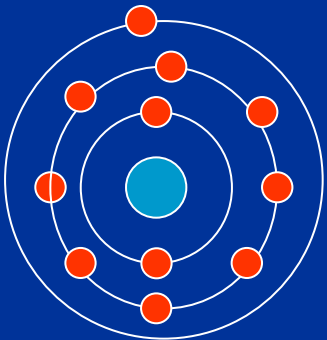
...



Ne

N=3軌道は18

...



Na

元素の化学的性質は、周りを回っている電子軌道の性質、特に一番外側、もしくはその次の軌道でほとんど決定される。

周期律表は電子軌道の殻構造の周期性から。

# 原子核は陽子と中性子の集合体



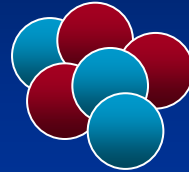
H



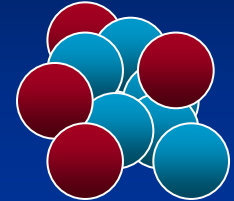
D



He



Li



B

地上に自然に存在するあらゆる物質は、3つの粒子（**陽子**、**中性子**、**電子**）からできている。

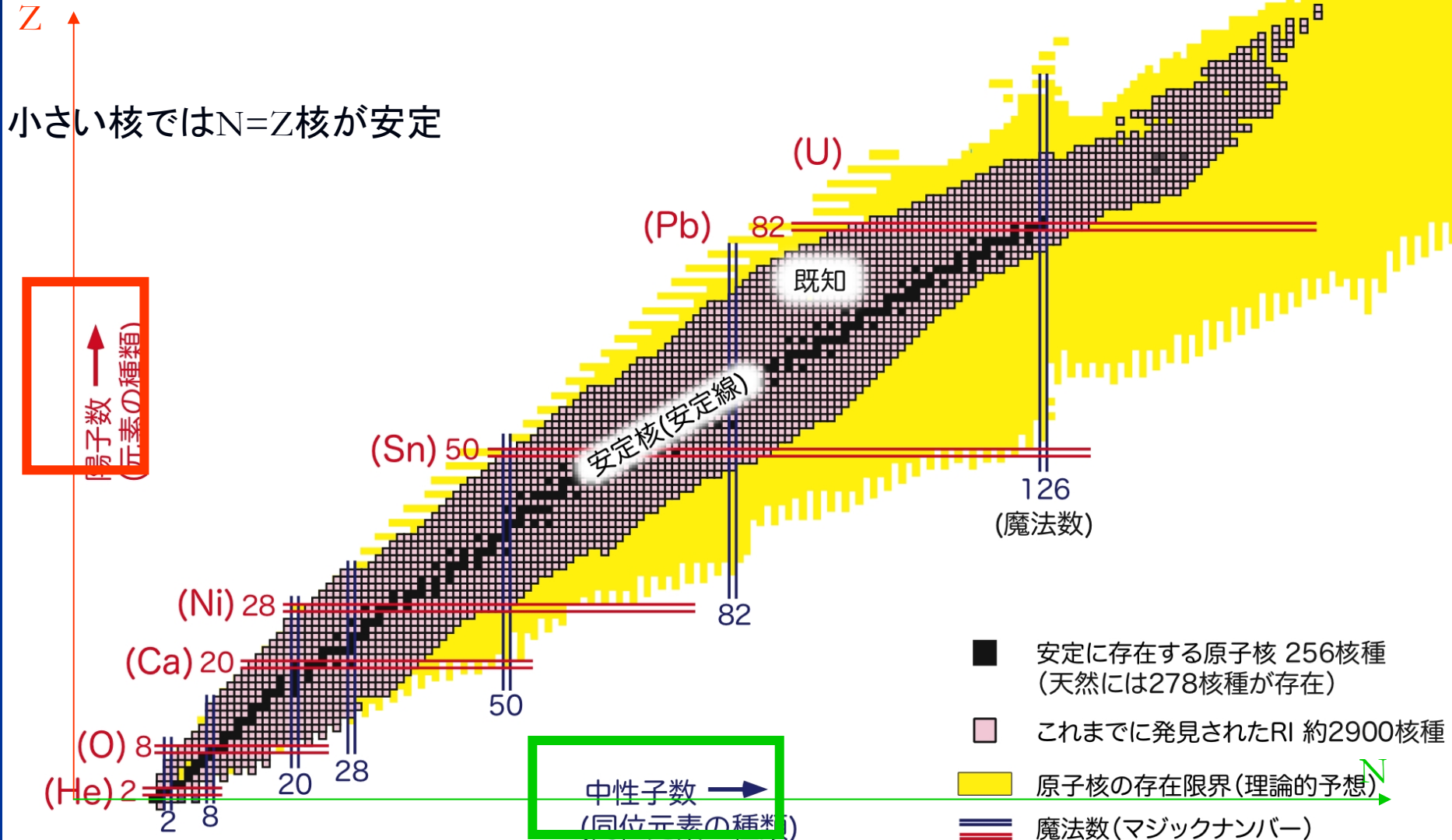
**陽子**、**中性子**は核力と呼ばれる力で結合している。

物質世界は極めて豊かな構造を持っている。

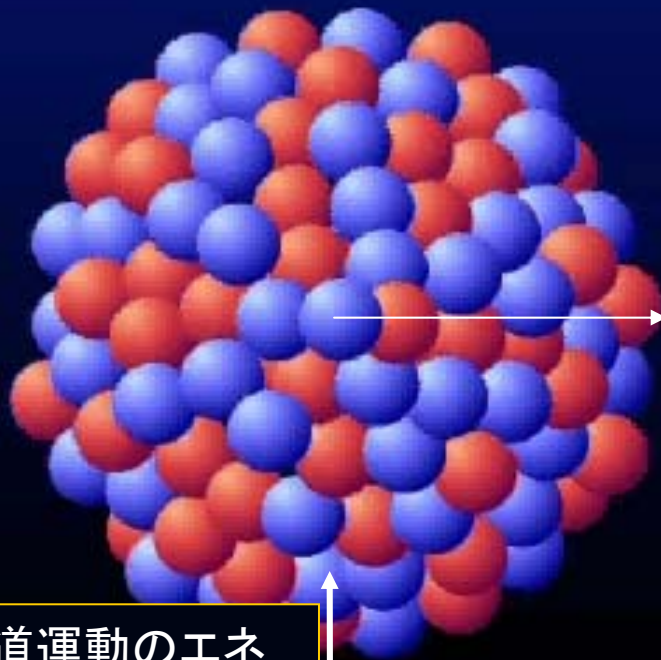
たった**3種類の粒子**（**陽子**、**中性子**、**電子**）で、複雑、多様、で豊かな世界が作り上げられているのは驚くべきことである。

# 原子核の世界

## 核図表



# 魔法数は 原子の周 期律と同じ

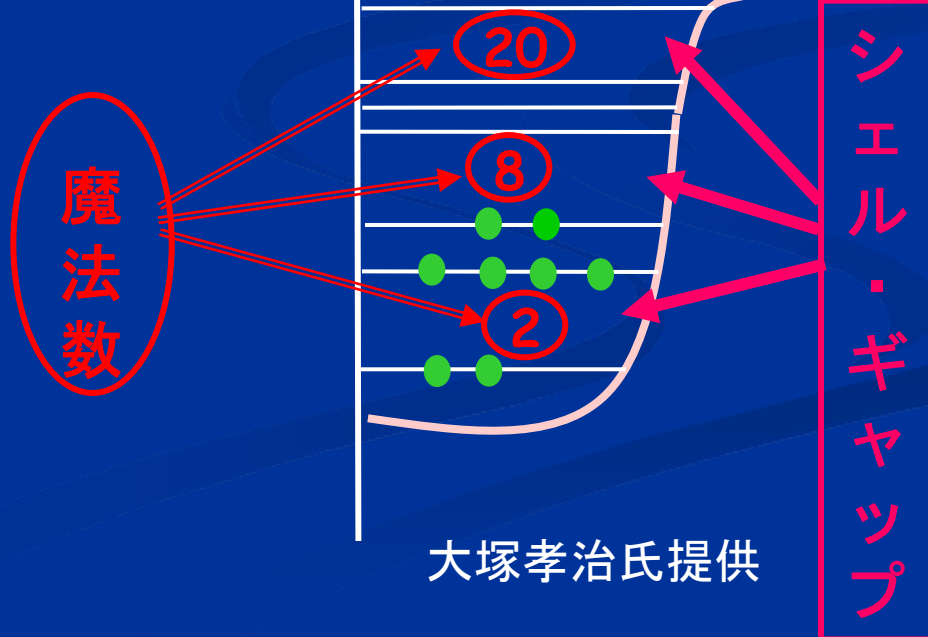


核子の軌道運動のエネ  
ルギー

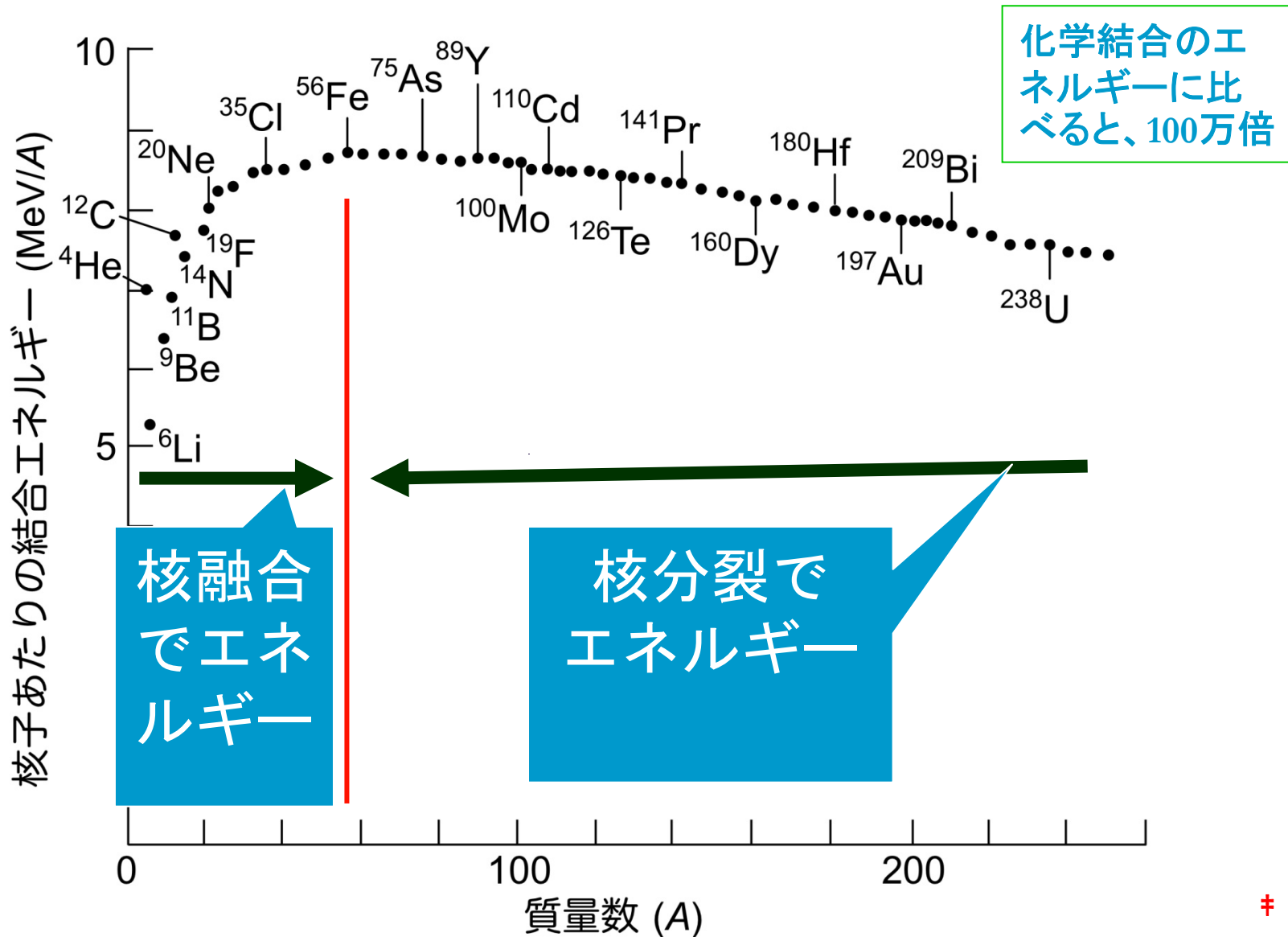
半径

シェル・ギャップより下の  
軌道に  
詰まっている粒子数を  
魔法数

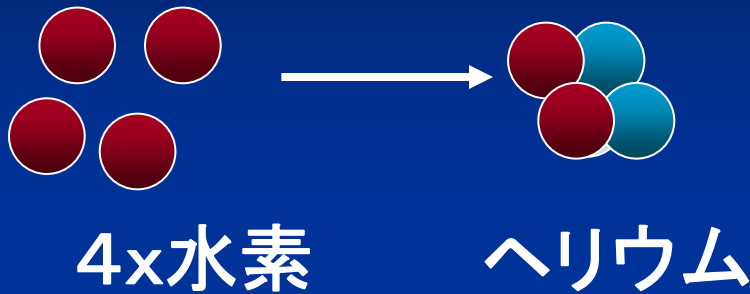
粒子軌道エネルギーの  
このような構造を  
殻構造



# 原子核の結合エネルギー



# 私たちの使用しているエネルギーの ほとんどは核エネルギー

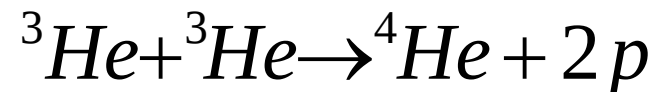
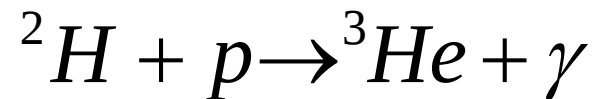
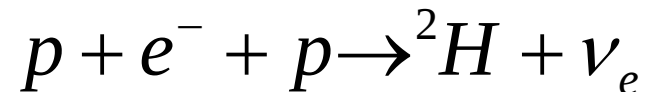
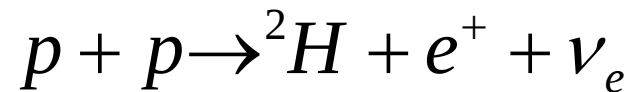


$$+2e^+ + 2\nu_e + 26.7\text{MeV}$$

ほとんどが、光・熱エネルギー  
10～100万年して太陽表面  
から放出

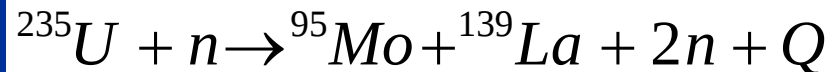
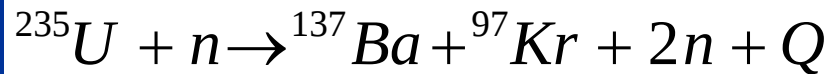
## ■ 太陽のエネルギー は 核融合のエネルギー

直接の太陽光、太陽電池はもちろん、水力  
発電、化石燃料(石炭、石油、天然ガス)  
のエネルギーは すべて元は 核エネル  
ギー



# 私たちの使用しているエネルギーの ほとんどは核エネルギー

## ■ 原子炉、原爆は核分裂のエネルギー



．．． など

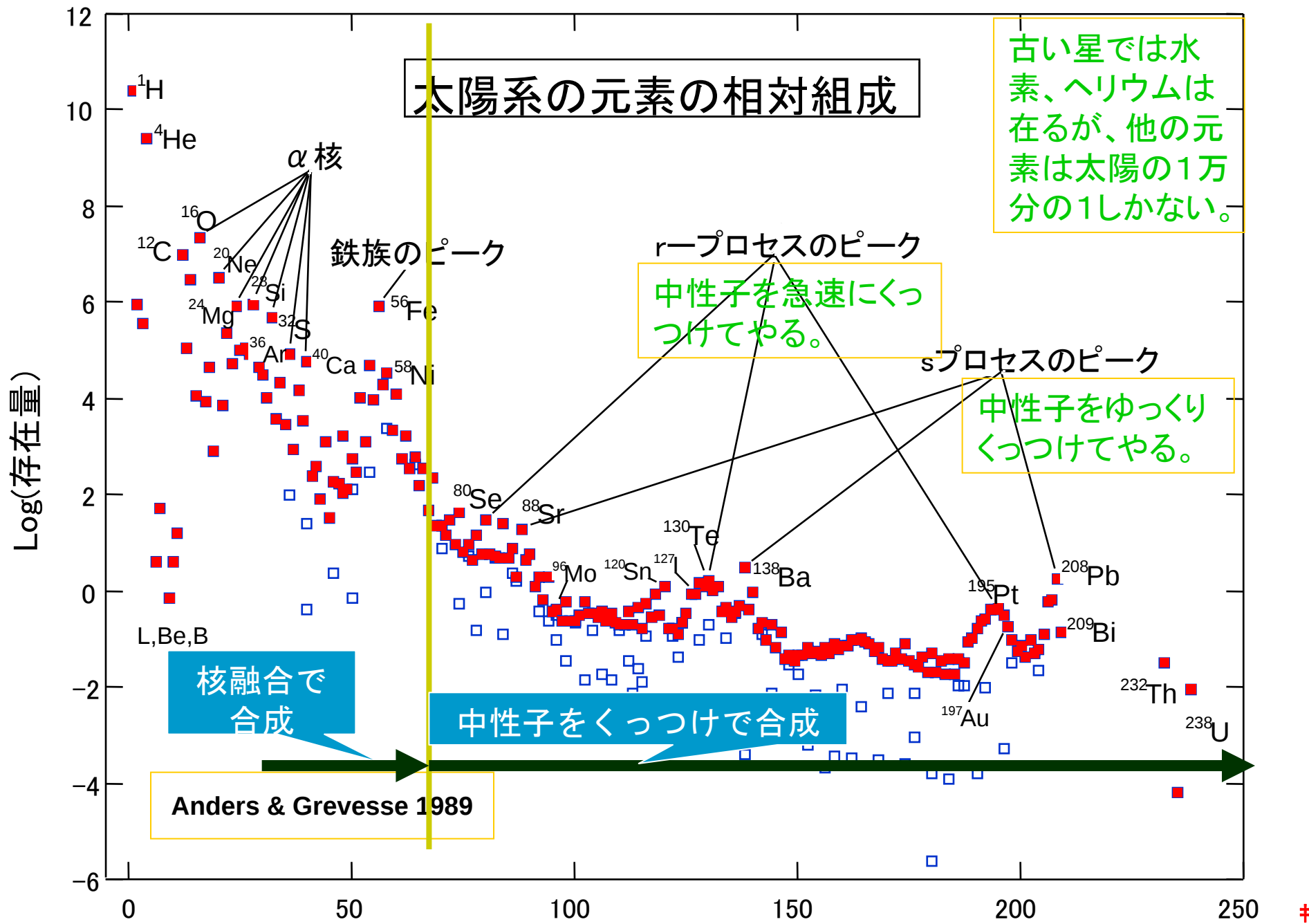
## ■ 核融合炉、水爆は核融合のエネルギー

重水素、3重水素を融合しヘリウム  
が作られる時の融合エネルギー

**元素の起源**：私たちの体をはじめ物質世界に存在する元素は宇宙の歴史で作られたのである。

- H, He など軽い元素は、宇宙の初期、ビッグバンで。
- その他のほとんどの元素は 恒星の内部超新星爆発で合成される。

**私たちは星のかけらである。**

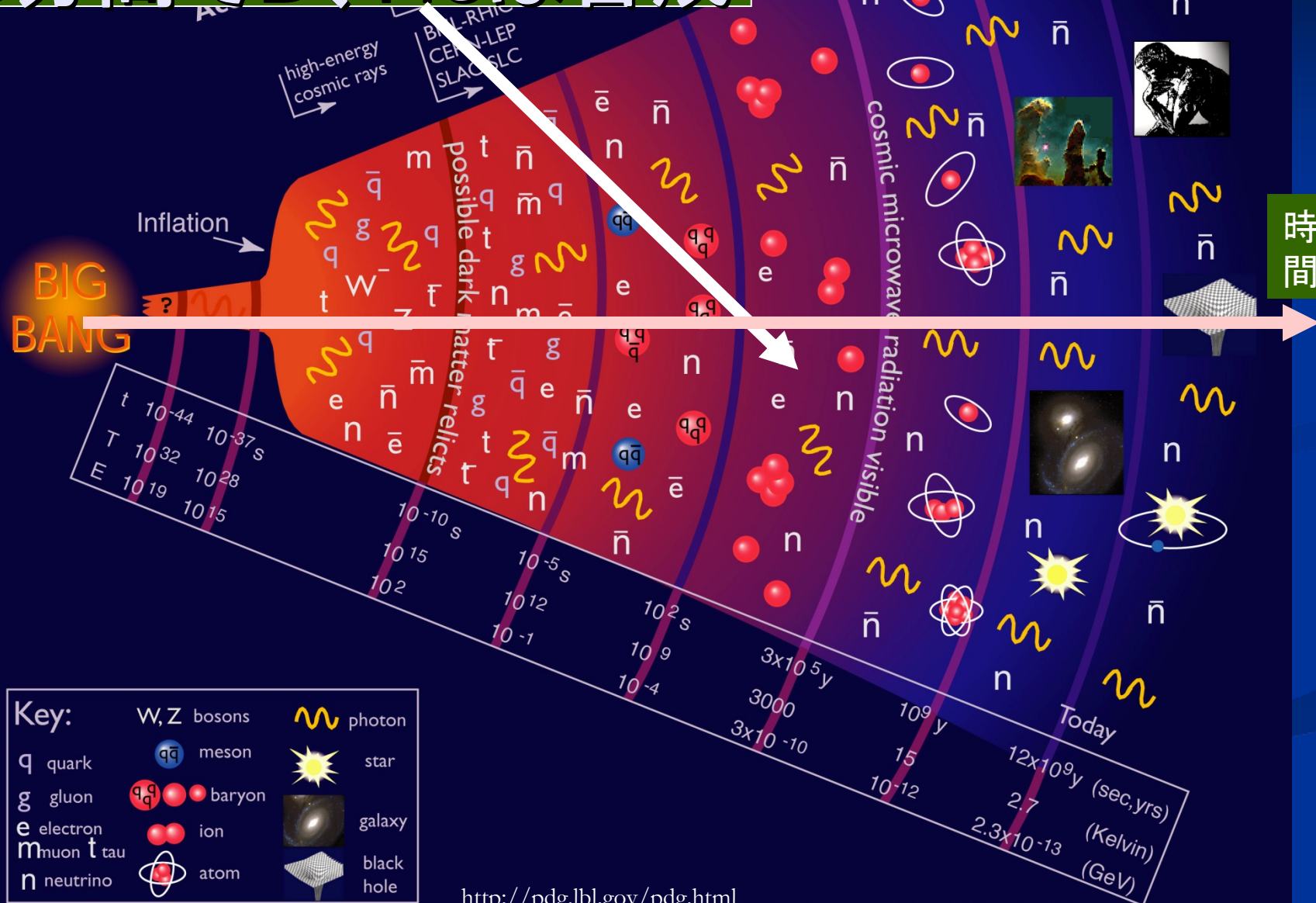


# ガモフの夢



- 水素からウランまで、すべての元素をビッグバンで合成（1946）することを夢見た。
- しかし当時考えられていた、冷たい宇宙の膨張では鉄ばかりで、元素の組成分布は説明できない。
- ガモフは、自然界に存在する元素の組成を説明するためには、熱い火の玉モデルでなければならないことに気づいた。
- **ビッグバンモデルの提唱**
- しかし、きちんとしたビッグバン宇宙の核反応率では、せいぜい リチウム、 $\text{Li}$  までしか合成できない。

ビッグバン、はじめの  
3分間でD、Heは合成



# 超新星が引き起こす物質大循環

ビッグバン  
137億年前(+/-1%)

H, He

最初の星の形  
成:  
宇宙誕生から2億年

大質量星の内部:  
C, N, O, Fe

BH, NS, (WD)

超新星爆発

次世代の星の誕生

83種類の  
重元素蓄積  
46億年前



生命の  
誕生と進化

別の超新星が  
トリガー

超新星残骸から  
星間物質へ

C, N, O,  
Si, Fe  
Au??, U??

# 私たちは星のかけらである

100年前まで 元素は世界を構成する物質の素材として初めから存在するものだった。

原子核物理学の進歩、宇宙物理学の進歩（それを支える量子論と相対論の成立）で、元素合成は宇宙の進化の結果であることを知った。観測的にも実証。

ビッグバンにまで起源は遡る。

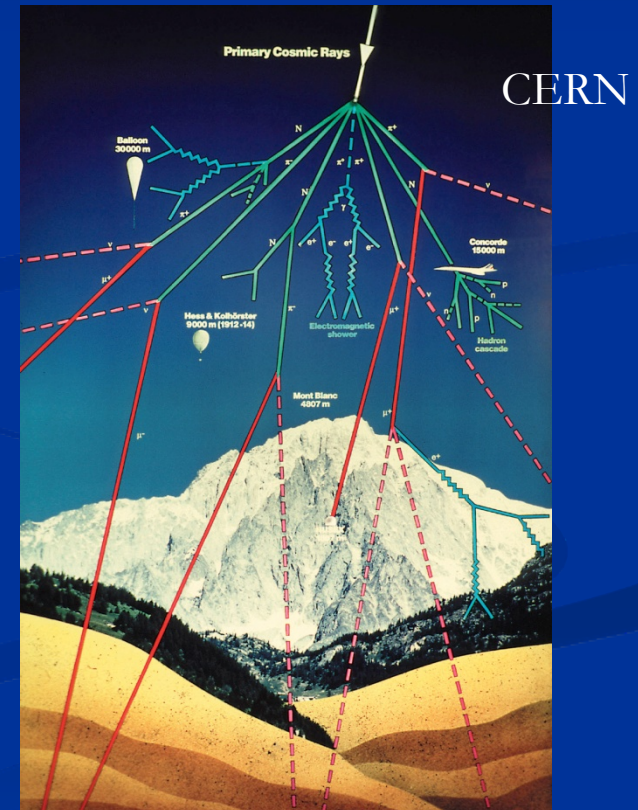
星とガスの輪廻の中で元素は今も宇宙の進化の中で合成され続けている。

# 素粒子の世界

3種類の粒子（陽子、中性子、電子）と光子  
で物質世界は作られている。

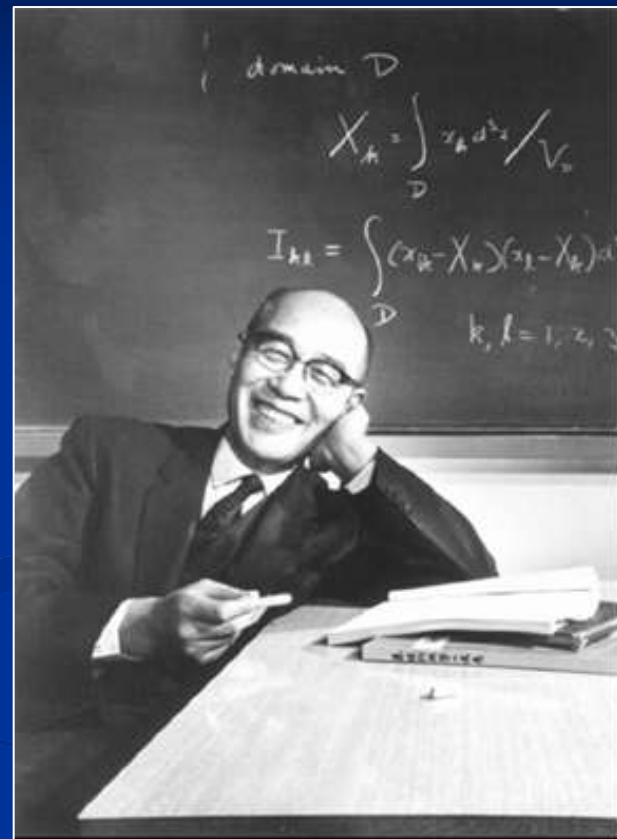
しかし、1932年に陽電子が、1937年に宇宙線の中にミューオンが発見されて以来、不安定な素粒子が大量に発見されてきた。

陽電子: 電子の反粒子、荷電が正



# 湯川秀樹の中間子論(1934)

- 陽子や中性子はどんな力でくっつき原子核を構成しているのだろうか？
- 核子(陽子や中性子)の間には中間子が媒介して核力が働く理論を提唱。
- 湯川秀樹 は少数の素粒子しか知られてない時に 先駆的に1934年、新たな素粒子、中間子の存在を予言。

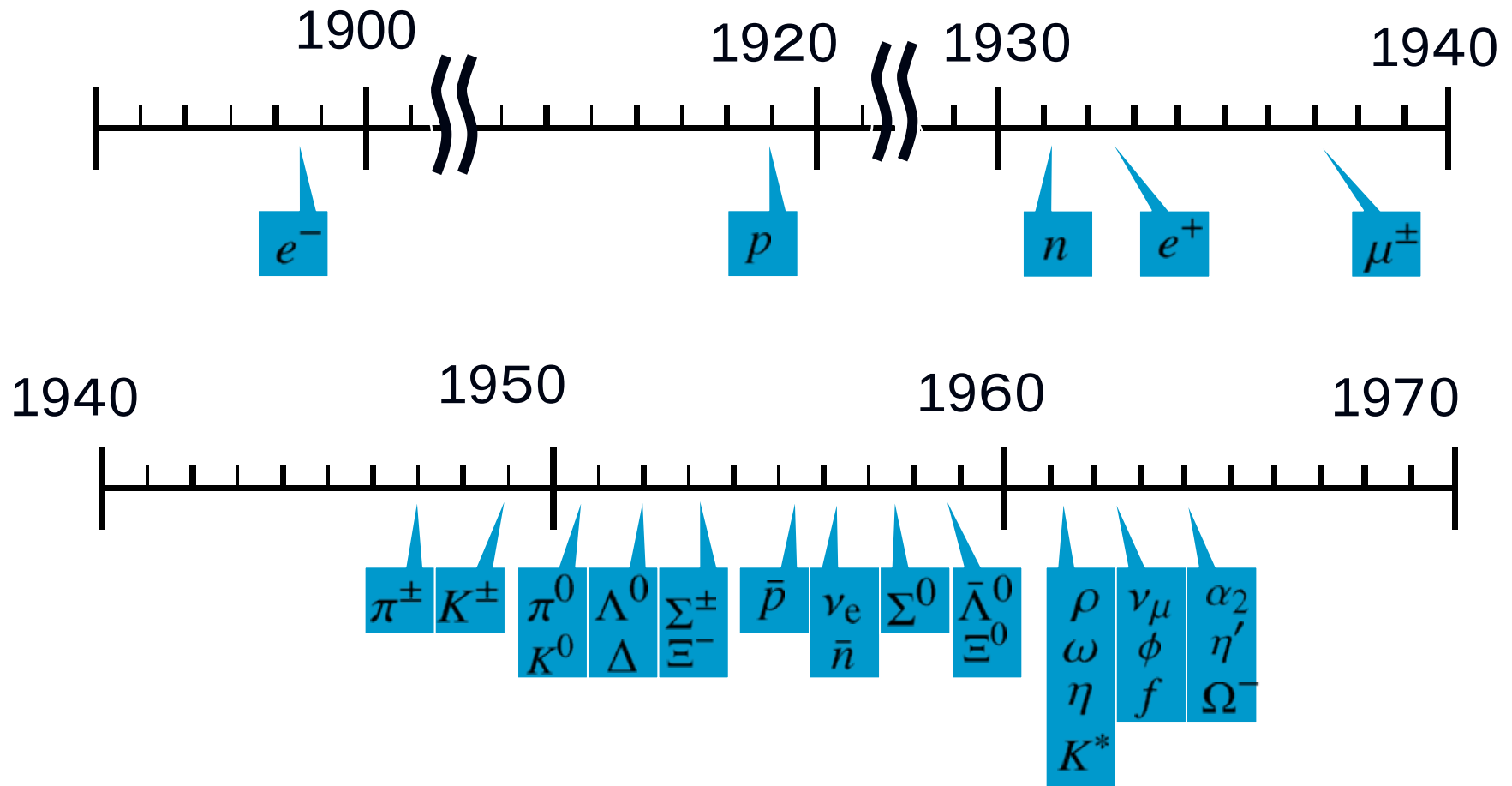


日本人初のノーベル賞受賞者

京都大学 基礎物理学研究所 湯川記念資料室 所蔵  
photo by Karsh, Ottawa, Dec.1969

核力は、原子爆弾のエネルギーの源でもある。 また太陽など星のエネルギー源

# 次から次へと新素粒子が発見された。



# 素粒子の分類

宇宙線の中、加速器により次から次へと新しい素粒子が発見。

## ■ 2種類の素粒子

○フェルミ粒子 スピンが半整数

陽子、中性子、電子、・・

とその反粒子

$$s = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \dots$$

○ボーズ粒子 スピンが整数

光子、 $\pi$  中間子、・・

$$s = 0, 1, 2, \dots$$

(超対称性理論ではそれぞれのパートナーが存在するはず。)

## ■ 別の分類で2種類の素粒子

○粒子 陽子、 中性子、 電子、・・

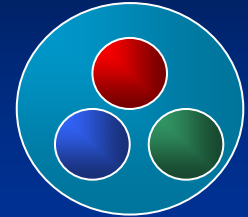
○反粒子 反陽子、反中性子、陽電子、・・

互いに衝突すると、(光をだして)消滅。

(反世界は存在するのか?)

ハドロン(バリオンとメソン)はクォークで作られている。 M.ゲルマン(1964)

バリオンと反バリオン  
ハドロン、約120種

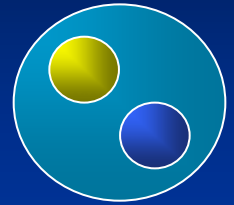


|            | 名前    | 構成<br>クォーク              | 電荷<br>(e) | 質量<br>(GeV/c <sup>2</sup> ) | スピン |
|------------|-------|-------------------------|-----------|-----------------------------|-----|
| p          | 陽子    | uud                     | 1         | 0.938                       | 1/2 |
| $\bar{p}$  | 反陽子   | $\bar{u}\bar{u}\bar{d}$ | -1        | 0.938                       | 1/2 |
| n          | 中性子   | udd                     | 0         | 0.940                       | 1/2 |
| $\Lambda$  | ラムダ粒子 | uds                     | 0         | 1.116                       | 1/2 |
| $\Omega^-$ | オメガ粒子 | sss                     | -1        | 1.672                       | 3/2 |

# ハドロン(バリオンとメソン)はクォークで作られている。 M.ゲルマン(1964)

## メソン(中間子)

ボース統計にしたがうハドロン、約140種



|          | 名前    | 構成<br>クォーク | 電荷<br>(e) | 質量<br>(GeV/c <sup>2</sup> ) | スピン |
|----------|-------|------------|-----------|-----------------------------|-----|
| $\pi^+$  | パイオン  | $u\bar{d}$ | +1        | 0.140                       | 0   |
| $K^-$    | ケイオン  | $s\bar{u}$ | -1        | 0.494                       | 0   |
| $\rho^+$ | ロー中間子 | $s\bar{d}$ | +1        | 0.770                       | 1   |
| $B^0$    | Bゼロ   | $d\bar{b}$ | 0         | 5.279                       | 0   |
| $\eta_c$ | イータC  | $c\bar{c}$ | 0         | 2.980                       | 0   |

# 物質粒子はクォークとレプトンに整理

|      |                    | 第1世代                        | 第2世代                         | 第3世代                         |
|------|--------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|
| クォーク | ・電荷 $+\frac{2}{3}$ | アップ<br>(u)                  | ストレンジ<br>(s)                 | トップ<br>(t)                   |
|      | ・電荷 $-\frac{2}{3}$ | ダウン<br>(d)                  | チャーム<br>(c)                  | ボトム (ビューティ)<br>(b)           |
| レプトン | ニュートリノ             | 電子ニュートリノ<br>( $\nu_{e^-}$ ) | ミューニュートリノ<br>( $\nu_{\mu}$ ) | トリニュートリノ<br>( $\nu_{\tau}$ ) |
|      | 荷電レプトン             | 電子<br>( $e^-$ )             | ミューオン<br>( $\mu^-$ )         | タウオン<br>( $\tau^-$ )         |

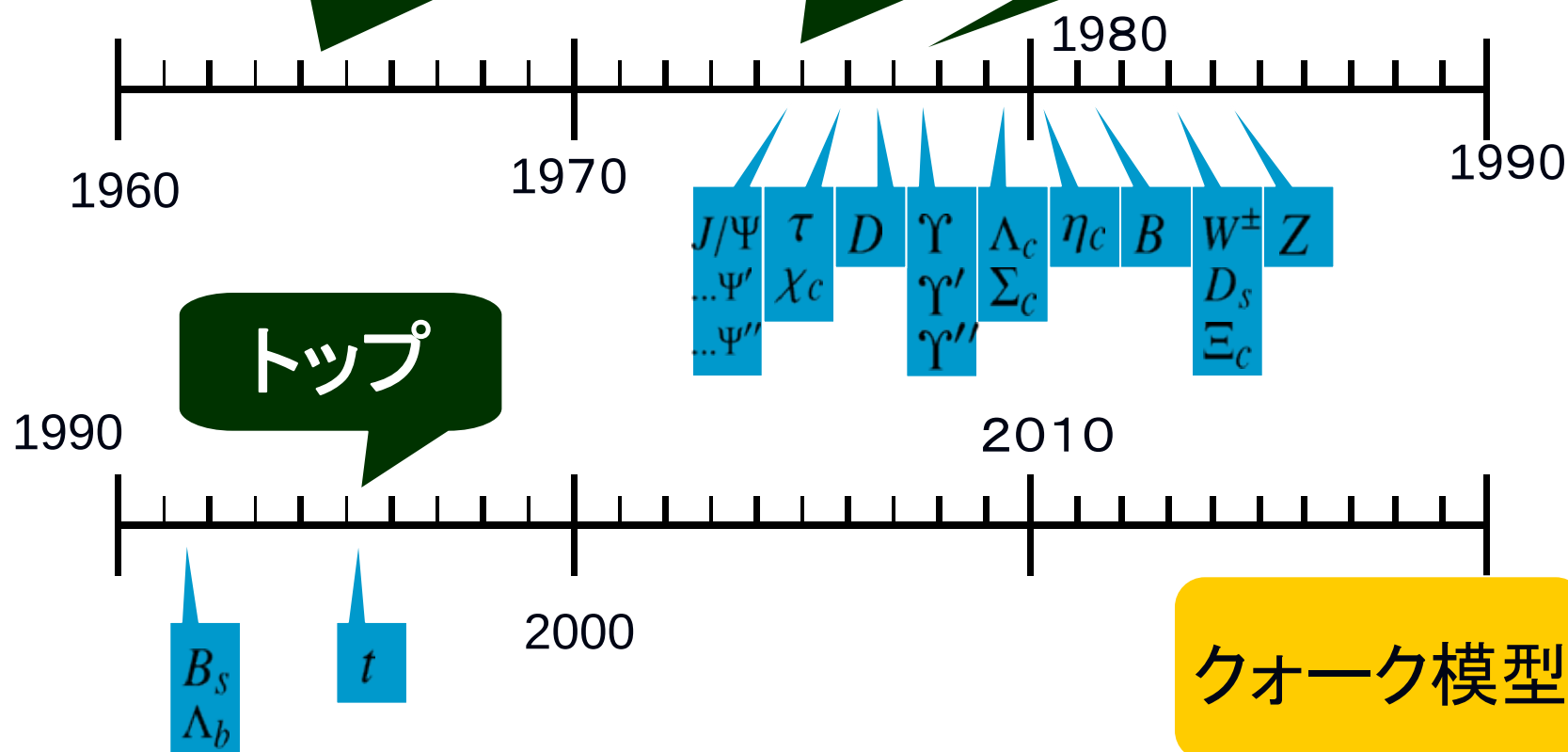
# 予言されたクォークはすべて発見

アップ、ダウン、ストレンジ

チャーム

ボトム

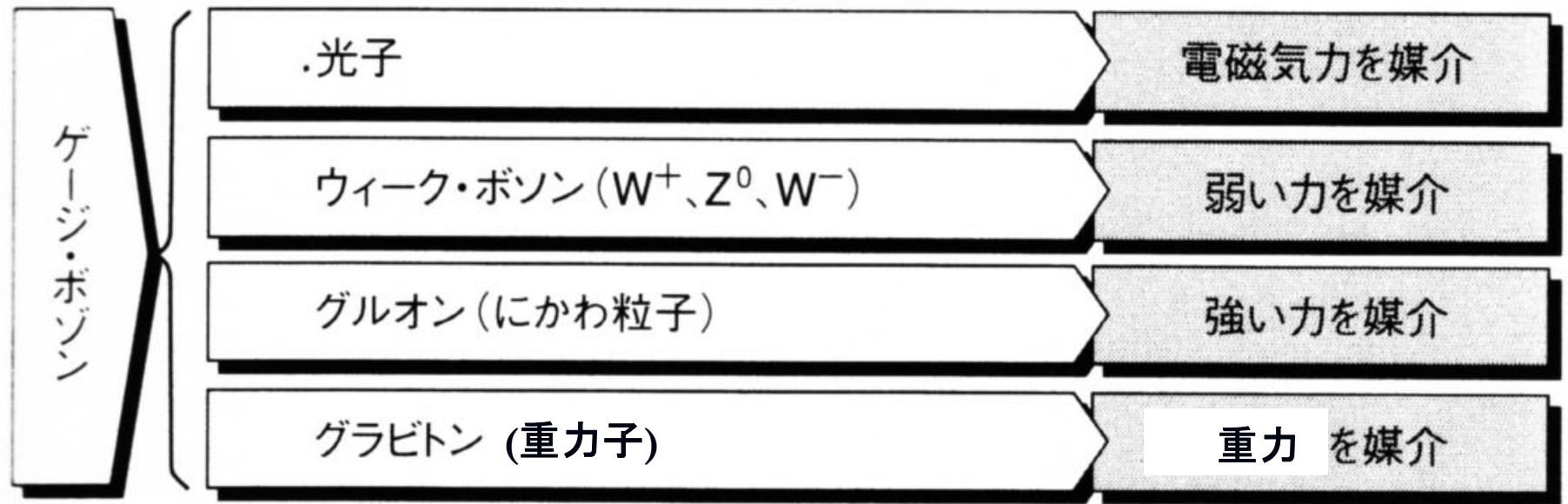
トップ



クォーク模型

# 力を媒介する素粒子

$W^+$ 、 $W^-$ 、 $Z$  も1982, 1983年発見



強い力を媒介する粒子、グルオンは単独では取り出せない。

グラビトンは未発見

# まとめ：素粒子の現在

|      |                    | 第1世代                    | 第2世代                       | 第3世代                       |
|------|--------------------|-------------------------|----------------------------|----------------------------|
| クォーク | ・電荷 $+\frac{2}{3}$ | アップ<br>(u)              | ストレンジ<br>(s)               | トップ<br>(t)                 |
|      | ・電荷 $-\frac{2}{3}$ | ダウン<br>(d)              | チャーム<br>(c)                | ボトム (ビューティ)<br>(b)         |
| レプトン | ニュートリノ             | 電子ニュートリノ<br>( $\nu_e$ ) | ミューニュートリノ<br>( $\nu_\mu$ ) | トリニュートリノ<br>( $\nu_\tau$ ) |
|      | 荷電レプトン             | 電子<br>( $e^-$ )         | ミューオン<br>( $\mu^-$ )       | タウオン<br>( $\tau^-$ )       |

|         |                                    |         |
|---------|------------------------------------|---------|
| ゲージ・ボソン | 光子                                 | 電磁気力を媒介 |
|         | ウィーク・ボソン ( $W^+$ , $Z^0$ , $W^-$ ) | 弱い力を媒介  |
|         | グルオン (にかわ粒子)                       | 強い力を媒介  |
|         | グラビトン (重力子)                        | 重力 を媒介  |

# 超対称性粒子は存在するか？

超対称性：異なるスピンを持つ素粒子を結びつける対称性

超対称パートナー：あるフェルミ粒子に対してその対応するボーズ粒子の存在を、  
またあるボーズ粒子に対してその対応するフェルミ粒子の存在を 予言

普通の粒子  $\longleftrightarrow$  超対称パートナー  
(質量が極めて大きい)

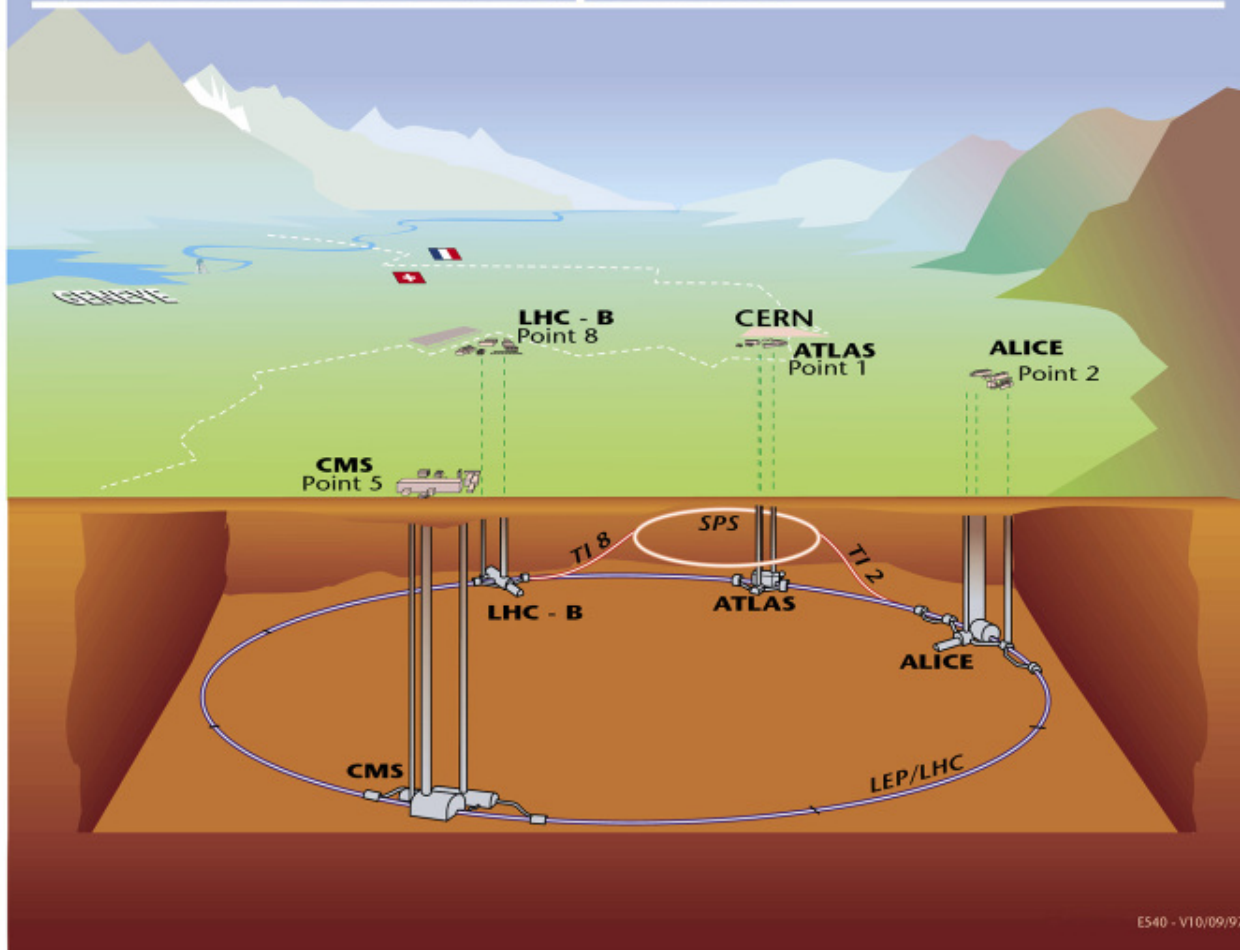
クォーク  
電子  
W粒子  
Z粒子  
光子  
グルーオン  
グラビトン

スカラークォーク  
スカラー電子  
ウィーノ(チャージーノ)  
ジノー(ニュートラリーノ)  
フォティーノ  
グルイーノ  
グラビティーノ

ニュートラリーノ：ジノー、フォティーノ、ヒッグシーノの混合状態

# 超対称性の確認、超対称パートナーの発見は素粒子物理学の最大課題。

Overall view of the LHC experiments.



世界最大の加速器

LHC

ジュネーブ郊外

東京の山手線の大きさ

地下50m

東京大学

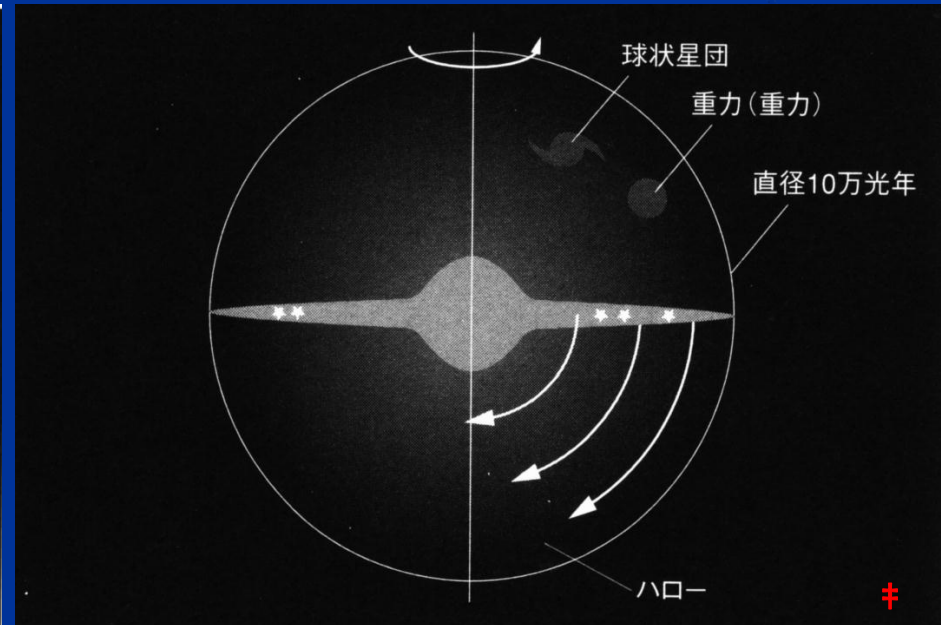
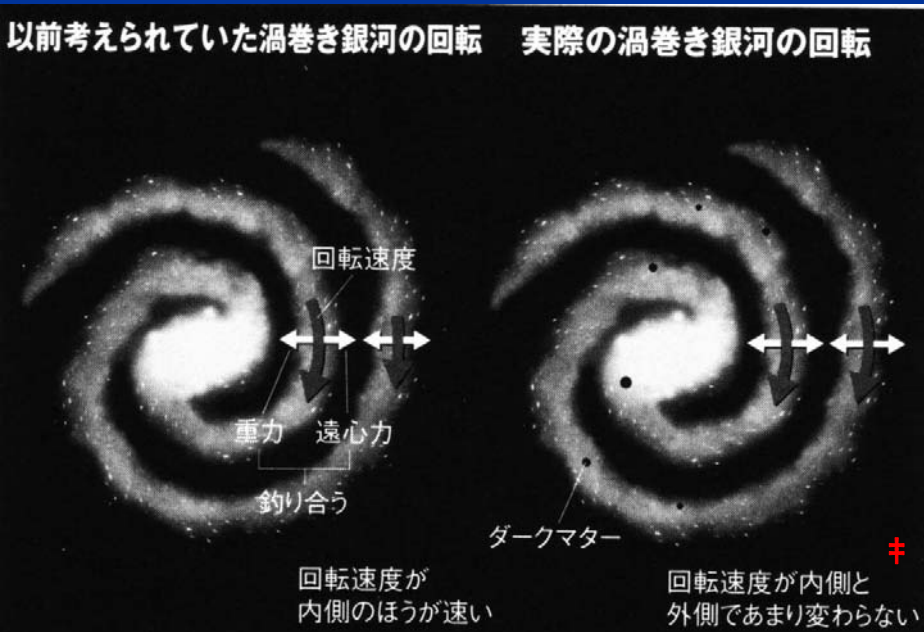
素粒子物理国際研究  
センターは

ATLAS実験に参加

# ニュートラリーノは暗黒物質の有力候補か？

**暗黒物質：** 銀河、銀河団、 超銀河団の内部周辺を覆うように存在する光らない物質重力の源となっていることで存在がわかる。 謎の正体不明重力源。

宇宙の物質エネルギーの約23%



佐藤勝彦2003「宇宙96%の謎」実業之日本社p.205

私たちの銀河の光っている星の総質量の 少なくとも10倍以上存在。

# 暗黒物質の正体は？

| 分類         | 候補                                                                                                                                   | 質量                                                                                                                                                                                                                                                             | 形成時の温度                                                                                                                                                                                                                 |
|------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 熱い (Hot)   | 軽いニュートリノ                                                                                                                             | $\lesssim 30\text{eV}$                                                                                                                                                                                                                                         | $3\text{MeV}$                                                                                                                                                                                                          |
| 冷たい (Cold) | 原始的ブラックホール<br>クォークナゲット<br>重いニュートリノ<br>超対称性粒子<br><b>ニュートラリーノ</b><br>アクシオン<br>モノポール<br>ピルゴン<br>シャドウ粒子<br>褐色矮星<br>白色 (黒色) 矮星<br>ブラックホール | $10^{15}\text{g} <$<br>$\lesssim 5 \times 10^{24}\text{g}$<br>$3\text{GeV} \lesssim$<br>$1\text{keV} \sim 1\text{TeV}$<br>$10^{-5}\text{eV} \lesssim$<br>$\sim 10^{16}\text{GeV}$<br>$10^{19}\text{GeV} \sim 10^{-5}\text{g}$<br>木星質量程度<br>太陽質量程度<br>太陽質量の2倍以上 | $100\text{MeV} <$<br>$\sim 100\text{MeV}$<br>$100\text{MeV} \lesssim$<br>$\sim 100\text{GeV}$<br>$10^8 \sim 10^{19}\text{GeV}$<br>$\lesssim 10^{12}\text{GeV}$<br>$\sim 10^{15}\text{GeV}$<br>$\sim 10^{19}\text{GeV}$ |
| バリオンの      |                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                        |

# クォーク、レプトンの次の世代はないのか？ 究極の根源的粒子か？

- 現在の最高エネルギー加速器実験では 次の世代、第4、第5の存在を示すものはない。
- 同様にクォークやレプトンは点粒子であり、その大きさは測定されていない。

1. 物質は無限の階層を持っているのだろうか？ タマネギの皮はどこまで？
2. 世界で最高エネルギーの加速器は1台の時代となった。
3. 新たな原理の加速器（顕微鏡）の発明まで 素粒子の探求は待たねばならないのだろうか？



# 素粒子の生い立ち

## ■ 現代宇宙論のパラダイム:

1. **量子重力効果**で極微の宇宙が生まれた。
2. 誕生まもない宇宙の持つ**真空のエネルギー**に斥力が働き**インフレーション**と呼ばれる急膨張を起こした。
3. インフレーションの終わる過程で、真空のエネルギーは、熱エネルギーにかわり、**クォーク、反クォークのペア、レプトン、反レプトンのペア**が対創生された。

# 現在の宇宙創生と進化のパラダイム

時間

未来

現在 150億年

宇宙の晴れ上がり  
30万年

ビッグバン  
真空の相転移が終了

インフレーション

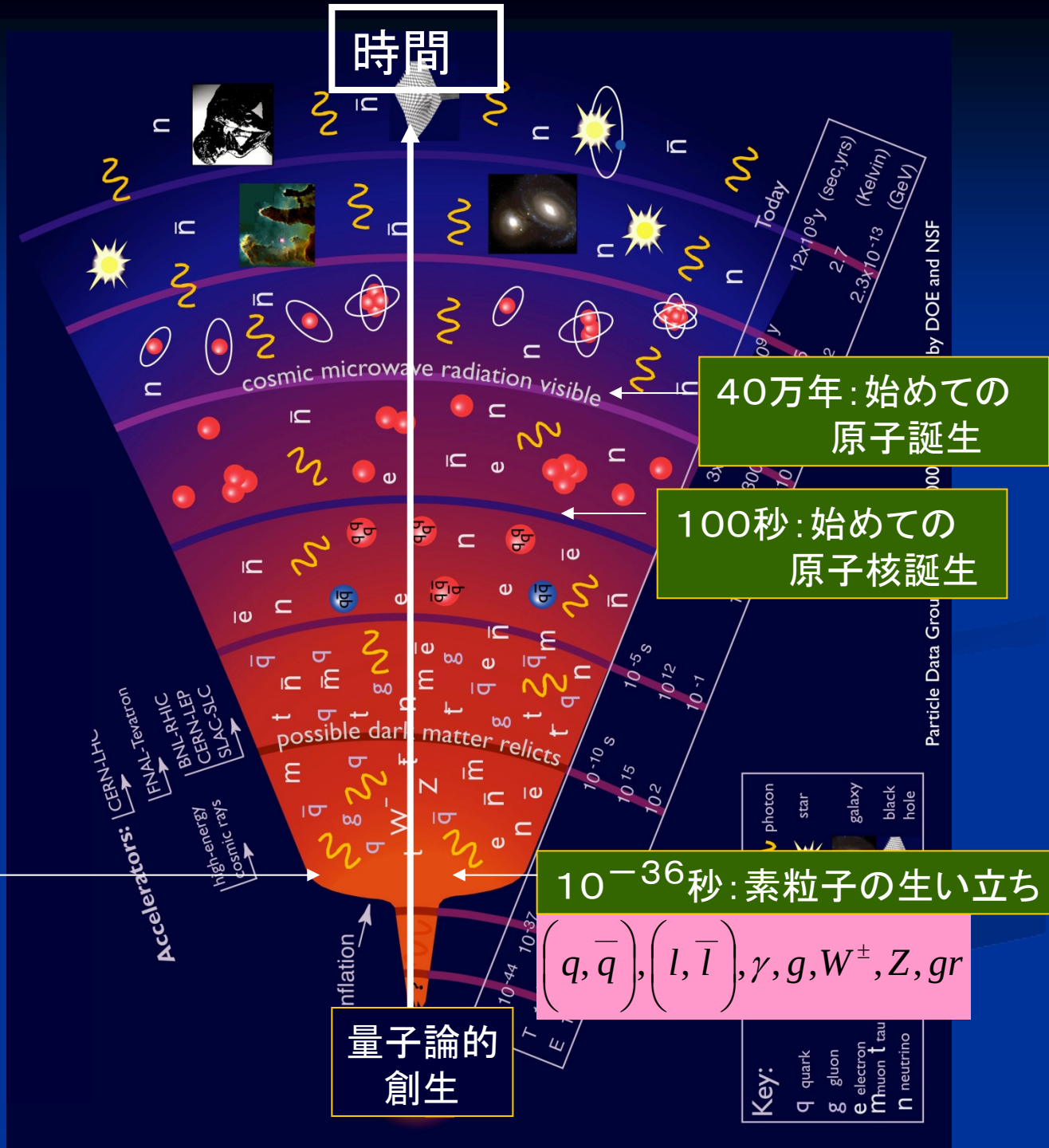
$10^{-36}$ 秒

“無”からの創生

火の玉宇宙の誕生：真空  
のエネルギーの解放

# 標準モデル での素粒子、 物質の進化

インフレーションの終了：  
火の玉宇宙の誕生



# なぜ私たちの宇宙は物質世界なのか？ 反物質世界はあるのか？

- 物理的学の法則は粒子と反粒子に対してまったく対称。

なぜ非対称な世界、物質世界となったのか？

- サハロフ (1966) : (A.Sakharov、ソ連原爆。水爆の父、後に反体制活動家)

宇宙における物質・反物質の非対称の起源の理論:

ある法則の対称性が破れて、宇宙初期に物質粒子が反粒子より多く作られた。

(大統一理論に基づいて吉村も議論)



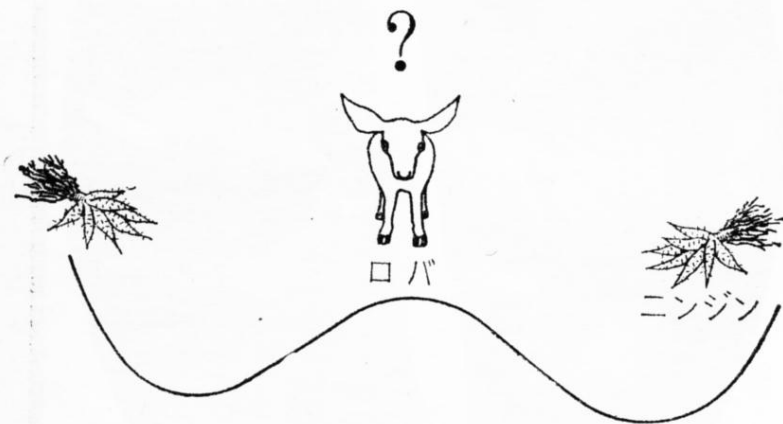
A. Sakharov  
<http://www.photos.aip.org/>

# 物理学の対称性と、現実の宇宙の 非対称性

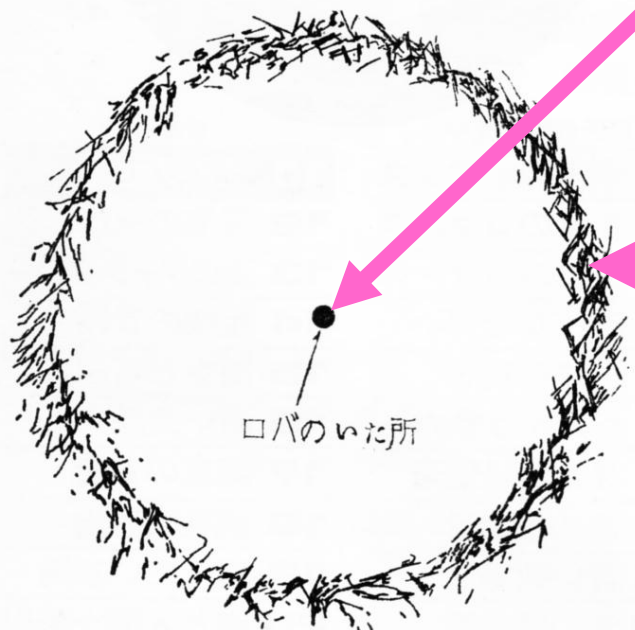
1. 物理法則は物質と反物質に対してまったく対称のはずである。
2. 物理学の法則が対称に作られているのなら、現実世界で対称性が破れるにしても、その破れは平等にやぶれるのではないか？
3. ある場所では 物質の世界が、また違った場所では 反物質の世界が実現されるはずである。



# 自発的対称性の破れ



物理法則は厳密に左右対称。



しかし、対称の状態は不安定で、左右平等に対称性は、結局破れる。

自然, 佐藤1969  
より

# 反物質・反世界の探査

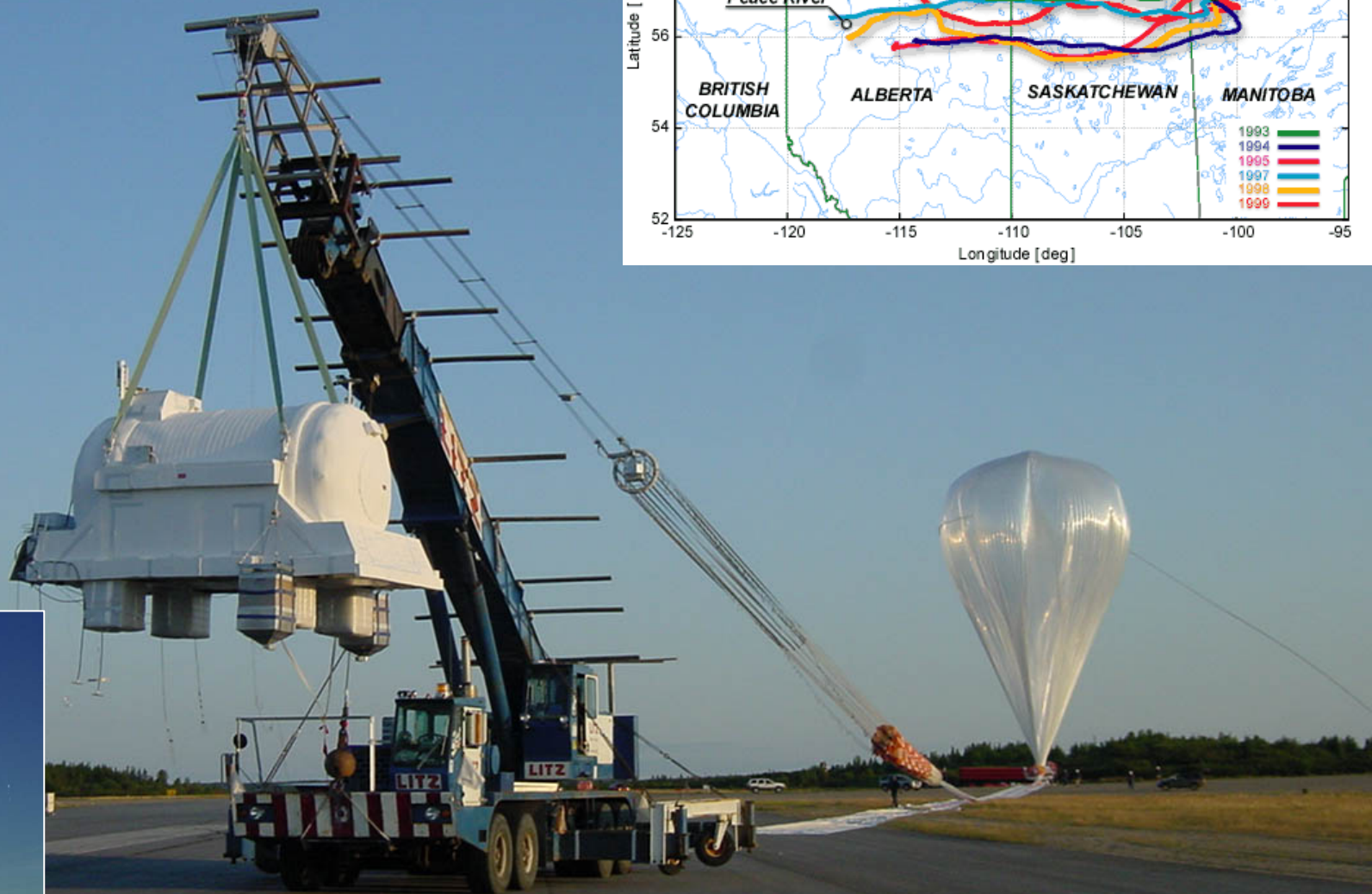
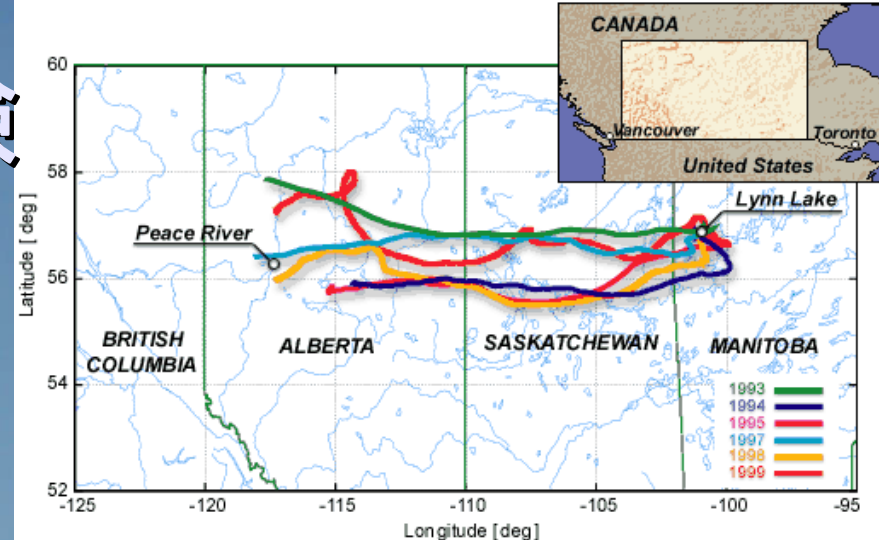
宇宙からやってくる反陽子の量、さらには 反ヘリウムを検出して反世界があるのか、探査する。

反陽子は宇宙線の衝突で作られるので反世界の証拠にはならない。しかし 反ヘリウムは 反陽子、反中性子の核融合反応によるもので反世界の星、反世界ビッグバンでしか作られない。

**BESS実験** (Balloon Experiment with Superconducting Spectrometer)  
日本ーアメリカ共同研究。(故 折戸教授、山本教授によって始められた)

反物質の検出をする 超伝導磁石を搭載した巨大な風船をあげて、反陽子の量の測定、反ヘリウムを見つける。

# カナダでのBESS実験



BESS実験

Launch at Lyn Lake, and recovered at Alberta area after a few day flight.

# 南極での実験（2004、12月）



BESS実験

# 現在までの BESS実験の結果

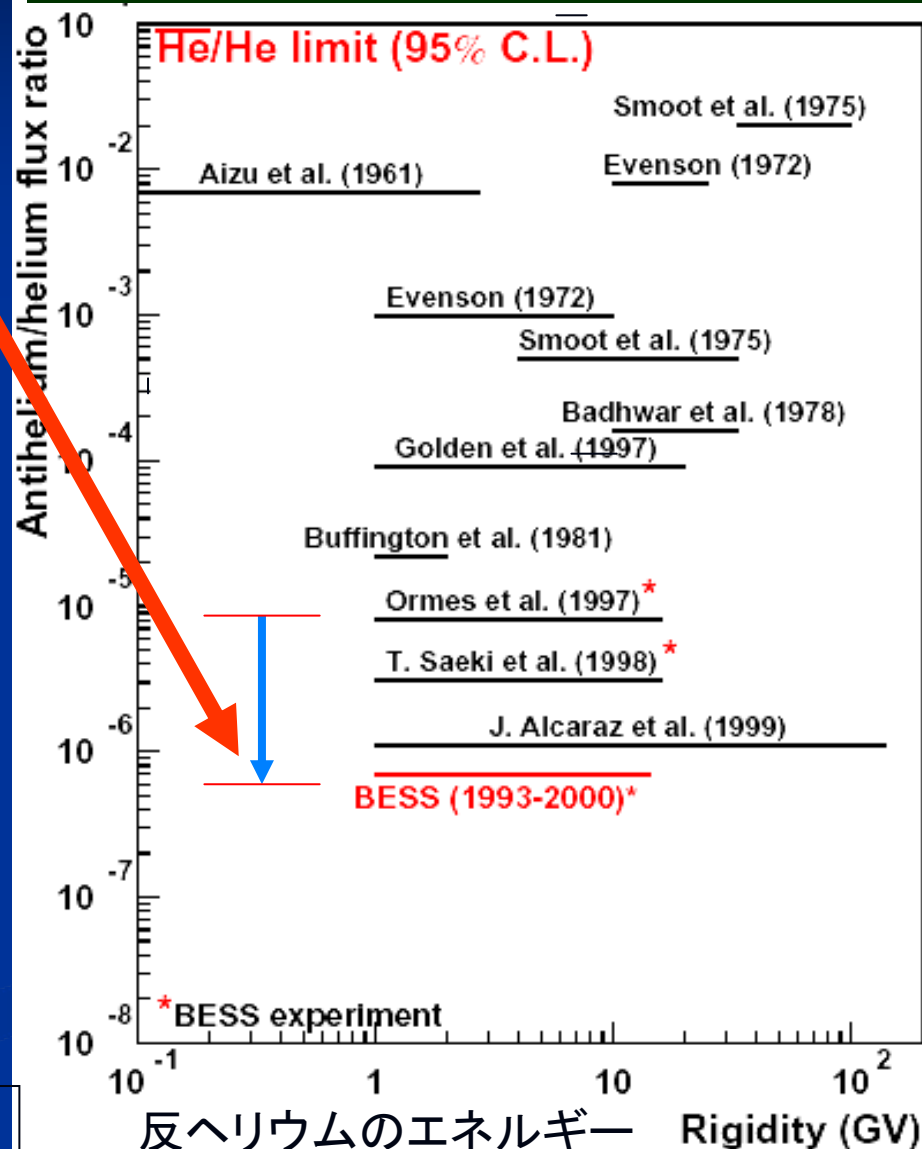
✦

660万個のヘリウムを検出したが  
反ヘリウムは見つかっていない。

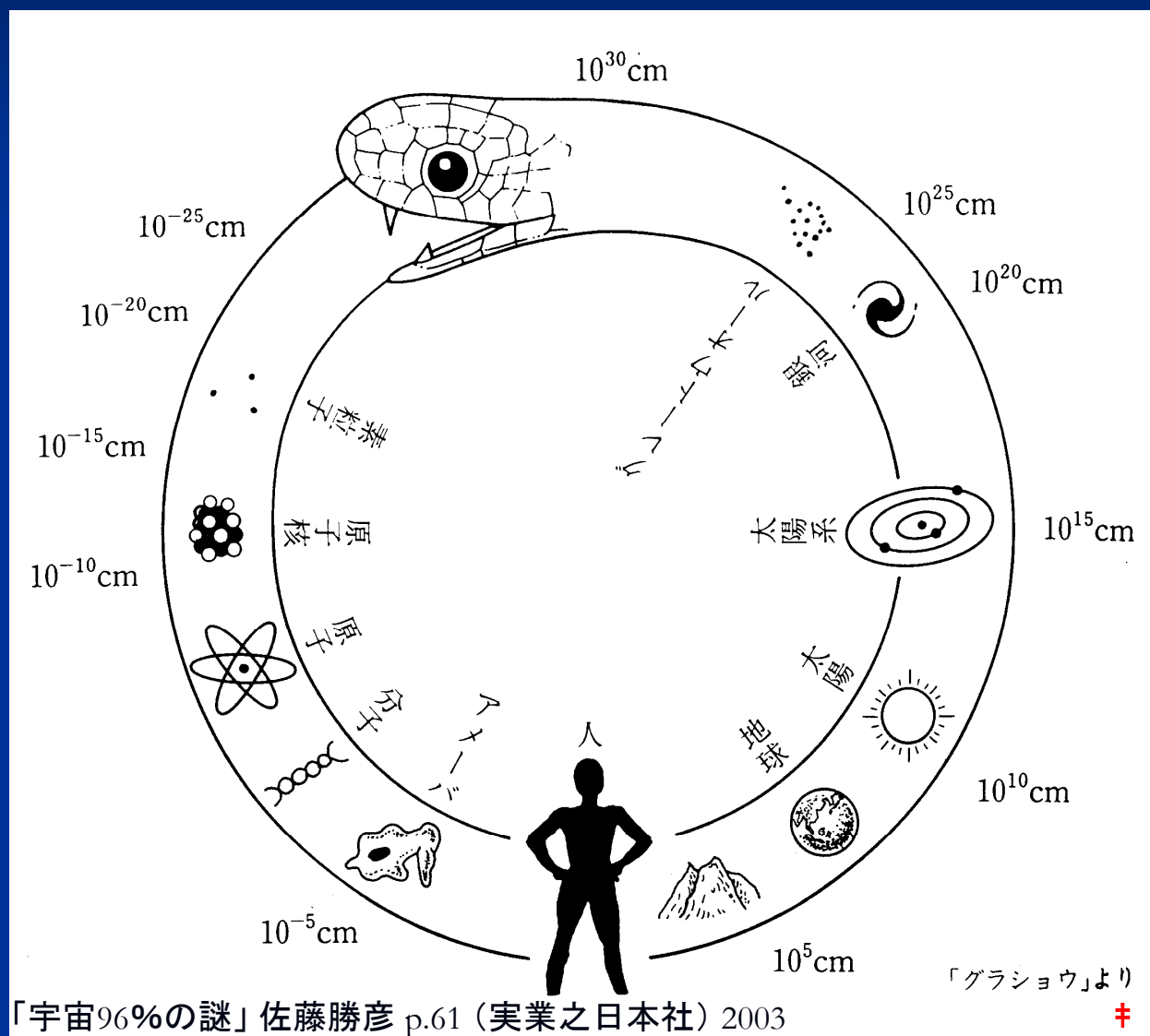
反世界の存在の可能性はこの実験からは得られていない。

BESS実験グループより提供

## 反ヘリウムの割合の上限値



今や人間は自らの大きさを基準としてミクロ世界からマクロの世界まで60桁の範囲で世界の構造を知っている。



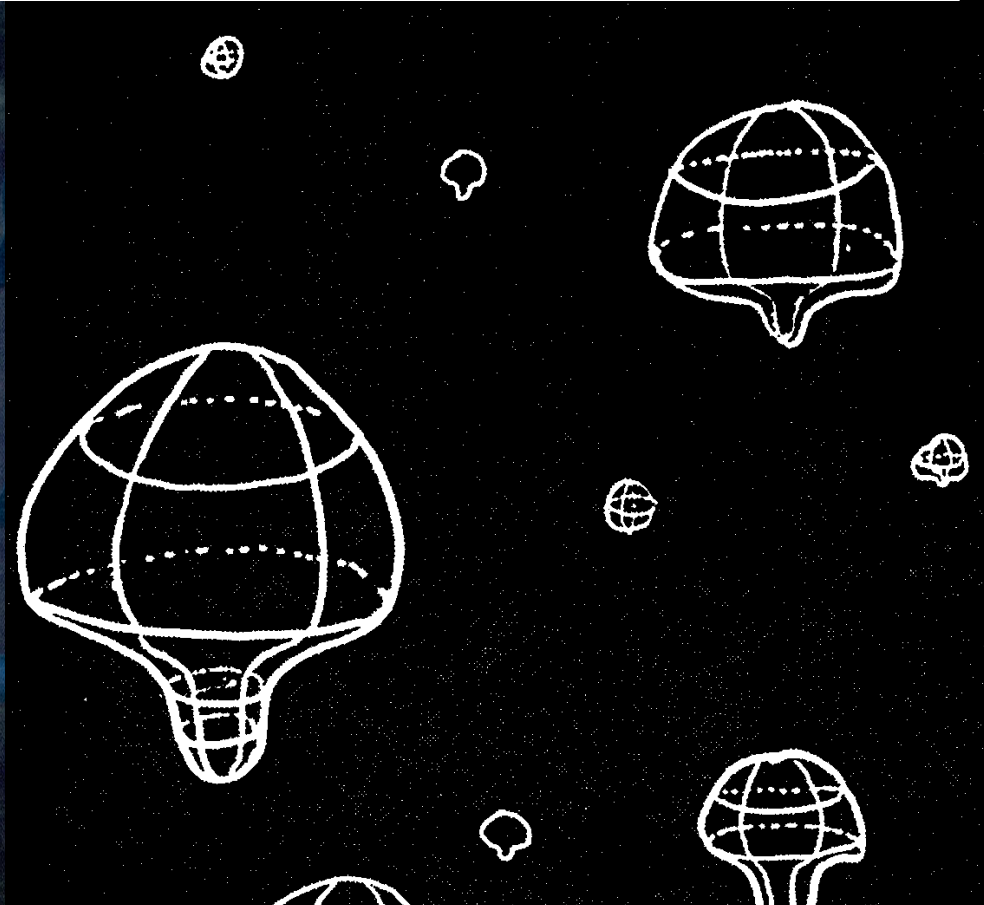
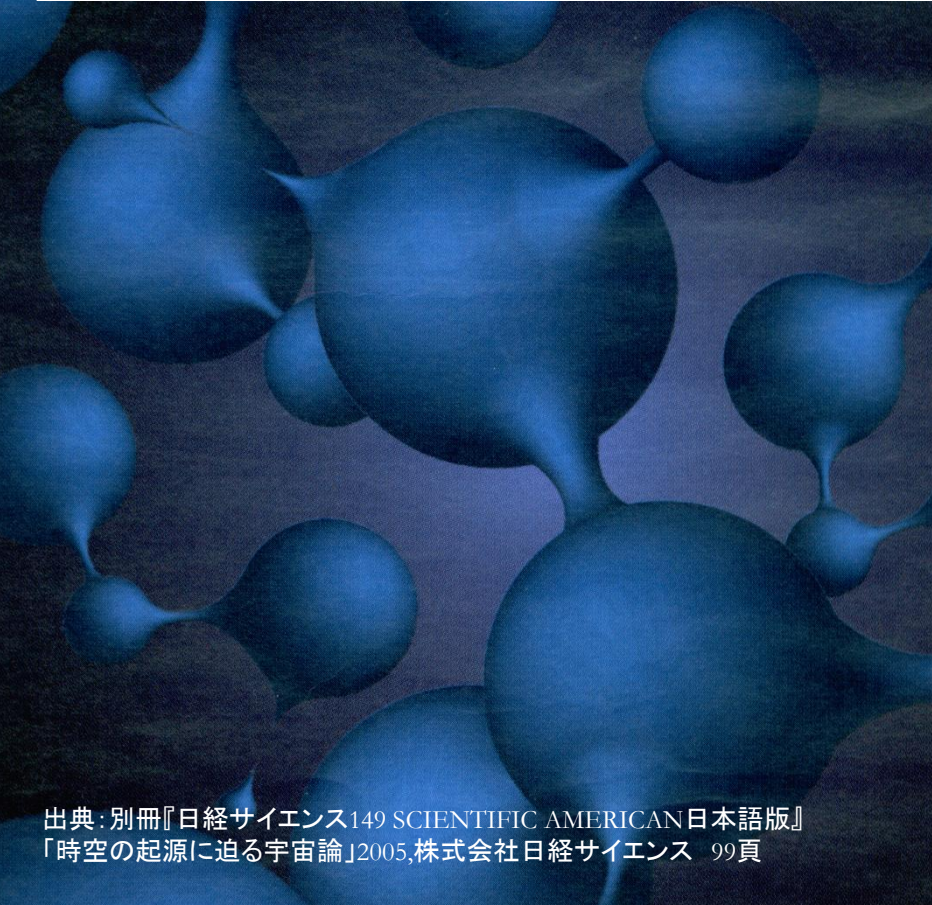
# しかし、そこが果たして階層の果てなのだろうか？

- クォーク、レプトン、ゲージ粒子は究極の物質の最小単位か？ なぜこの種類の粒子があるのか？

それは10次元空間の「ひも」なのか？

- 百数十億年の観測的果ての彼方に、まだ巨大な物質の構造があるのか？
- 私たちの住む宇宙である時空多様体の“外”にも宇宙はあるのか？

# 私たちの住む宇宙である時空多様体の “外”にも宇宙はあるのか？



出典：別冊『日経サイエンス149 SCIENTIFIC AMERICAN日本語版』  
「時空の起源に迫る宇宙論」2005,株式会社日経サイエンス 99頁

**Multiverse (無数の宇宙) M.Rees**

**-宇宙は我々の宇宙だけではなかった-**

# その他の引用図版

- 文献1 「宇宙96%の謎」 佐藤勝彦 実業の日本社 2003
- 文献2 宇宙は我々の宇宙ではなかった  
佐藤勝彦 PHP研究所 1998
- 文献3 宇宙七不思議 佐藤勝彦監修 PHP研究所 2005
- 文献4 図解 量子論 佐藤勝彦監修 PHP研究所 2004
- 文献5 図解 相対性理論 佐藤勝彦監修 PHP研究所 2003
- 文献6 量子論を楽しむ本 佐藤勝彦監修 PHP研究所 2004
- 文献7 相対性理論楽しむ本  
佐藤勝彦監修 PHP研究所 1998
- 文献7 相対性理論の世界へようこそ  
佐藤勝彦監修 PHP研究所 2004

出版社の許可を得て使用