

2019/04/23  
名古屋大学

# 素粒子物理学の歩み

小林 誠

## 物理学の進展

古典力学      1687    ニュートン 「プリンキピア」

電磁気学      1861    マクスウェル方程式

相対性理論    1905    アインシュタイン 特殊相対性理論

量子力学      1925    ハイゼンベルグ、シュレーディンガー

→ 1930～ 素粒子物理学の誕生

# 仁科芳雄

1890年12月6日 岡山県里庄町にて誕生

1918年 東京帝国大学卒業

1921年 キャベンディッシュ研究所

1922年 ゲッチンゲン大学

1923年 コペンハーゲン

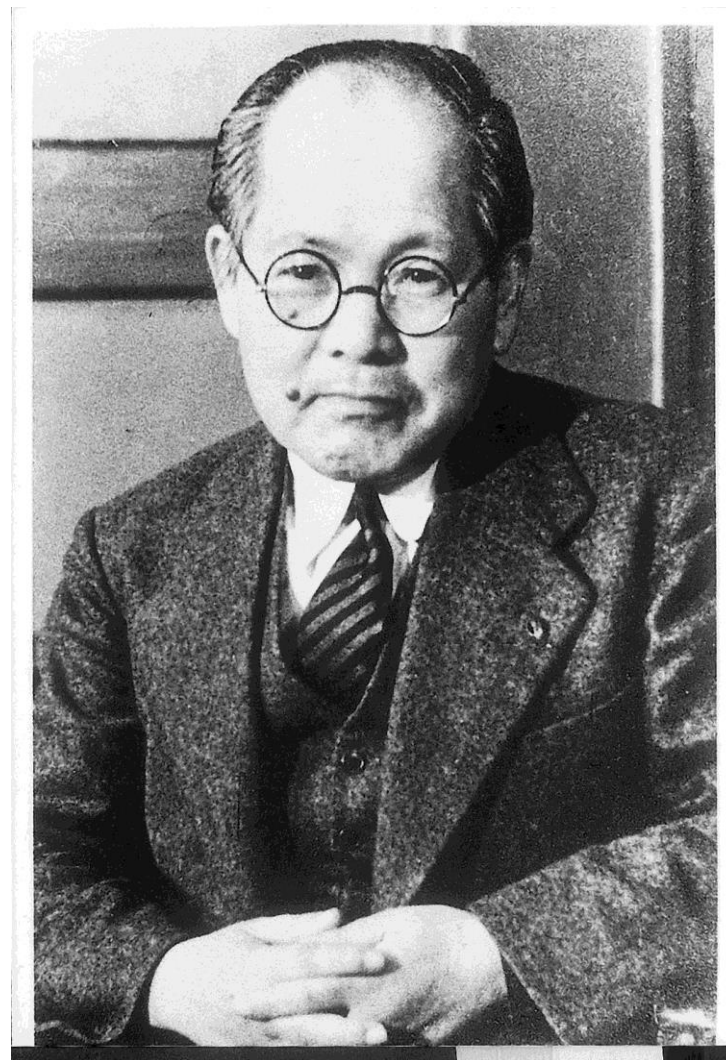
1928年 クライン・仁科の公式

1928年 帰国

1932年 理研仁科研究室

1946年 文化勲章受章

1951年 逝去



仁科記念財団提供

# 量子力学と相対性理論

シュレーディンガー方程式 : 量子力学の基礎方程式

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(\mathbf{x}) = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial \mathbf{x}^2} \psi(\mathbf{x}) \quad \longleftrightarrow \quad E = \frac{p^2}{2m}$$

↓ 相対論化

ディラック方程式 (1928)

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(\mathbf{x}) = \left( \frac{\hbar c}{i} \vec{\alpha} \cdot \frac{\partial}{\partial \vec{x}} + \beta mc^2 \right) \psi(\mathbf{x})$$

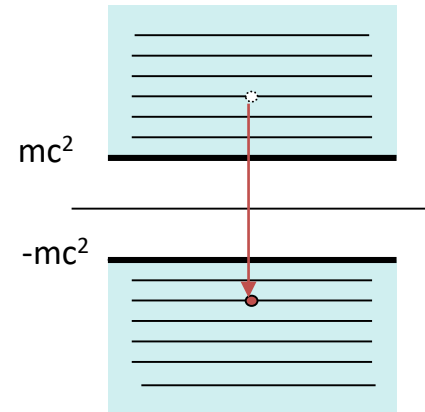
ディラック方程式の解

正のエネルギー

$$E = \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4} \geq mc^2$$

負のエネルギー

$$E = -\sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4} \leq -mc^2$$



## ディラックの空孔理論

負エネルギーの状態は電子が占有

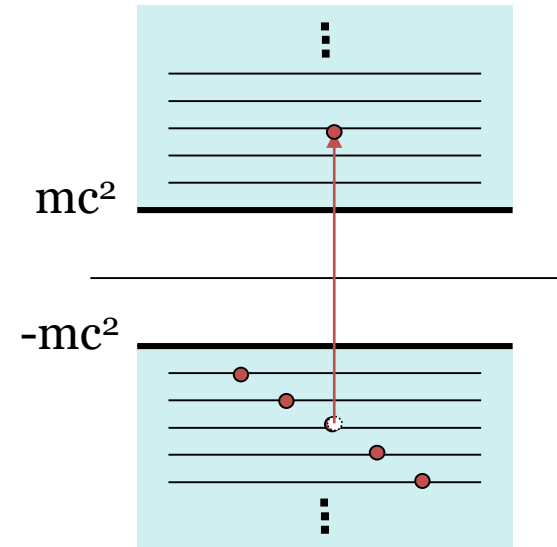
→ 正エネルギー電子は安定

負エネルギーの状態の空孔

→ 正電荷、正エネルギーの粒子

陽電子 (電子の反粒子)

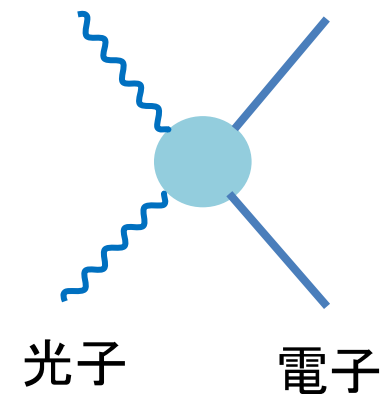
1932 アンダーソン 陽電子の発見



1928 クライン・仁科の公式

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{e^4}{2m^2c^4} \frac{v'^2}{v^2} \left( \frac{v}{v'} + \frac{v'}{v} - \sin^2 \theta \right)$$

電子をディラック方程式を使って記述



湯川

朝永

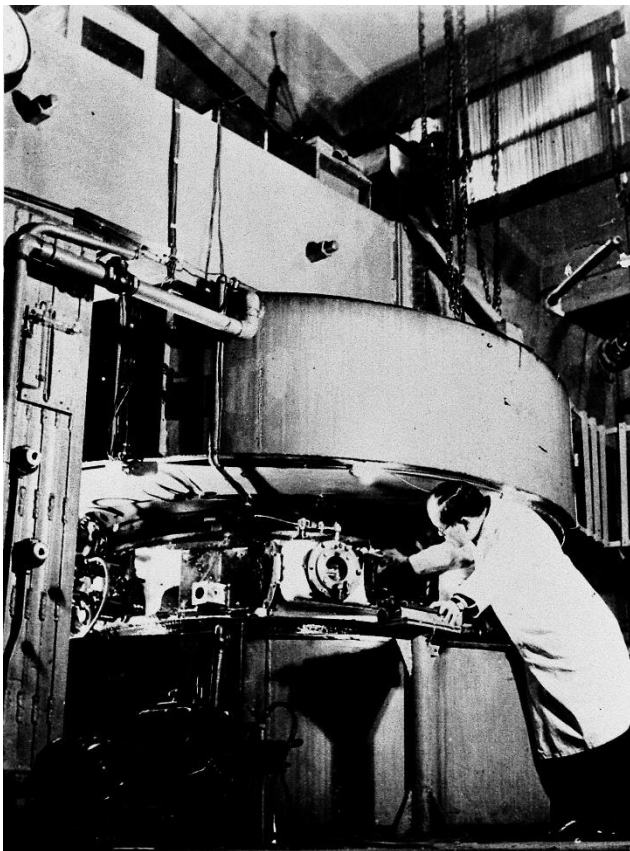


仁科

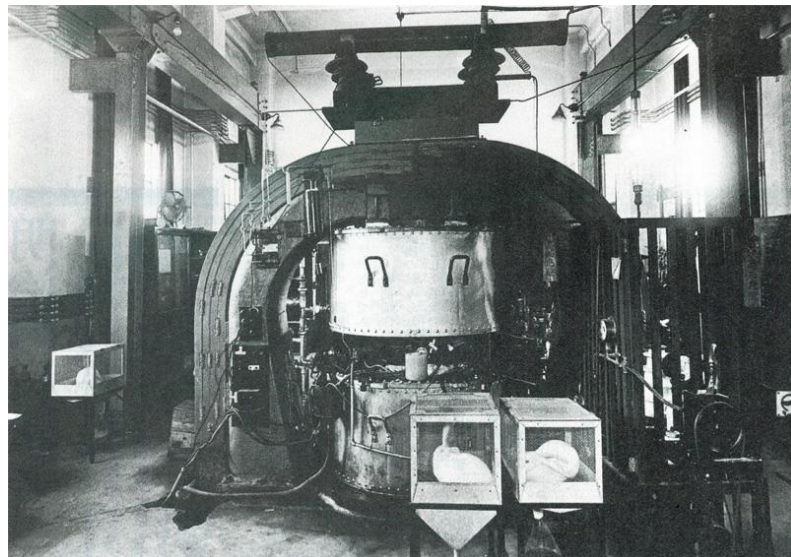
仁科記念財団提供



1937年  
26インチサイクロトロン建設



仁科記念財団提供



仁科記念財団提供

1943年  
60インチサイクロトロン建設



1945年12月24日発行の「LIFE」誌  
理研サイクロトロン解体東京湾投棄  
の記事が掲載された

著作権等の都合により、  
ここに挿入されていた画像を削除しました

1945年12月24日発行の「LIFE」誌  
理研サイクロトロン解体東京湾投棄の記事の画像

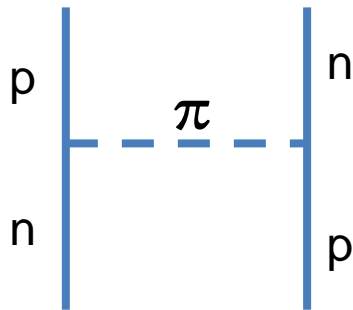
著作権等の都合により、  
ここに挿入されていた画像を削除しました

鎌田甲一、「仁科博士とその時代1」 Isotope News 2004年1月号より  
駒込の理化学研究所全景の画像



1932 チャドウィック 中性子の発見

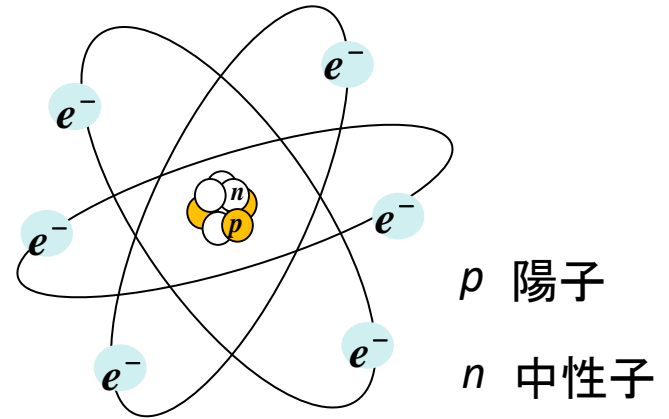
1935 湯川秀樹 中間子論



湯川ポテンシャル

$$V(r) \propto \frac{e^{-r/m}}{r}$$

$$m \approx 100\text{MeV}/c^2$$



湯川秀樹 (1907-1981)

1929 京都帝国大学卒業

1935 中間子論

1949 ノーベル物理学賞



名古屋大学坂田記念室提供

1935 湯川理論の発表

1937 宇宙線中に中間質量( $\sim 100\text{MeV}/c^2$ )の新粒子発見

湯川粒子の持つべき性質と合わない

1942 二中間子論 (坂田・井上)

湯川粒子と宇宙線の新粒子は別物

1947 湯川粒子の発見 ( $\pi - \mu$  崩壊の発見)

$$\pi \rightarrow \mu + \nu$$

equation of Dirac 型であることも断言出来ませんし, like particle と unlike particle の force の equality と 既述の文章から一貫性のある理論を構築することには色々の意味を困難です。

(完全な理論は Selbstenergie の問題が space time の quantisation の問題が解かれねばならないと疑わなければならない) といふことは, Zeitschrift にもあるところの March といふ人のやり方は, 改良可能なものとしての理論をいかに考へて居るかと信じ、いふ所にも、新しい particle の Bose の statistics に従って, field の意味を有するもの、これは通常の light quantum と相違なく素粒子の analogy を有するところから (heavy electron といふものもある heavy quantum といふものもある) といふことである。Maxwell の field equation と相違なく linear 形式を導き出すことができるものかとも思ひます。信じ、その粒子の analogy の理論を構築することは勿論疑問です。

右著者の理論が素粒子理論の範囲内では色々の effect の

## 原子核のベータ崩壊

原子核中で  $n \rightarrow p + e^{-} + \bar{\nu}$

1933 フェルミ理論

## 相互作用の種類

• 強い相互作用

• 電磁相互作用

• 弱い相互作用

• 重力相互作用

核力 湯川理論

ベータ崩壊を引き起こす



相対性理論  
量子力学

場の量子論

### 発散の困難

摂動計算で中間状態を足し上げると  
無限大の量が現れる

1947 朝永・シュヴィンガー・ファインマン

電磁相互作用の繰りこみ理論

発散の困難を回避

朝永振一郎 (1906-1979)

1029 京都帝国大学卒業

1931 仁科研究室

1965 ノーベル物理学賞

### 繰りこみ理論の進展

電磁相互作用

弱い相互作用

強い相互作用

朝永ら 1947  
(可換)ゲージ理論

トフーフト、ヴェルトマン 1971  
非可換ゲージ理論

# 新粒子の発見 1947~

ハドロン	<b>p</b>	<b><math>\Lambda</math></b>	<b><math>\Xi^{-0}</math></b>
	<b>n</b>	<b><math>\Sigma^{\pm 0}</math></b>	
	<b><math>\pi^{\pm 0}</math></b>	<b><math>K^{+0}</math></b>	<b><math>\bar{K}^{-0}</math></b>
レプトン	<b><math>e^{-}</math></b>	<b><math>\mu^{-}</math></b>	
	<b><math>\nu</math></b>		

奇妙な(ストレンジ)粒子

ハドロン:強い相互作用をする粒子

レプトン:強い相互作用をしない粒子

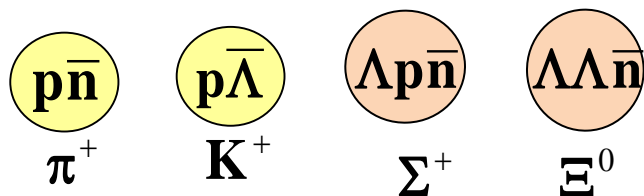
バリオン:陽子の仲間

メソン:パイ粒子の仲間

## 坂田模型 1956

ハドロンは複合粒子

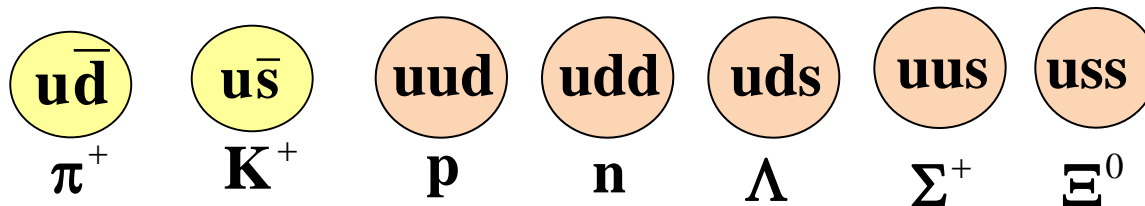
基本粒子: **p n  $\Lambda$**



名古屋大学坂田記念室提供

## クォーク模型 ゲルマン 1964

基本粒子: **u d s**  
 $2/3e$   $-1/3e$   $-1/3e$



坂田昌一 1911-1970

1933 京都帝国大学卒業

1933 仁科研究室

1942 名古屋大学教授

## 自発的対称性の破れ

システムの持つ対称性を  
基底状態(真空)が破る

- ・ 南部・ゴールドストーン粒子 ( $m=0$ )
- ・ ヒッグス機構 (ゲージ場がある場合)



素粒子の標準模型や物性物理において  
重要な役割



南部陽一郎 (1921-2015)

1943 東京帝国大学卒業  
1950 大阪市立大学教授  
1954 シカゴ大学教授  
2008 ノーベル物理学賞

# パリティの破れの発見

弱い相互作用は空間反転に対し不変でない

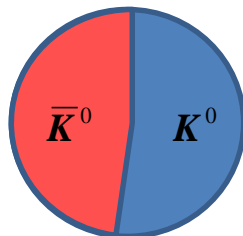
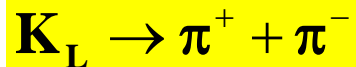
1956 リー・ヤン

1957 ウー                      コバルト60の実験

# CP対称性の破れの発見

粒子と反粒子に本質的違いがある

1964 クローニン・フィッチ ら



$K_L$  は  $K^0$  と  $\bar{K}^0$  の「重ね合わせ」  
 $K^0$  成分が少し多い

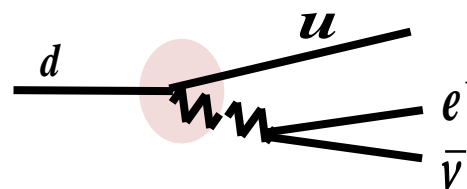
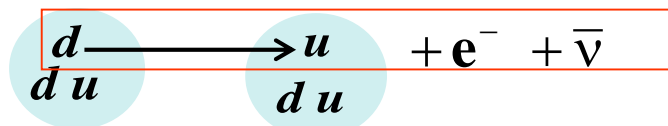
すべての粒子に対応する  
反粒子が存在

- 質量は同じ
- 電荷は符号が反対

電子  $e^-$   $\Leftrightarrow$  陽電子  $e^+$   
陽子  $p$   $\Leftrightarrow$  反陽子  $\bar{p}$   
中性子  $n$   $\Leftrightarrow$  反中性子  $\bar{n}$

## 中性子の $\beta$ 崩壊

中性子  $\rightarrow$  陽子 + 電子 + 反ニュートリノ



1968 ワインバーグ・サラム・グラシヨウ理論

電磁相互作用と統一的に弱い相互作用 ( $\beta$ 崩壊など) を記述

1971 トフーフト・ヴェルトマン： 繰りこみ可能の証明

1973 QCD理論

強い相互作用を記述

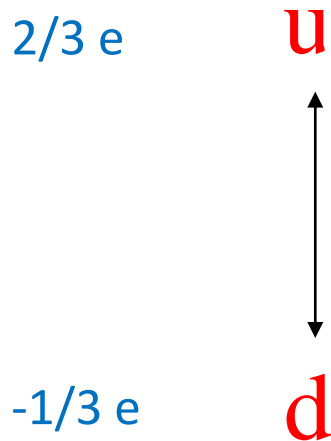
$\longrightarrow$  素粒子の標準理論

## 1973 小林・益川

CP の破れをいかにこの枠組みで説明するか

分かったこと

- 3 ~ 4 種のクォークの最小の系では不可能
- 未知の粒子が存在する
- 一つの可能性として 6 元クォーク模型



# 素粒子の標準模型

## 基本粒子

クォーク	u	c	t
	d	s	b
レプトン	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$
	e	$\mu$	$\tau$

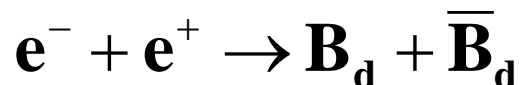
## 相互作用

電磁相互作用	}	ワインバーグ・サラム・グラシヨウ理論
弱い相互作用		
強い相互作用		QCD理論



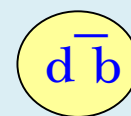
- CPの破れが6-クォークのメカニズムで起きていること

## B ファクトリー

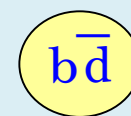


- 電子・陽電子衝突型加速器
- B中間子を工場のように大量に作る
- 電子と陽電子のエネルギーが異なる非対称型

## B中間子



$B_d$



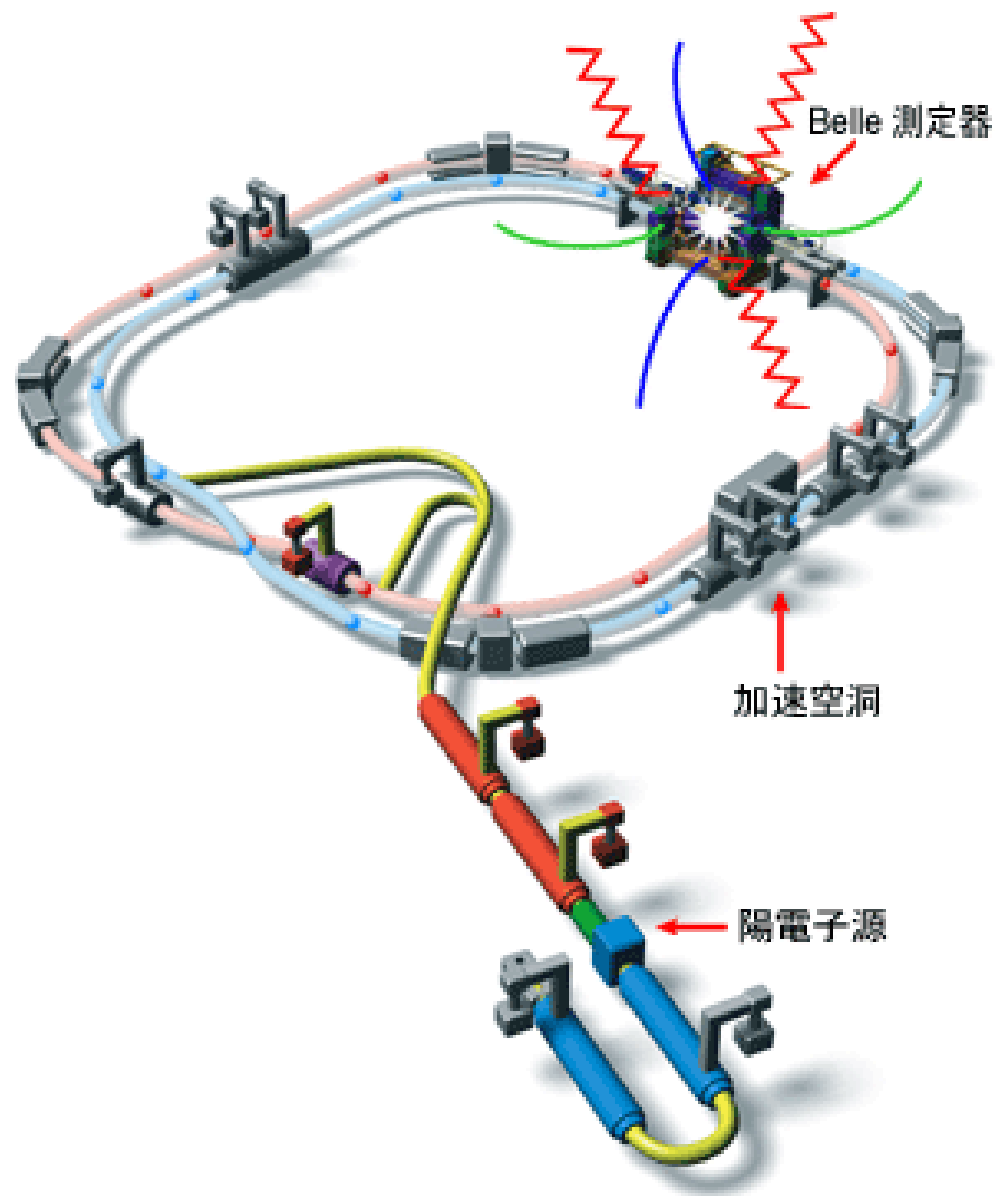
$\bar{B}_d$

## KEK(つくば)とSLAC(米国)に建設

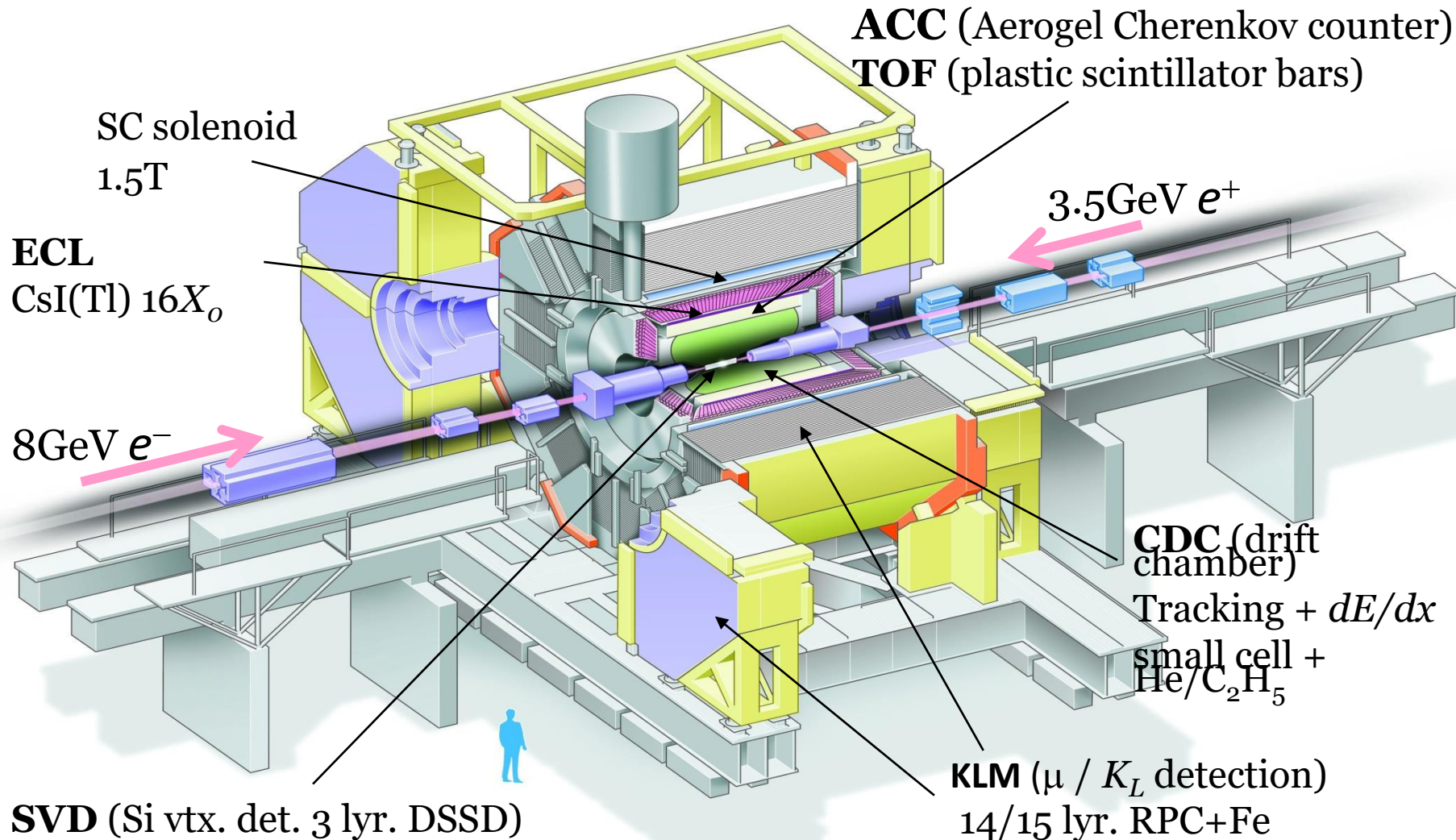
- 1994 建設開始
- 1999 実験開始
- 2001 実験的検証に成功



高エネルギー加速器研究機構提供



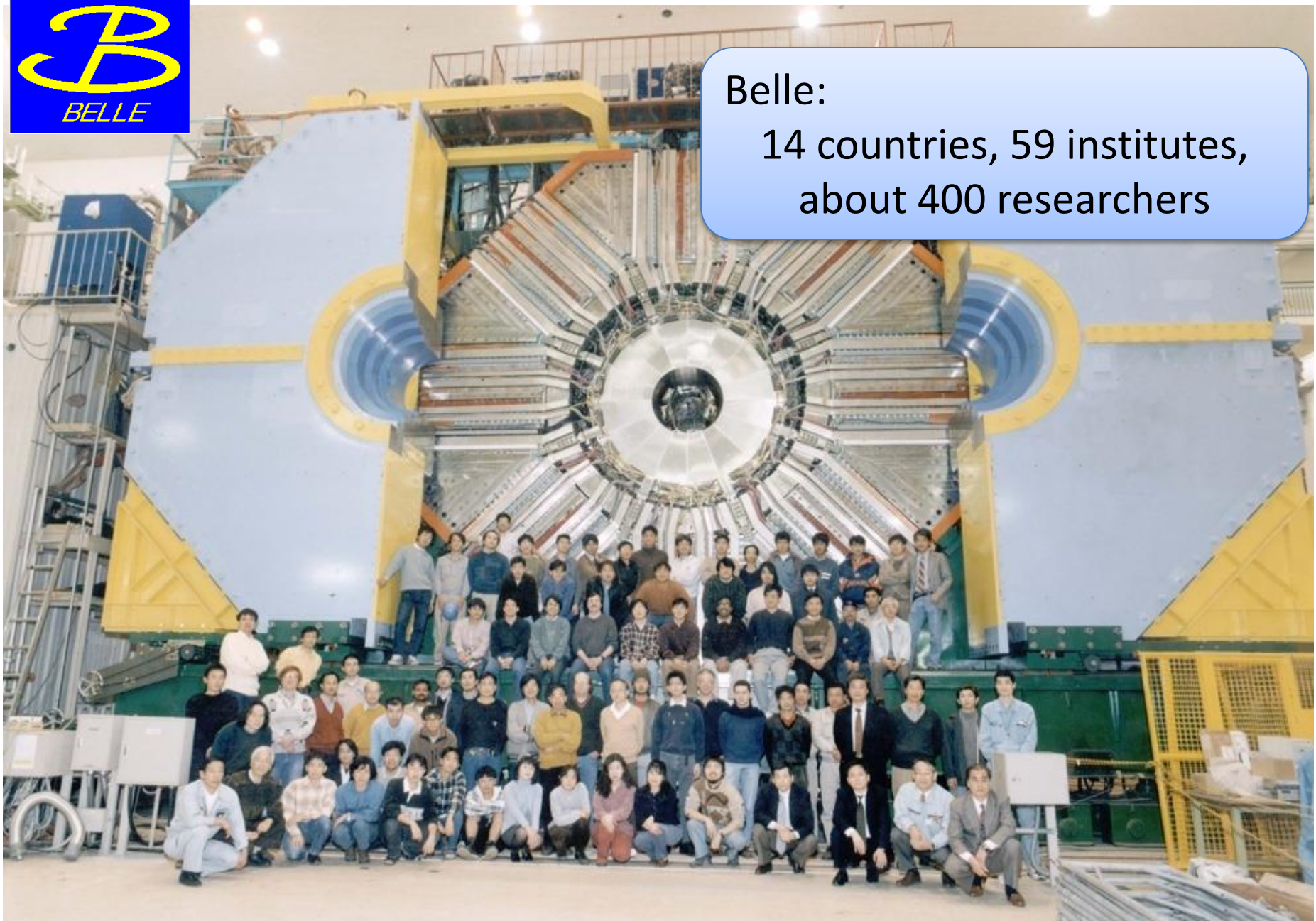


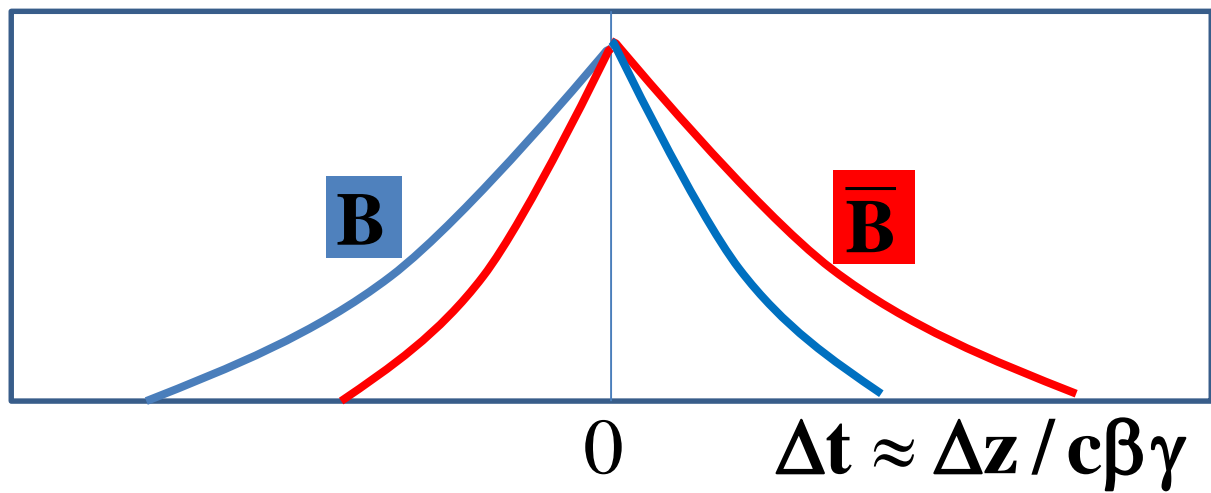
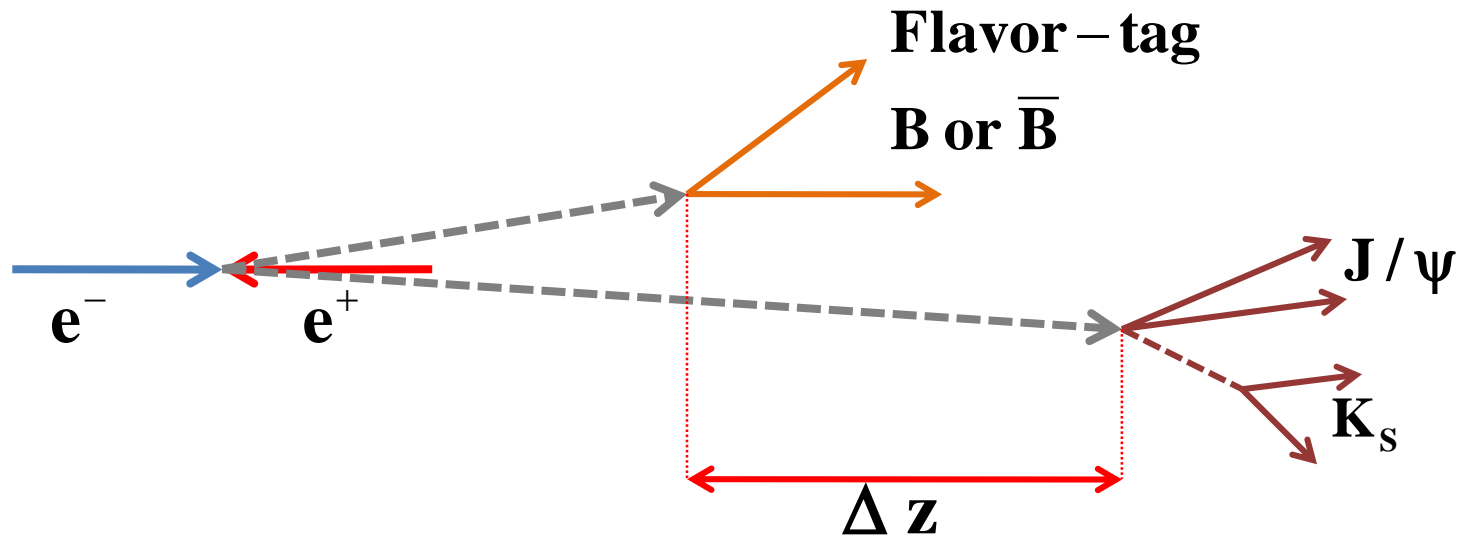
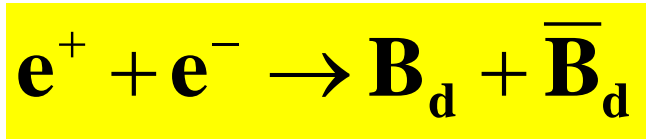


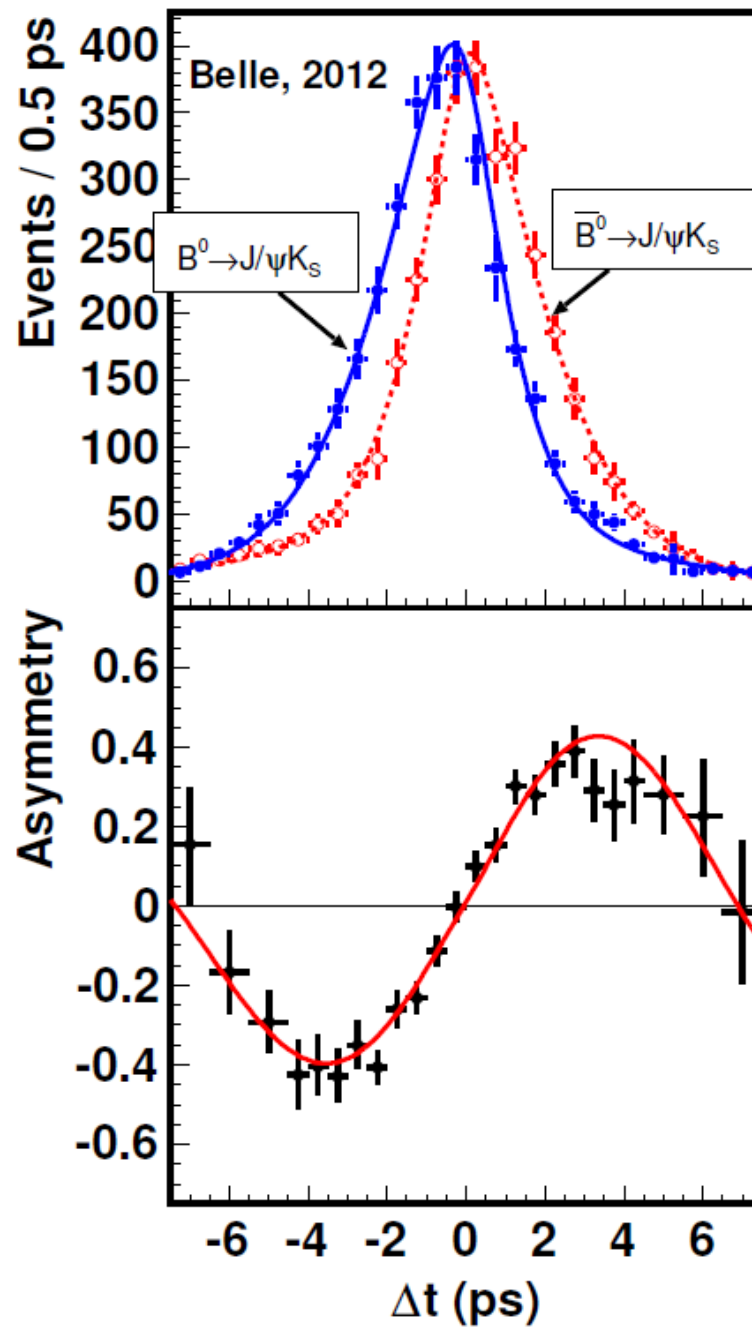


Belle:

14 countries, 59 institutes,  
about 400 researchers









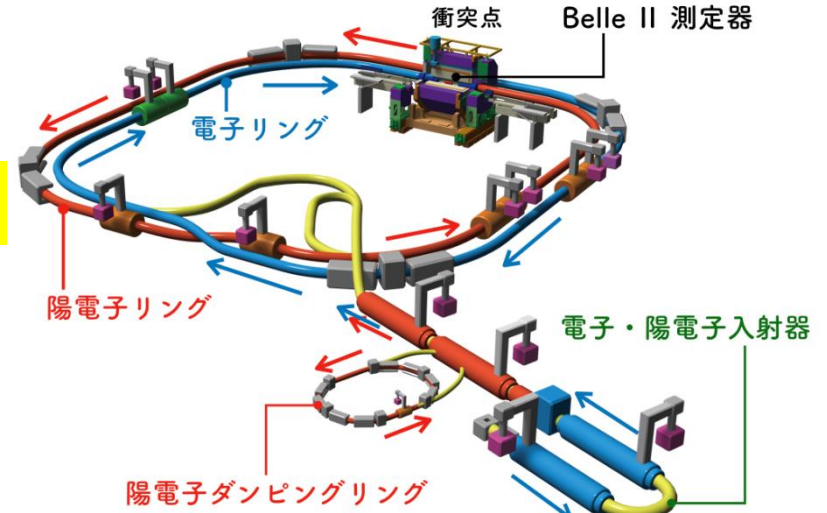
- 実験室で測定できるCP対称性の破れの主要な部分は6元模型で説明できる

- 宇宙の反物質の問題は未解明

- 未知のCP対称性の破れの機構を探索するための実験が進められている  
B中間子崩壊の精密測定、ニュートリノ振動など

# Super KEKB

40 times higher luminosity



高エネルギー加速器研究機構提供

## Belle-II Collaboration

23 countries/regions

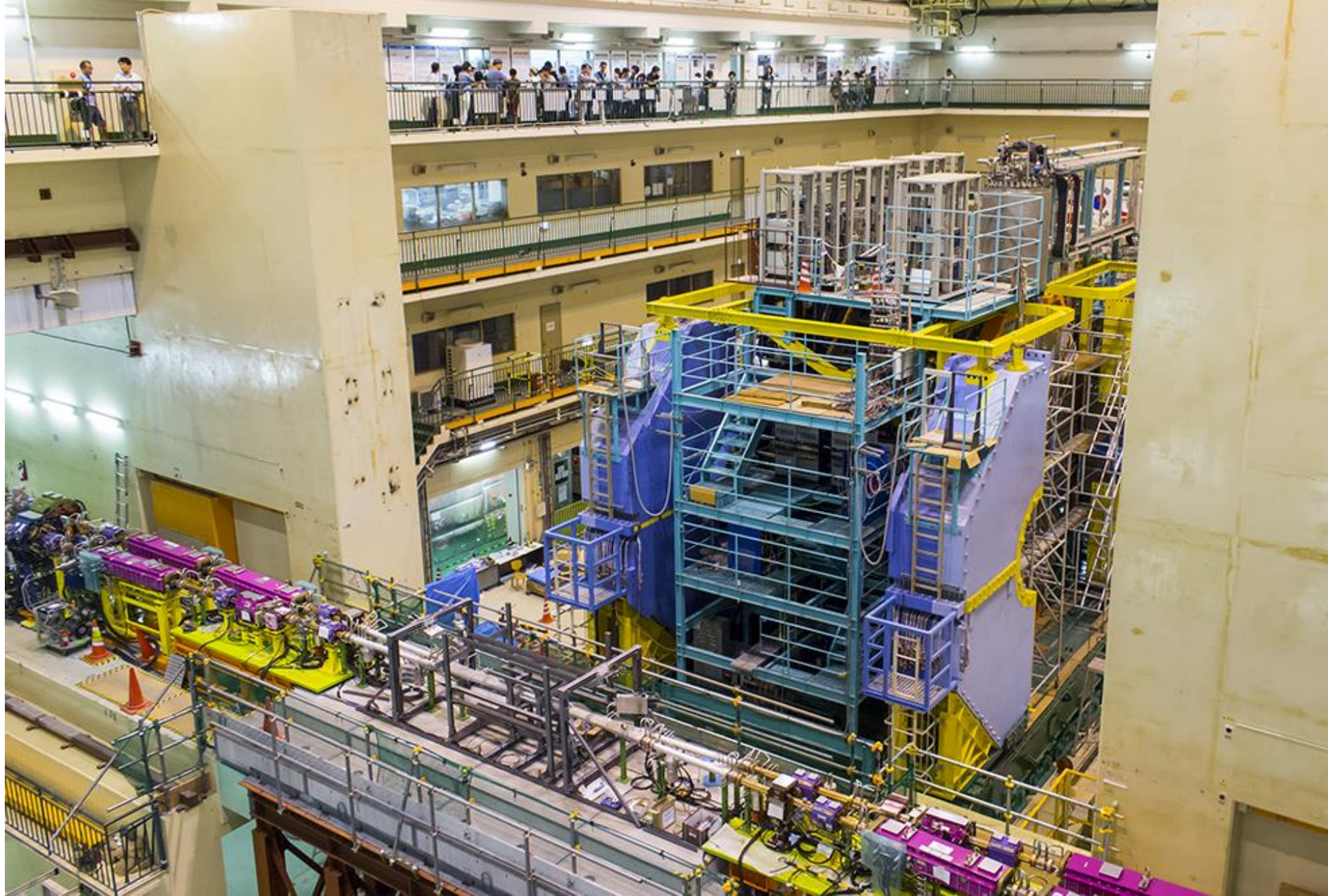
101 institutions

>750 scientists

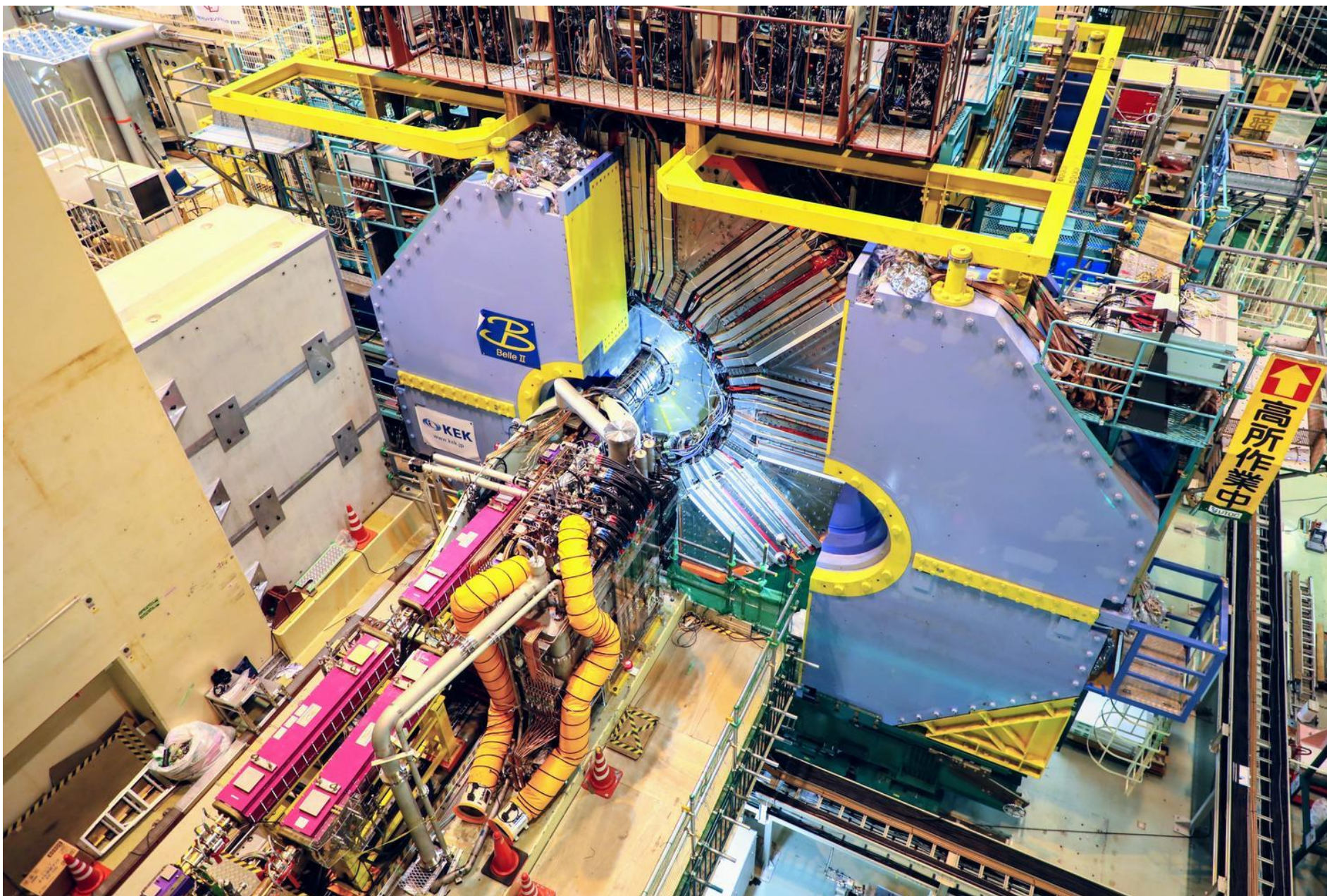
データ取得再開



高エネルギー加速器研究機構提供

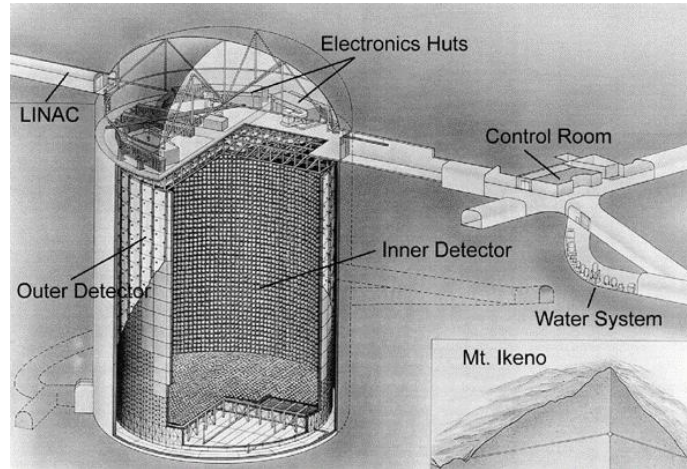


高エネルギー加速器研究機構提供



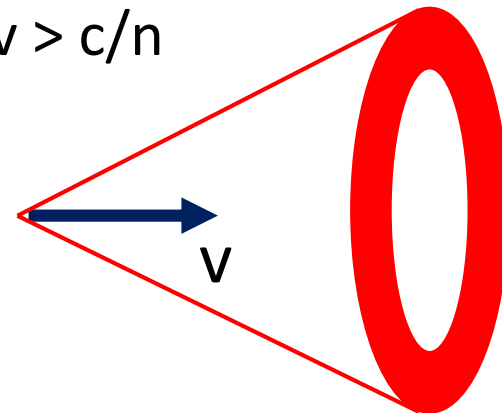
高エネルギー加速器研究機構提供

カミオカンデ 1983完成  
スーパーカミオカンデ 1996完成



Nucl.Instrum.Meth.A501(2003)418-462  
Y.Fukuda et al.(Super-Kamiokande Collaboration)

チェレンコフ光  
 $v > c/n$



- 当初の目的: 陽子崩壊  $p \rightarrow e^+ + \pi^0$

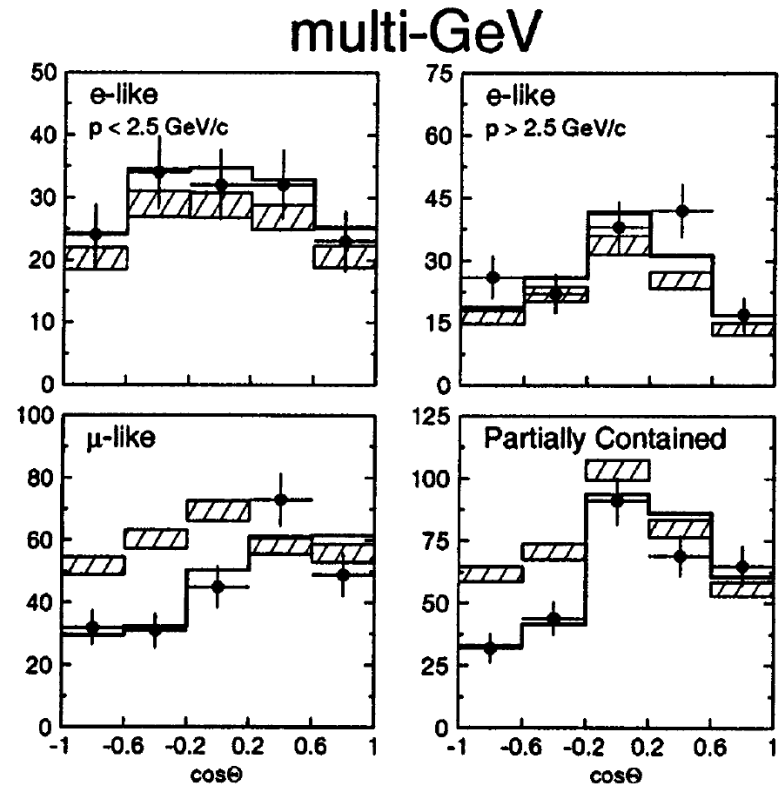
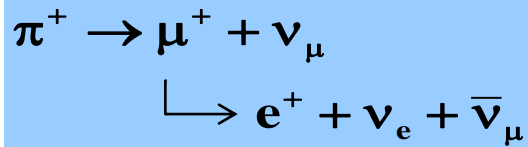
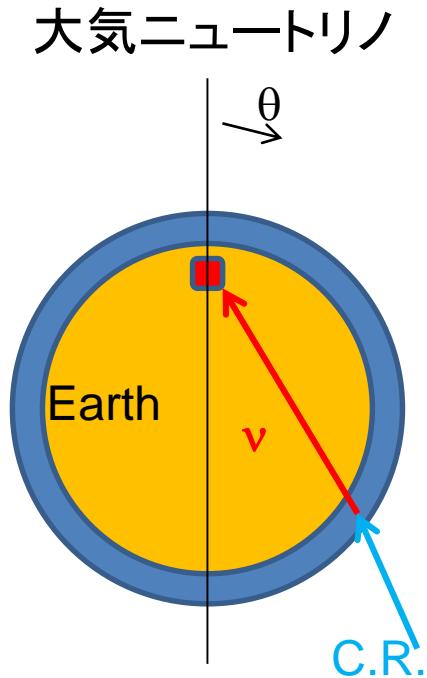
- 1987 SN1987Aからのニュートリノを検出

ニュートリノが水と衝突して  
電子が発生

小柴昌俊 1926-

1951 東京大学卒業  
1955 PhD. ロチェスター大  
2001 ノーベル物理学賞

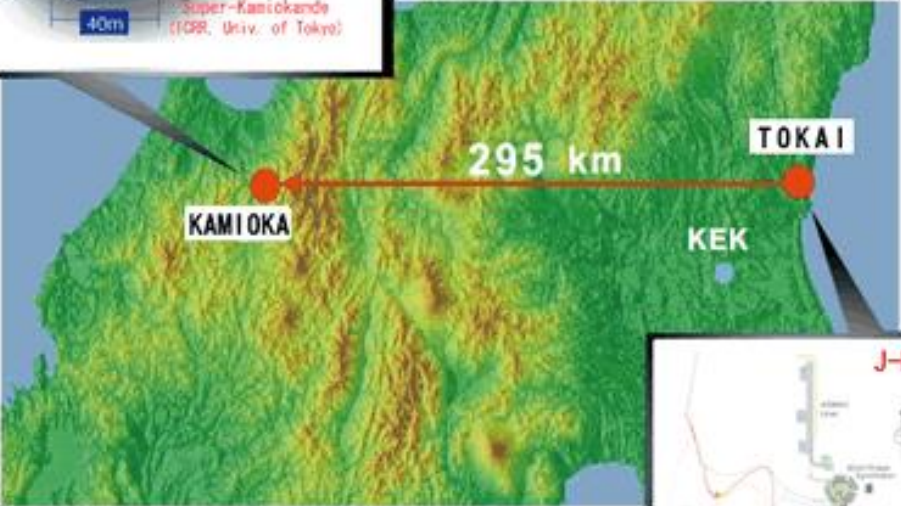
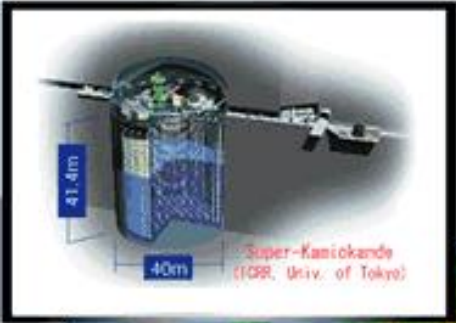
# 1998 大気ニュートリノにおけるニュートリノ振動の発見



Fukuda et al. Phys.Rev.Lett.(1998) 1562

梶田隆章 (1959- )  
2015 ノーベル物理学賞  
戸塚洋二 (1942-2008)

# T2K experiment



高エネルギー加速器研究機構提供

$\nu_{\mu}$  created at JPARC  
→ Super-K

高エネルギー加速器研究機構提供