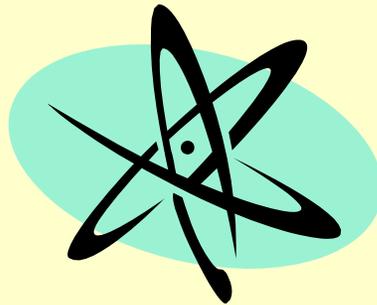


# ミクロの世界

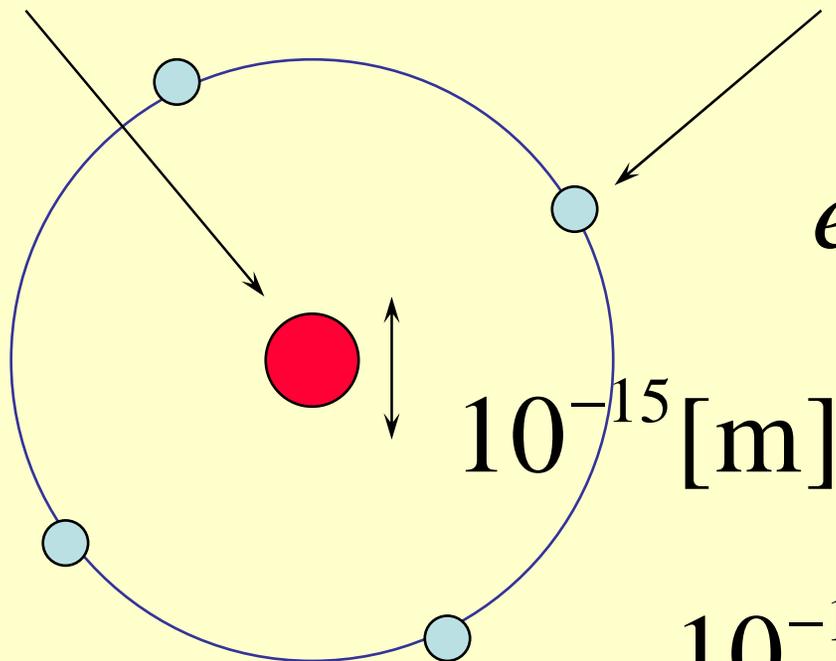


# 原子

原子(原子番号 $Z$ )

原子核(電荷 $Ze$ )

電子(電荷 $-e$ ) $Z$ 個



$$e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ [C]}$$

電気力により  
結合した系

# 電子・物質の性質

- 原子：電気力で電子と核が結合した世界
- 各種の化学反応，熱伝導，電気伝導，・・・電子の運動によっておきる
- 物質の性質：硬さ，色，熱伝導度，・・・電子が原子の世界でどう振舞うか
- 物質の性質：**電気力と原子が主役**

# 原子核

核子

陽子(p) +e Z個

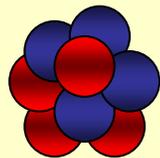


中性子(n) 0 N個



元素記号

炭素を表す



$10^{-15}$ [m]

質量数(Z+N)

12

原子番号(Z)

6

C

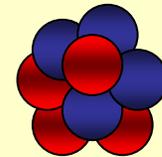
# 周期律表(元素の表)

元素の周期表

	1A	2A	3A	4A	5A	6A	7A	8	1B	2B	3B	4B	5B	6B	7B	0		
1	<sup>1</sup> H															<sup>2</sup> He		
2	<sup>3</sup> Li	<sup>4</sup> Be									<sup>5</sup> B	<sup>6</sup> C	<sup>7</sup> N	<sup>8</sup> O	<sup>9</sup> F	<sup>10</sup> Ne		
3	<sup>11</sup> Na	<sup>12</sup> Mg									<sup>13</sup> Al	<sup>14</sup> Si	<sup>15</sup> P	<sup>16</sup> S	<sup>17</sup> Cl	<sup>18</sup> Ar		
4	<sup>19</sup> K	<sup>20</sup> Ca	<sup>21</sup> Sc	<sup>22</sup> Ti	<sup>23</sup> V	<sup>24</sup> Cr	<sup>25</sup> Mn	<sup>26</sup> Fe	<sup>27</sup> Co	<sup>28</sup> Ni	<sup>29</sup> Cu	<sup>30</sup> Zn	<sup>31</sup> Ga	<sup>32</sup> Ge	<sup>33</sup> As	<sup>34</sup> Se	<sup>35</sup> Br	<sup>36</sup> Kr
5	<sup>37</sup> Rb	<sup>38</sup> Sr	<sup>39</sup> Y	<sup>40</sup> Zr	<sup>41</sup> Nb	<sup>42</sup> Mo	<sup>43</sup> Tc	<sup>44</sup> Ru	<sup>45</sup> Rh	<sup>46</sup> Pd	<sup>47</sup> Ag	<sup>48</sup> Cd	<sup>49</sup> In	<sup>50</sup> Sn	<sup>51</sup> Sb	<sup>52</sup> Te	<sup>53</sup> I	<sup>54</sup> Xe
6	<sup>55</sup> Cs	<sup>56</sup> Ba	<sup>57</sup> L	<sup>72</sup> Hf	<sup>73</sup> Ta	<sup>74</sup> W	<sup>75</sup> Re	<sup>76</sup> Os	<sup>77</sup> Ir	<sup>78</sup> Pt	<sup>79</sup> Au	<sup>80</sup> Hg	<sup>81</sup> Tl	<sup>82</sup> Pb	<sup>83</sup> Bi	<sup>84</sup> Po	<sup>85</sup> At	<sup>86</sup> Rn
7	<sup>87</sup> Fr	<sup>88</sup> Ra	<sup>89</sup> A															
			<sup>57</sup> L	<sup>58</sup> La	<sup>59</sup> Ce	<sup>60</sup> Pr	<sup>61</sup> Nd	<sup>62</sup> Pm	<sup>63</sup> Sm	<sup>64</sup> Eu	<sup>65</sup> Gd	<sup>66</sup> Tb	<sup>67</sup> Dy	<sup>68</sup> Ho	<sup>69</sup> Er	<sup>70</sup> Tm	<sup>71</sup> Yb	<sup>72</sup> Lu
			<sup>89</sup> A	<sup>90</sup> Ac	<sup>91</sup> Th	<sup>92</sup> Pa	<sup>93</sup> U	<sup>94</sup> Np	<sup>95</sup> Pu	<sup>96</sup> Am	<sup>97</sup> Cm	<sup>98</sup> Bk	<sup>99</sup> Cf	<sup>100</sup> Es	<sup>101</sup> Fm	<sup>102</sup> Md	<sup>103</sup> No	<sup>104</sup> Lr

# 核力

- 原子は電気力で結合していた
- 原子核は？（電気力では無理）
- 新しい力：**核力**が核子の間に働く



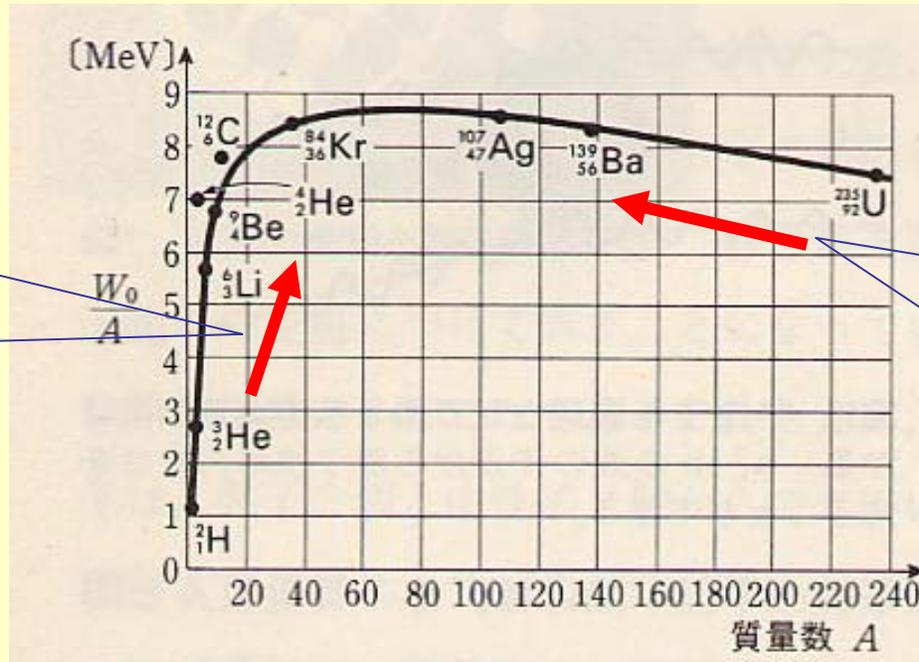
- 湯川秀樹：日本最初のノーベル物理学賞（1949年，中間子論により受賞）  
力は場であり，場は粒子である

# 核エネルギー

小さい核を結合させる

核融合

太陽のエネルギー源



大きい核を分解する

核分裂

原子核の核子1個あたりの結合エネルギー(質量欠損)

相対性理論

$$E = mc^2$$

よりエネルギーを取り出す

# 放射線

- 不安定な物質（放射性物質）崩壊して別の物質に変わる。そのとき放射線が出る。
- $\alpha$  線：ヘリウムの原子核
- $\beta$  線：電子（あるいは陽電子）
- $\gamma$  線：エネルギーの高い電磁波（光子）



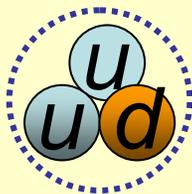
電荷のないニュートリノが出ている（パウリ：1930）⇒実験検証は1950年代

エネルギー収支が合わない

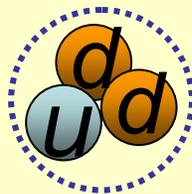
# 1930-50年代:不安定な「新」粒子 群の発見

- $\mu$  粒子:「重い電子」(電子と同じ性質, 約200倍の質量, 寿命 $2.2 \times 10^{-6}$ 秒)
- 各種のハドロン(他の粒子に崩壊する)  
⇒クォーク模型

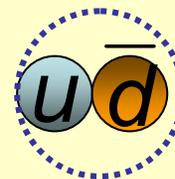
$p = uud$  (陽子)



$n = udd$  (中性子)



$\pi^+ = u \bar{d}$   
(パイ中間子)



# 標準模型：物質粒子

クォーク

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$$

電荷  
 $(2/3)e$   
 $(-1/3)e$

レプトン

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}$$

電荷  
0  
 $-e$

スピン1/2 のフェルミ粒子

すべて反粒子が存在する

# 標準模型：力の粒子とヒッグス

力は場であり，場は粒子である  
スピン1の(ベクトル)ボソン

強い力

$g$

グルオン

電磁気力

$\gamma$

フォトン(光子)

弱い力

$W^{\pm}$

$Z^0$

ウィークボソン

重力

グラビトン(重力子)

ヒッグス粒子



スピン0の  
スカラー粒子

「質量の起源」

未発見

# 理論の検証：実験

- 加速器による実験
  - 非加速器による実験
- ⇒さまざま種類の実験が世界中で行われている  
以下, 2, 3の例を示す
- (宇宙論・・・あとで)

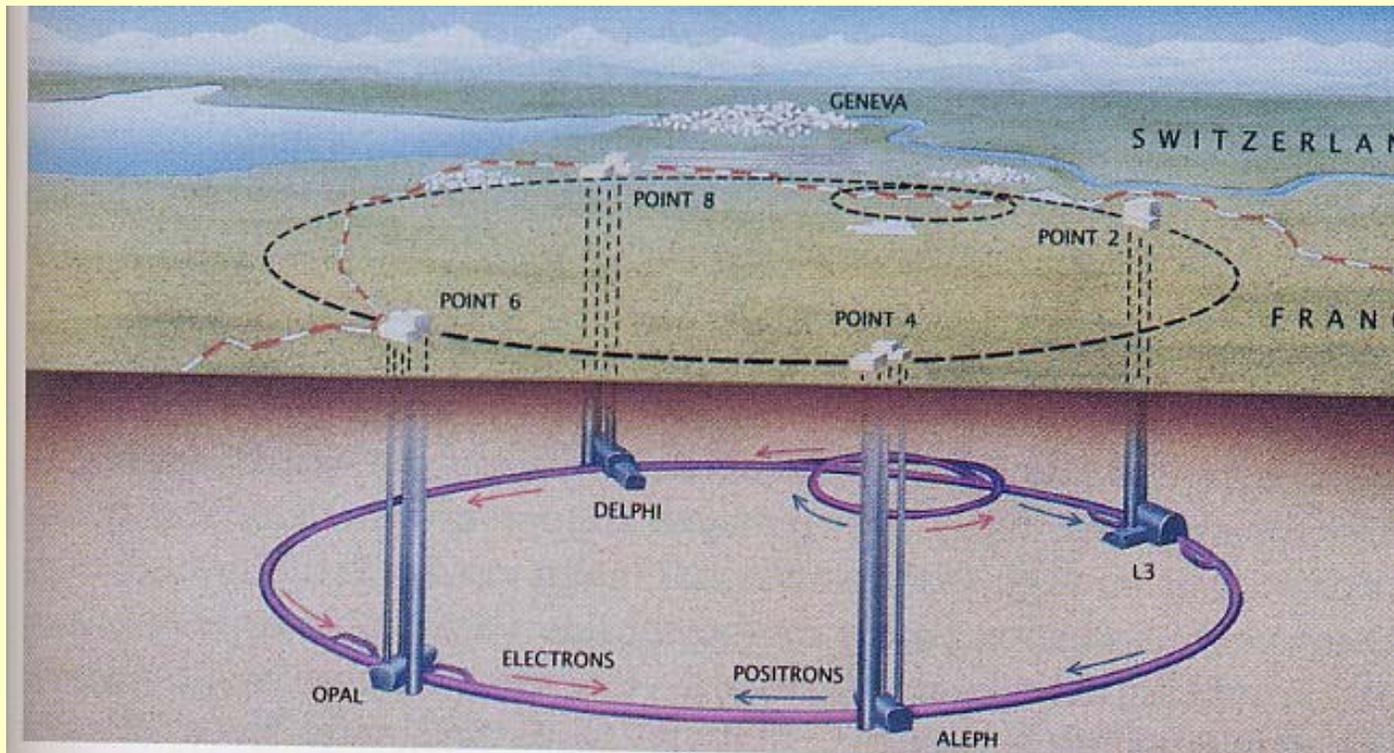
# 加速器

- 電磁気力で電子や陽子を加速し
  - (1) 標的に衝突させる
  - (2) 加速した粒子同士を衝突させる
- 衝突点の周りに精密な測定器を置き現象を測定し分析する
- 巨大な超精密機器：高度な技術の集積

# 現在稼働中の加速器(主要なもの)

名前	所在地	稼働	ビームの種類	エネルギー(GeV)
TEVATRON	シカゴ	87 ~	陽子+反陽子	1000x1000
HERA	ハンブルグ	92 ~	陽子+(陽)電子	920x30
RHIC	ニューヨーク	00 ~	核+核	100/核子
KEKB	筑波	99 ~	電子+陽電子	8x3.5
CESR	コーネル	79 ~	電子+陽電子	6x6
PEP-II	スタンフォード	99 ~	電子+陽電子	9x3
VEPP-2000	ノボシビルスク	03 ~	電子+陽電子	1x1
BEPC	北京	89 ~	電子+陽電子	2.2x2.2
DAΦNE	フラスカッチ	99 ~	電子+陽電子	0.5x0.5

# LEP (ジュネーブ, CERN)

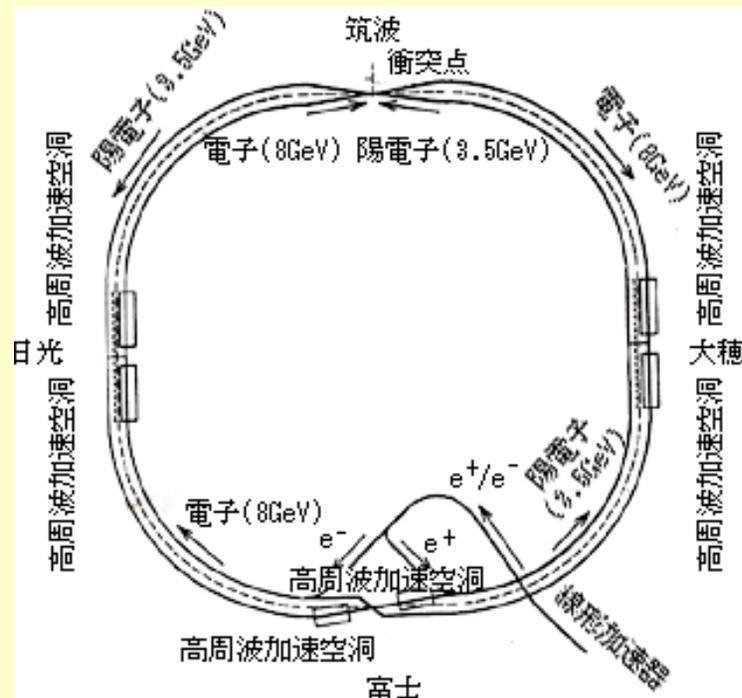


電子・陽電子衝突型加速器(周長27km, 地下100mに設置)  
1860億電子ボルトの重心系エネルギー 2000. 11まで稼動

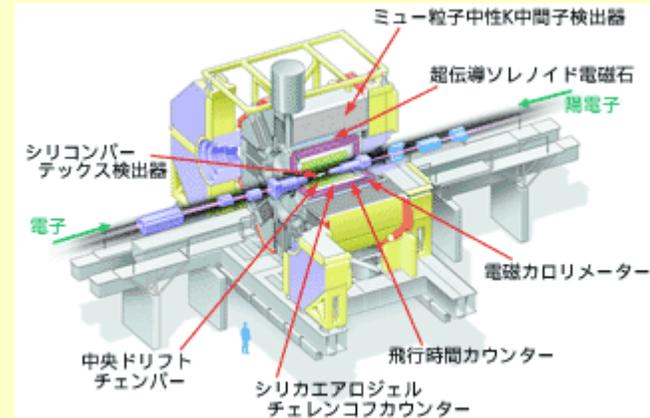
# KEK(つくば)Bファクトリー



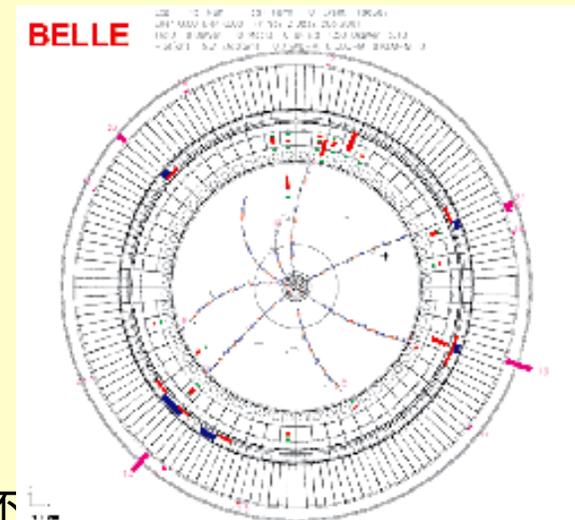
周が約3km、直径が約1km。  
電子リング(80億電子ボルト加速器)と陽電子リング(35億電子ボルト加速器)の2つのリング。  
B中間子と反B中間子の対を大量に作り出して研究するのでBファクトリー(Bの工場)と名付けられている。



# BELLE測定器 (Bファクトリー)



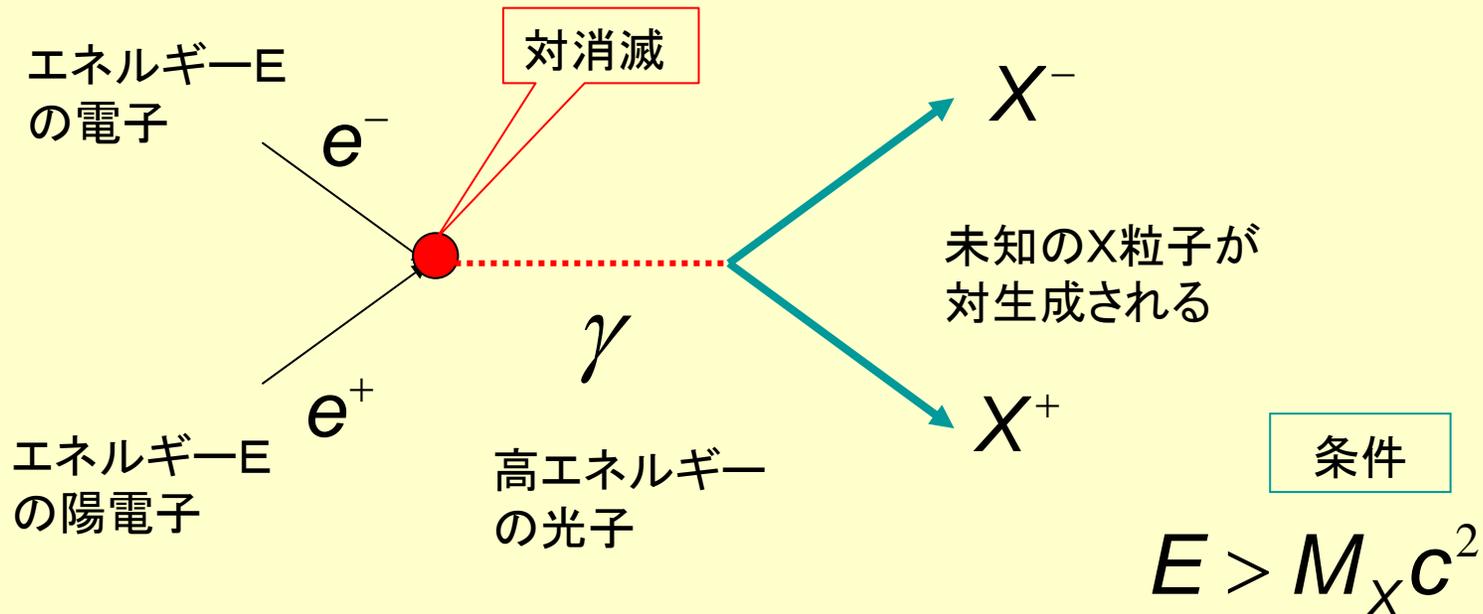
測定器は巨大な精密機器である。開発と運用は多人数の研究者チームによりなされ (BELLEは約400名), 数年から10年程度実験が続く。測定結果はコンピュータを駆使して解析される。



# 高エネルギー反応

なぜ、高いエネルギーが必要か

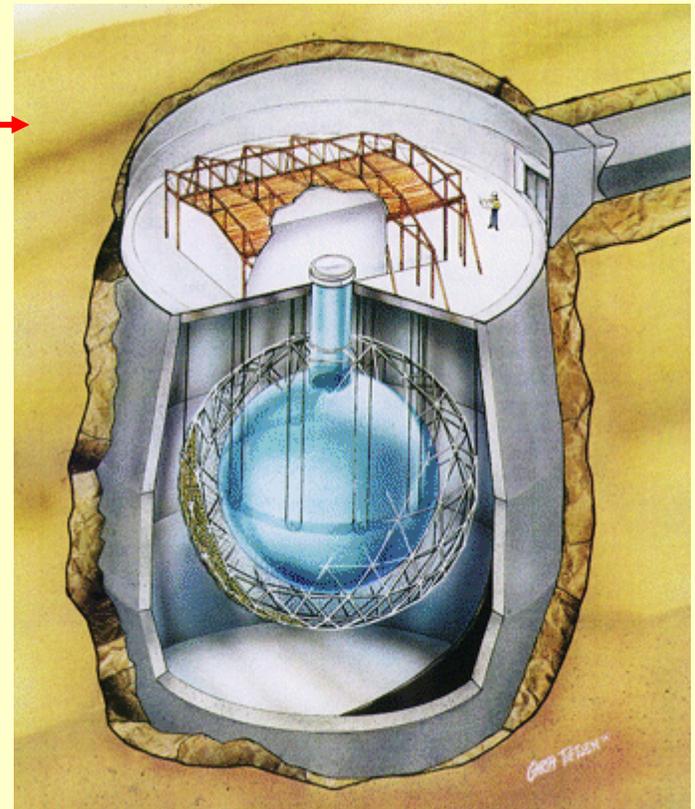
⇒  $E=mc^2$  により未知の粒子を発生させる



# ニュートリノ測定装置

SAGE  
GALLEX/GNO  
Homestake  
Kamiokande+SuperK  
SNO  
BOREXINO  
KamLAND  
TPC  
MUNU  
XMASS  
LENS  
CLEAN  
HERON  
SIREN  
MOON

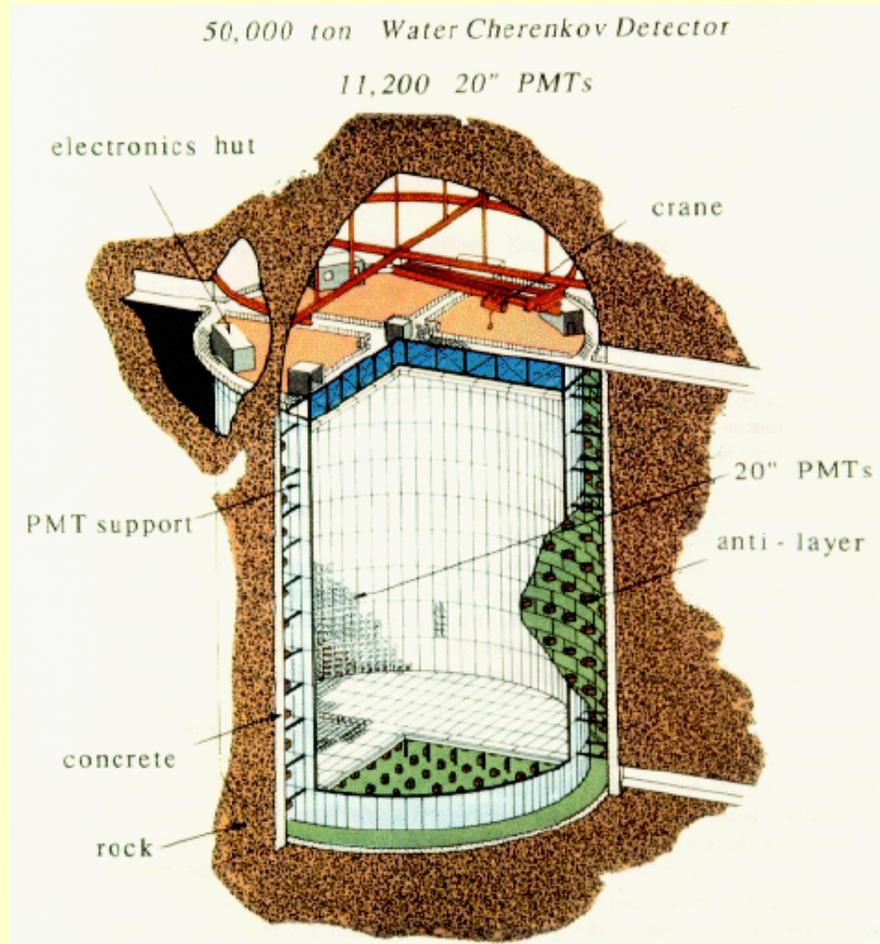
重水1000トン, 水7000トン, 地下  
2000m, Sudbury(カナダ)



・・・多数(計画中含む)

工学院大学の学生のみ利用可:印刷不可:再配布不可 (C)加藤潔 2006

# スーパーカミオカンデ



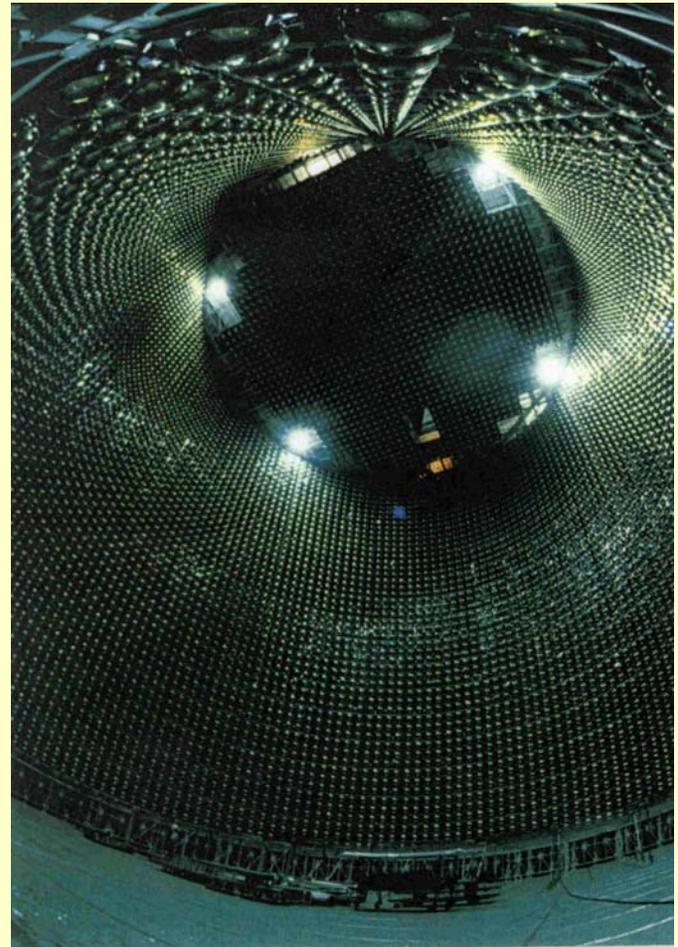
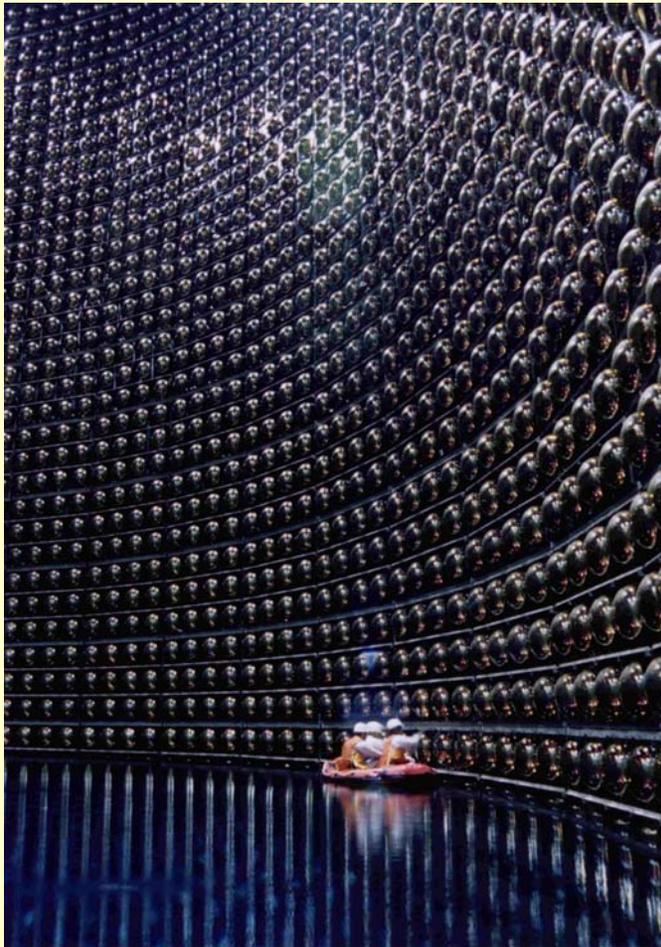
41.4m(高さ)x 39.3  
m(直径)の円筒形

純水50,000トン

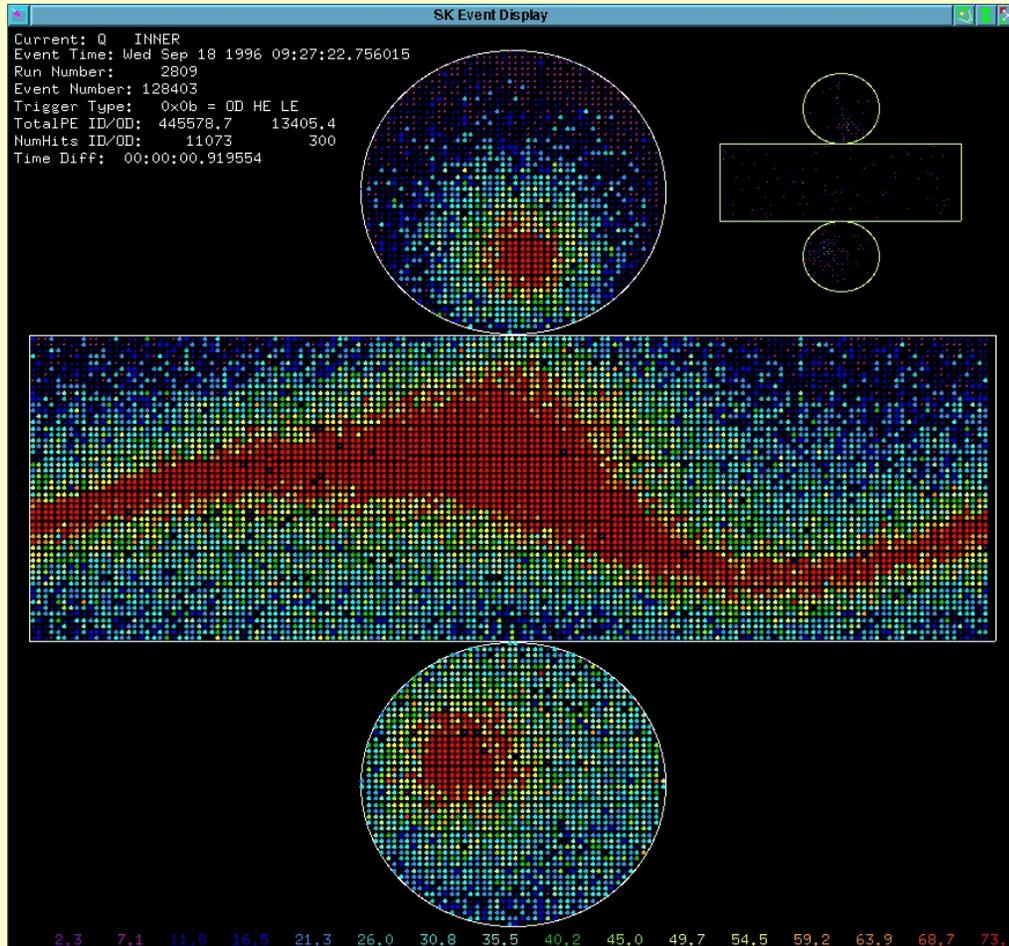
光センサー光電子  
増倍管(直径50cm)  
11,200本

岐阜県吉城郡神岡  
町(神岡宇鉱業  
地下1,000m)

# SK: 円筒内部の光電管



# SK: 測定の実例



円筒形の測定器の展開図。

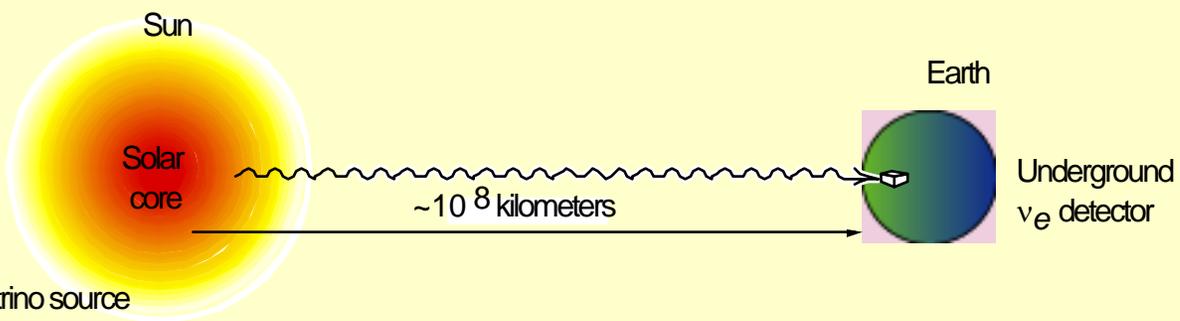
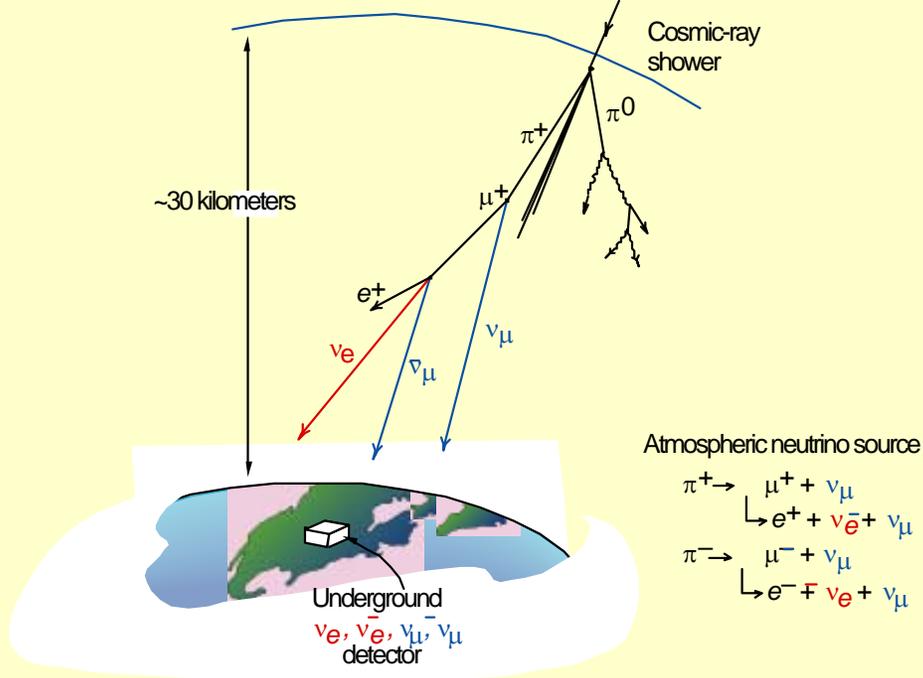
色は、光電管の信号を表す。

# ニュートリノ

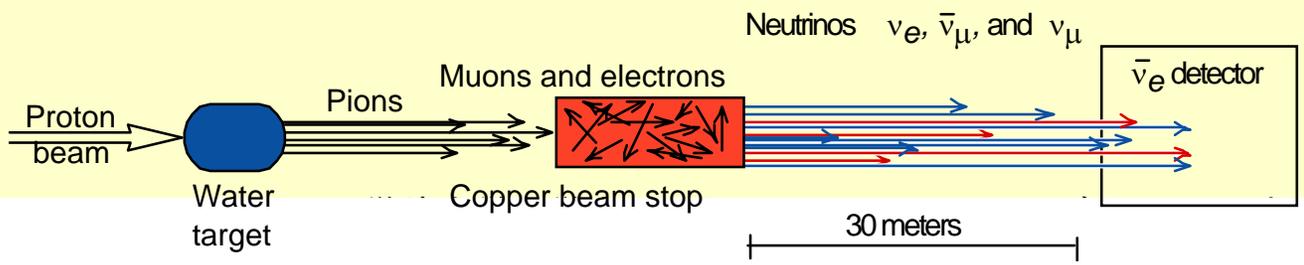
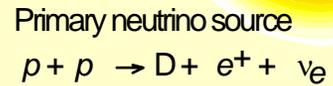
- 電荷0で、物質との相互作用が弱い。⇒地球でも通り抜ける。  
(注)人ごみの通り抜け方
  - \* 殴り倒して通る
  - \* 間をすりぬけて通る質量は非常に小さい。
- 小柴先生：2002年ノーベル賞受賞「ニュートリノ天文学」

# ニュートリノの源

## 大気ニュートリノ high energies



## 太陽ニュートリノ low energies



## 原子炉や加速器から



1987年2月23日、カミオカンデは大マゼラン星雲で起きた超新星爆発に伴うニュートリノ11例を世界で始めて観測に成功。ニュートリノ天文学の幕開けである。

超新星爆発は太陽よりも重い恒星がその一生を終えるときに起こす大爆発である。爆発の際、太陽の45億年分のエネルギーのさらに1000倍という天文学的なエネルギーを放出する(右:爆発前、左爆発後)。エネルギーの99%は約10秒間にニュートリノとして放出される。

### カミオカンデが捉えた超新星のデータ

