

超伝導技術が拓く 先端加速器科学

山本 明 (KEK)

KEK 公開講座
筑波大学・春日キャンパス 2009年 10月17日

講演の内容

■ はじめに

- 高エネルギー加速器が探る宇宙のはじまりと歴史
- エネルギーフロンティアを担う先端技術、『超伝導』

■ 超伝導技術が拓く加速器科学

- 超伝導って何?
- 粒子加速器、物理実験を先導する超伝導技術
- 将来への夢:国際リニアコライダー計画の実現にむけて
- 宇宙、エネルギー、社会生活の未来を担う超伝導
- まとめ

高エネルギー加速器研究機構: KEK



全国大学共同利用機関

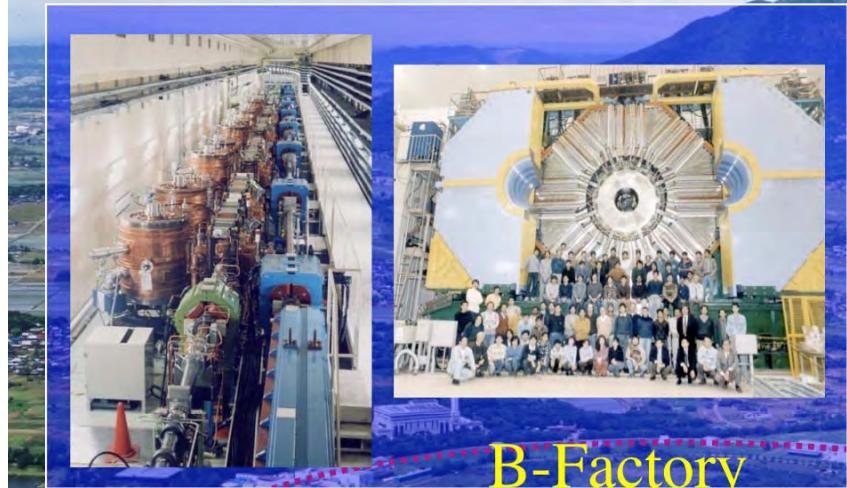
-1971年設立

- 研究学園都市2番目に
生まれた研究所
職員:~750名

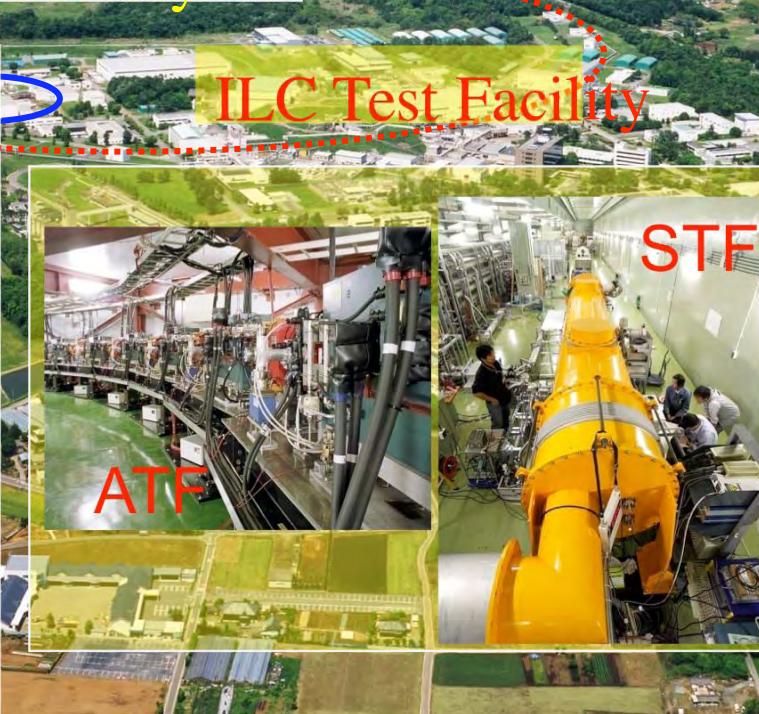
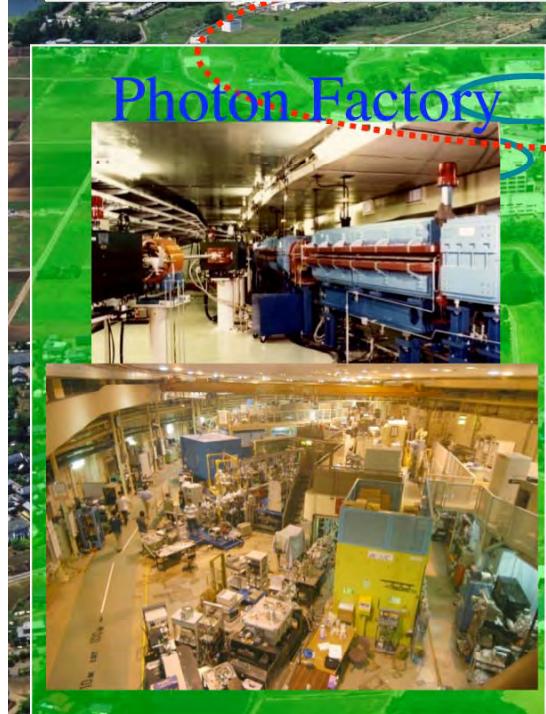
素粒子原子核物理
物質構造(生命)科学
加速器科学
共通基盤研究

- 宇宙、物質の構造を
紐解く研究

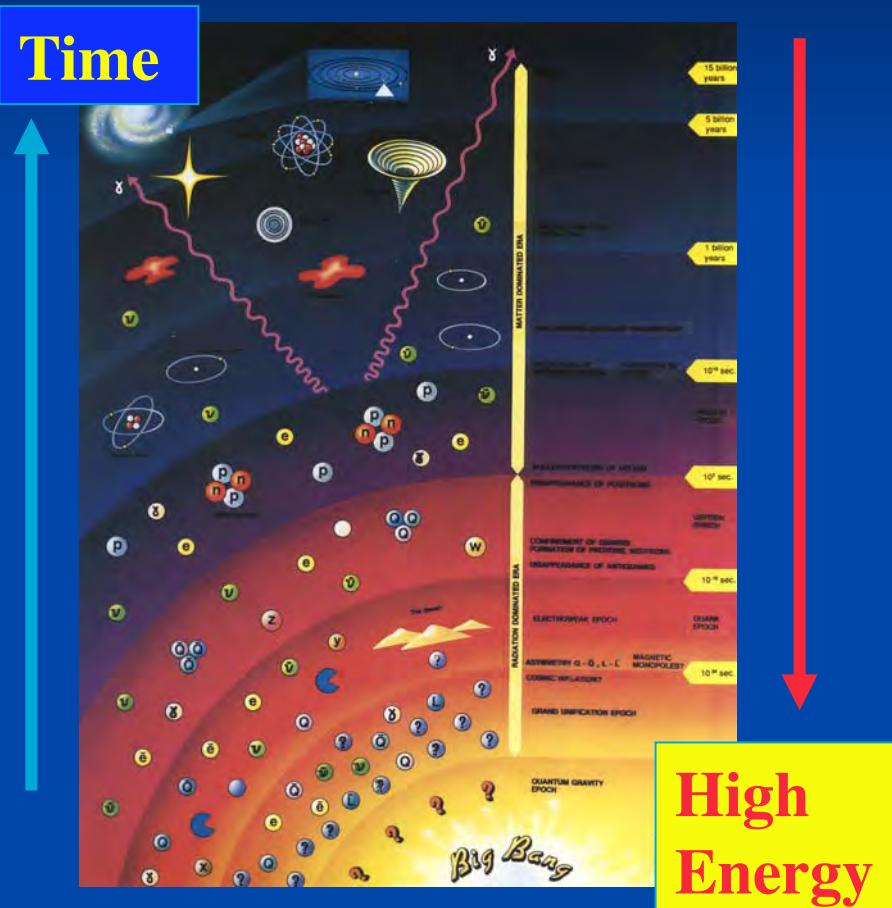
KEK:現在の研究活動



J-PARC in Tokai



粒子加速器:初期宇宙を探る鍵



■ 素粒子物理学

- 宇宙の起源を探る
- 宇宙初期の高いエネルギー密度における物質形成

■ 高エネルギー粒子加速器

- 粒子を加速し、高いエネルギーでの衝突現象を調べ、宇宙初期の“自然”を探る

小林益川理論を証明した加速器と実験： KEK-B/Belle

The Nobel Prize in Physics 2008

"for the discovery of the mechanism of spontaneous broken symmetry in subatomic physics"

"for the discovery of the mechanism of spontaneous broken symmetry in subatomic physics"

驚きをもって迎えられた。小林氏と益川氏による 1972 年の説明の重要性が科学界で完全に確認されるに至ったのはごく最近のことである。この業績に対し両氏に

Photo: University of Chicago Photo: KEK Photo: Kyoto University

は近年物理実験で確認された。更に最近、2001 年にのような対称性の破れを示すより多くの現象が米国タンフォードの BaBar 及び筑波の Belle という二つの検出器によってそれぞれ独立に検証された。その結果は小林氏と益川氏の三十年近く前の予言と完全に一致した。今まで説明されていない同種の対称性の

PRESSMEDDELANDE
PRESS RELEASE COMMUNIQUÉ DE PRESSE PRESSEMITSCHUNG
2008 年 10 月 7 日

驚きについて、その半分を“弱い力の力学と核物理学における対称性の破れの発見”に対して高エネルギー物理学の基礎理論としての賞を授けることとした。

我々の世界が完全に対称的では振る舞わないのは、従来から既知の事実である。しかし、それが何からくるかについては、これまで議論されてこなかった。この業績は、その原因を明確に示すものである。

南條一郎氏は 1960 年という早い時期に弱い力物理学における自発的対称性の破れを定式化した。対称性が自然に破れている場合は、一見雖然とした外見の下に自然の秩序が隠されている。この考え方には確めて有用であり、南條氏の理論は弱い力物理学の標準模型の基礎をなしている。標準模型ではあらゆる物質の最小の構成要素と、自然界の四大基本的な力（弱い力、電磁気力、強いつぶやき力、重力）が統一されている。

小林誠氏と益川敏英氏によって述べられた対称性の破れは南條氏の研究したそれとは別個のもので、宇宙の始まりから自然界が変化したと考えられており、これが 1964 年に初めて測定され実験で発見された際には大きな驚きをもって迎えられた。小林氏と益川氏による 1972 年の説明の重要性が科学界で完全に確認されるに至ったのはごく最近のことである。この業績に対する両氏による貢献は、対称性の破れを標準模型の構成方に沿って説明しつつ、更にこの模型が三世代のクォークを含むまで拡張されることが必須であるとした。ここで予言された新しいクォークの仮説は多くの物理学者で認証され、更に最近、2001 年にニッカ・ラム（対称性の破れを示すより多くの現象が米国スタンフォードの BaBar 及び筑波の Belle という二

つの検出器によってそれぞれ独立に検証されたことによって、その半分を“弱い力の力学と核物理学における対称性の破れの発見”に対して高エネルギー物理学の基礎理論としての賞を授けることとした。

南條一郎、アメリカ国籍。1921 年東京生まれ。1952 年东北大学 Ph.D. 米国シカゴ大学エンリコ・フェルミ研究所 Harry Pratt Judson Distinguished Service 名譽教授。

小林誠、日本国籍。1944 年名古屋生まれ。1972 年名古屋大学 Ph.D. 高エネルギー加速器研究機構（KEK、筑波）名譽教授。

益川敏英、日本国籍。1940 年生まれ（愛知県出身）。1967 年名古屋大学 Ph.D. 京都大学基礎物理学研究所名譽教授。

黄金一千ガラスウェーバン・クローナ。両氏が半分を、残りの半分を小林氏と益川氏が分ける。
<http://www.kva.se>, <http://nobelprize.org>

刊行会社 PressOfficer の Erika Hult, 電話 +46 70 673 99 44, +46 70 673 96 50, erika.hult@vav.se

Editor of PressOfficer, 電話 +46 8 673 95 61, info@vav.se

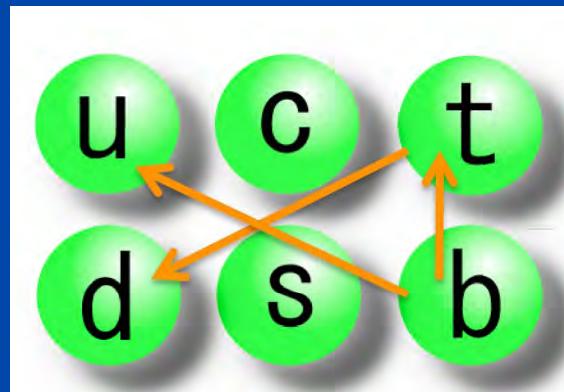
1999 年に設立されたスウェーデン王立科学アカデミーは、科学の進歩とその社会に対する影響力を高める事を目標とする独立組織である。アカデミーの主要な活動は自然科学と医学であるが、様々な分野の科学の発展も促進すべく努力している。

KUNGL.
VETENSKAPSAKADEMIEN
THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES
P.O. Box 50005, SE-104 05 Stockholm, Sweden
Phone: +46 8 673 95 00, Fax: +46 8 15 98 70
E-mail: info@vav.se, Web site: www.vav.se

Lilla Trädgårdsgatan 4A
Undergrund: Universitetet i Stockholm
Bldg 40, Universitetet i Stockholm

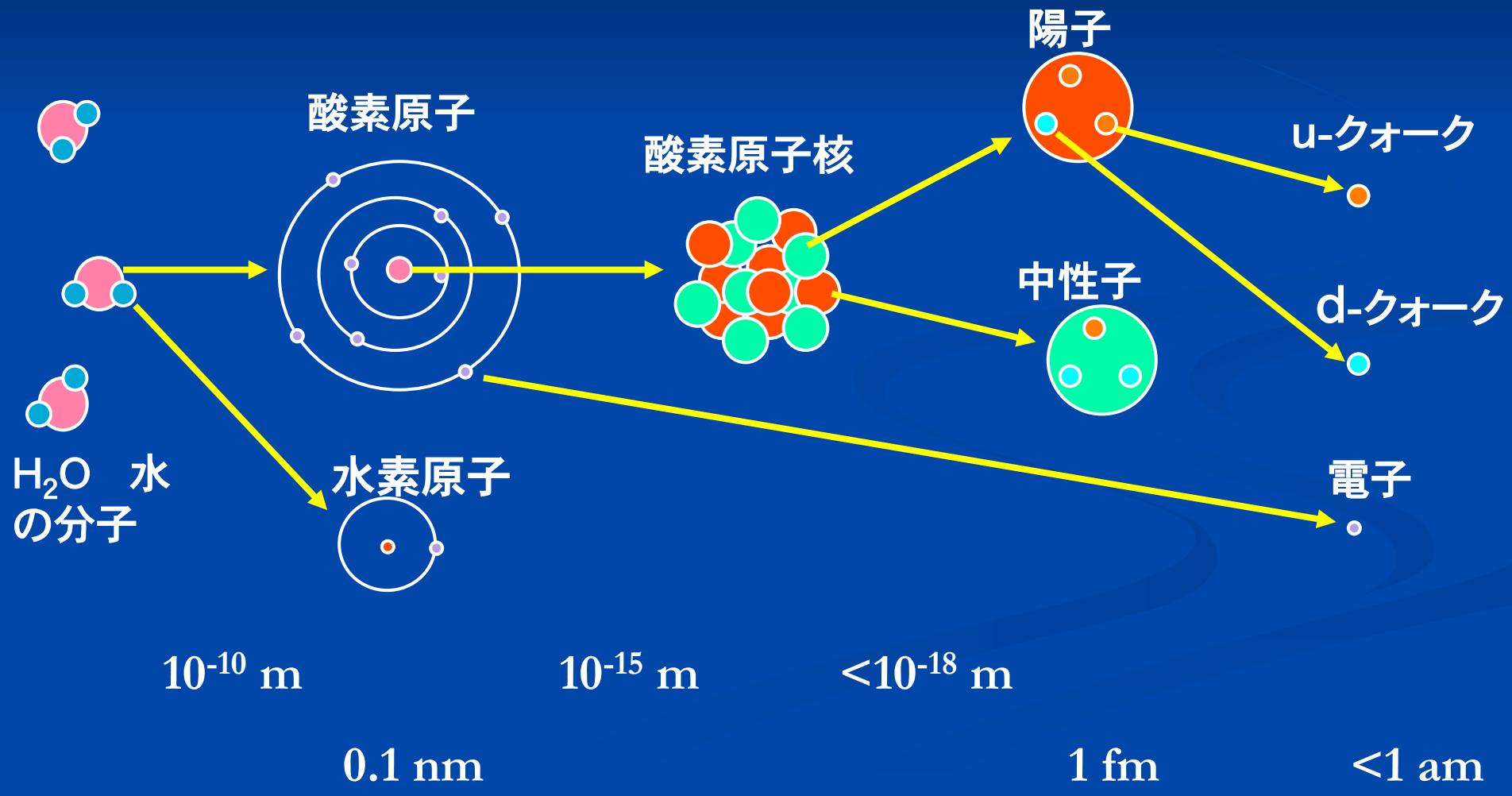
http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2008/
http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2008/press_jap.pdf

C(電荷)P(パリティー)非保存の 予言(小林、益川理論)と検証(KEK-B)



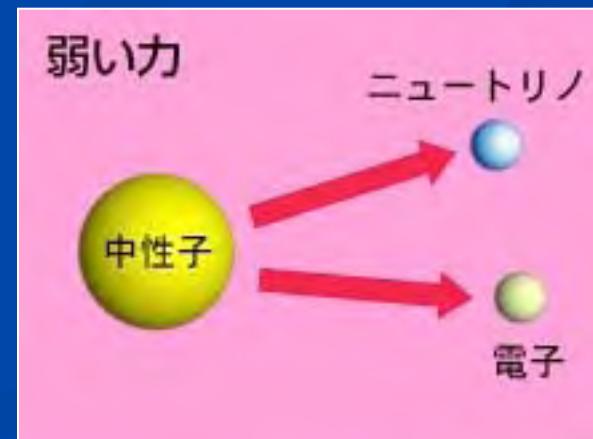
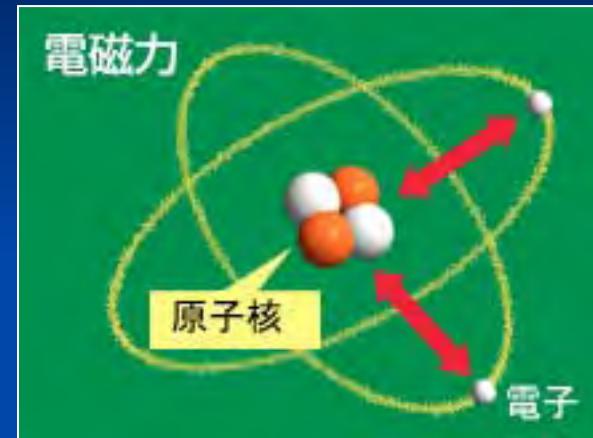
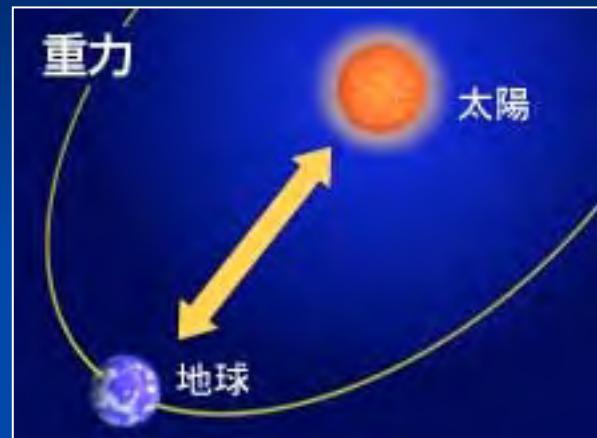
物質の階層構造とそのスケール

分子 原子 原子核 核子 素粒子



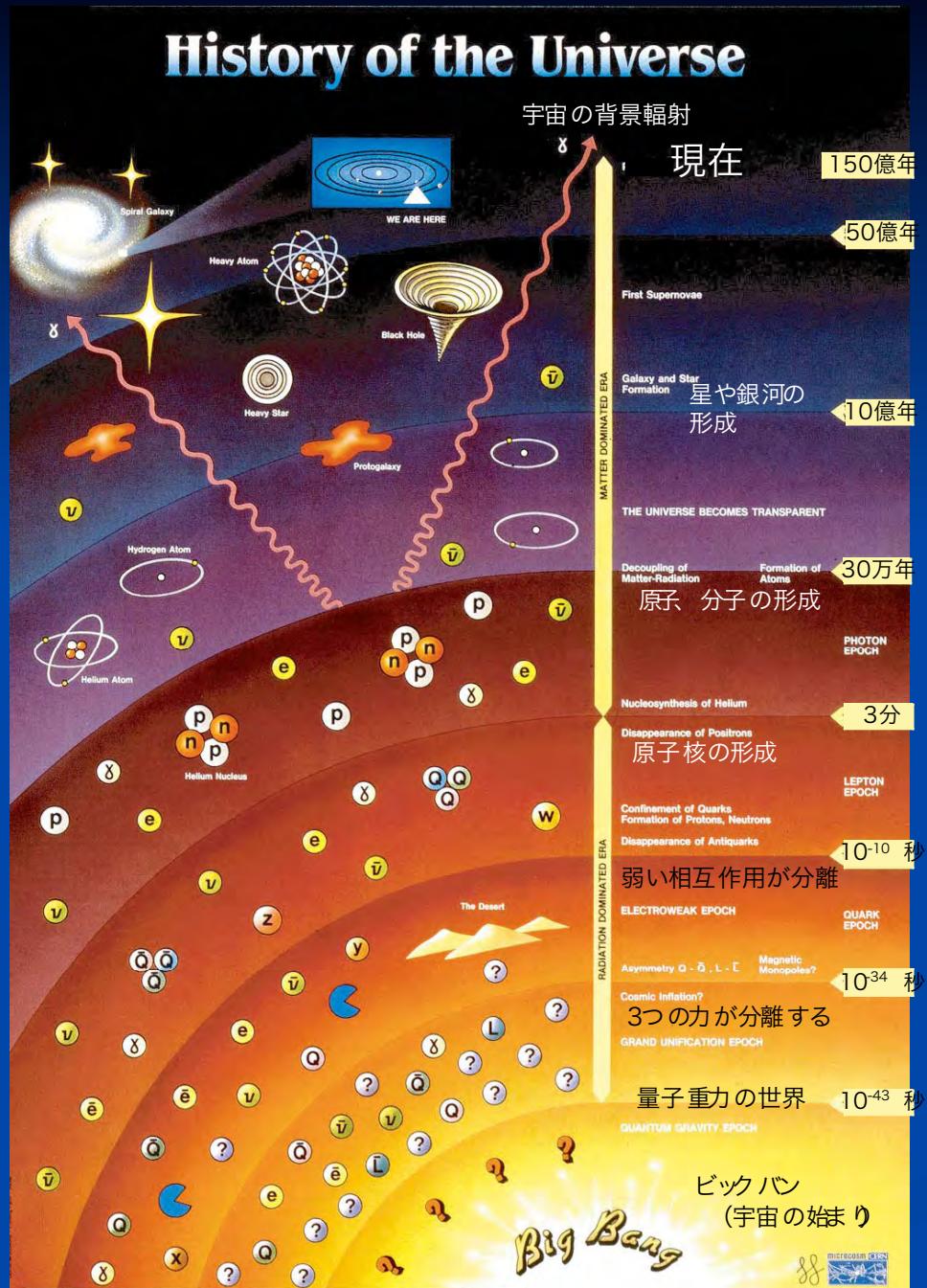
力がないと
反応しない

自然界の4つの力



湯川先生が予言

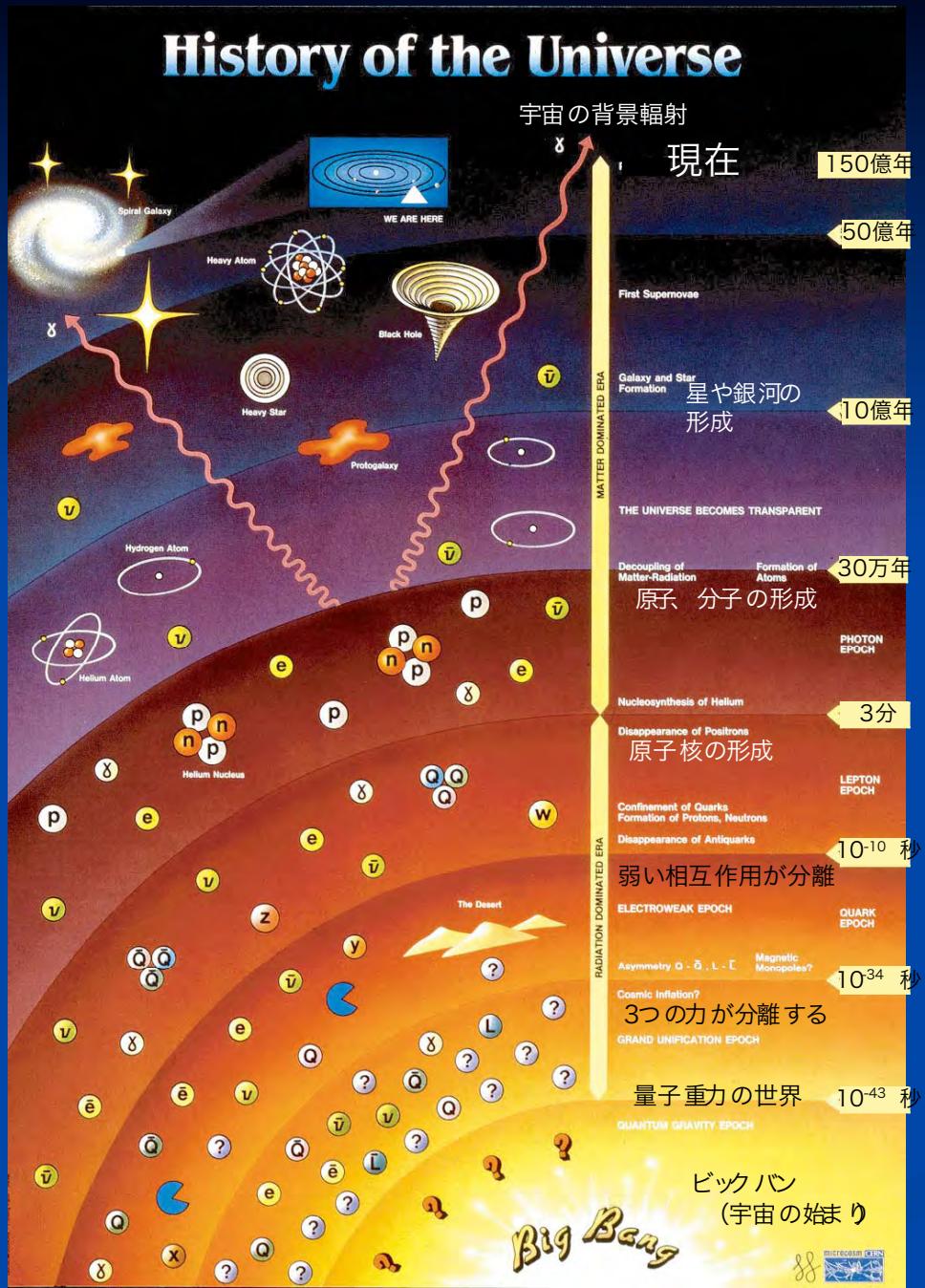
(中性子は陽子に変わる)



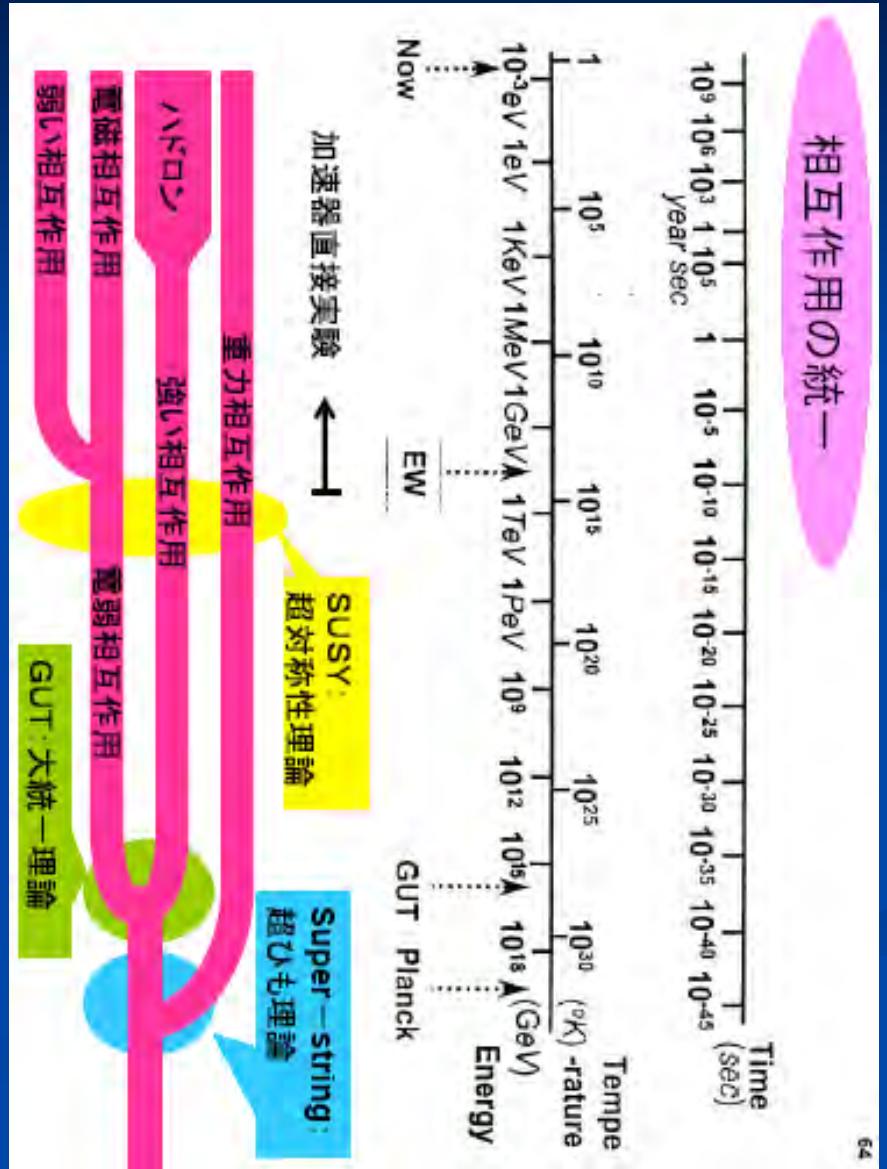
一時的に超高エネルギー状態が存在
= 宇宙の昔を再現進化を遡る研究。



History of the Universe



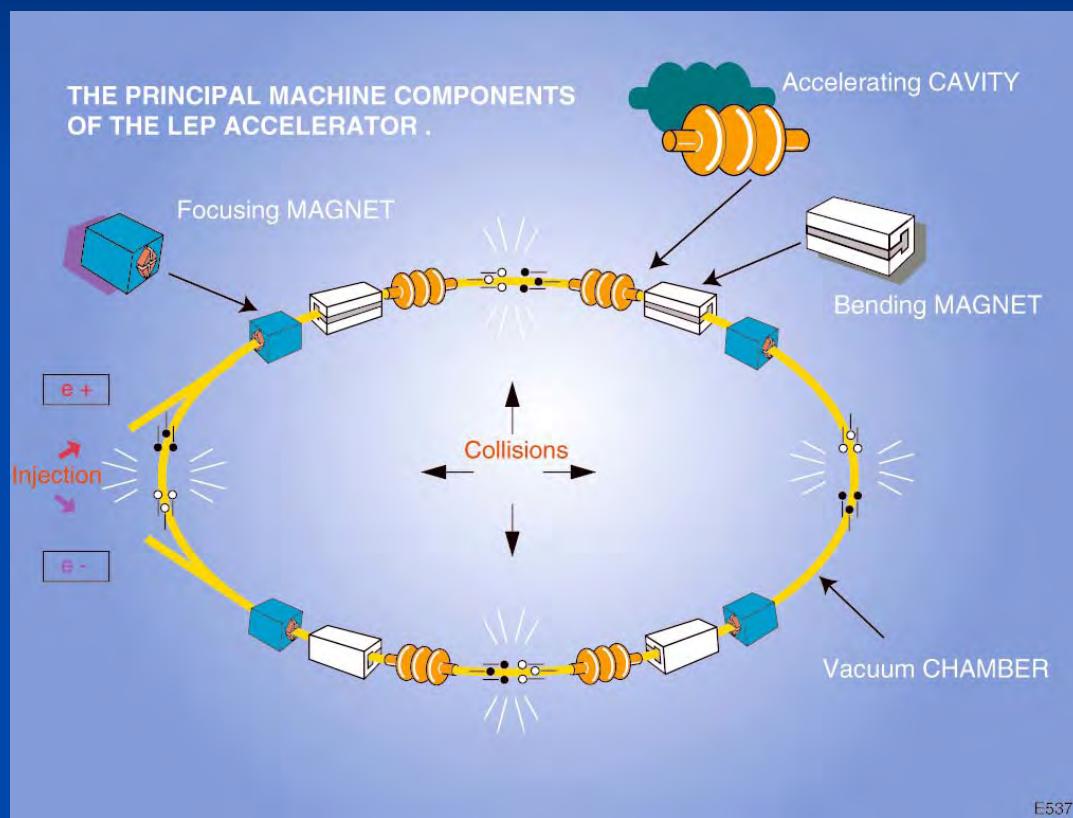
一時的に超高エネルギー状態が存在
= 宇宙の昔を再現進化を遡る研究。



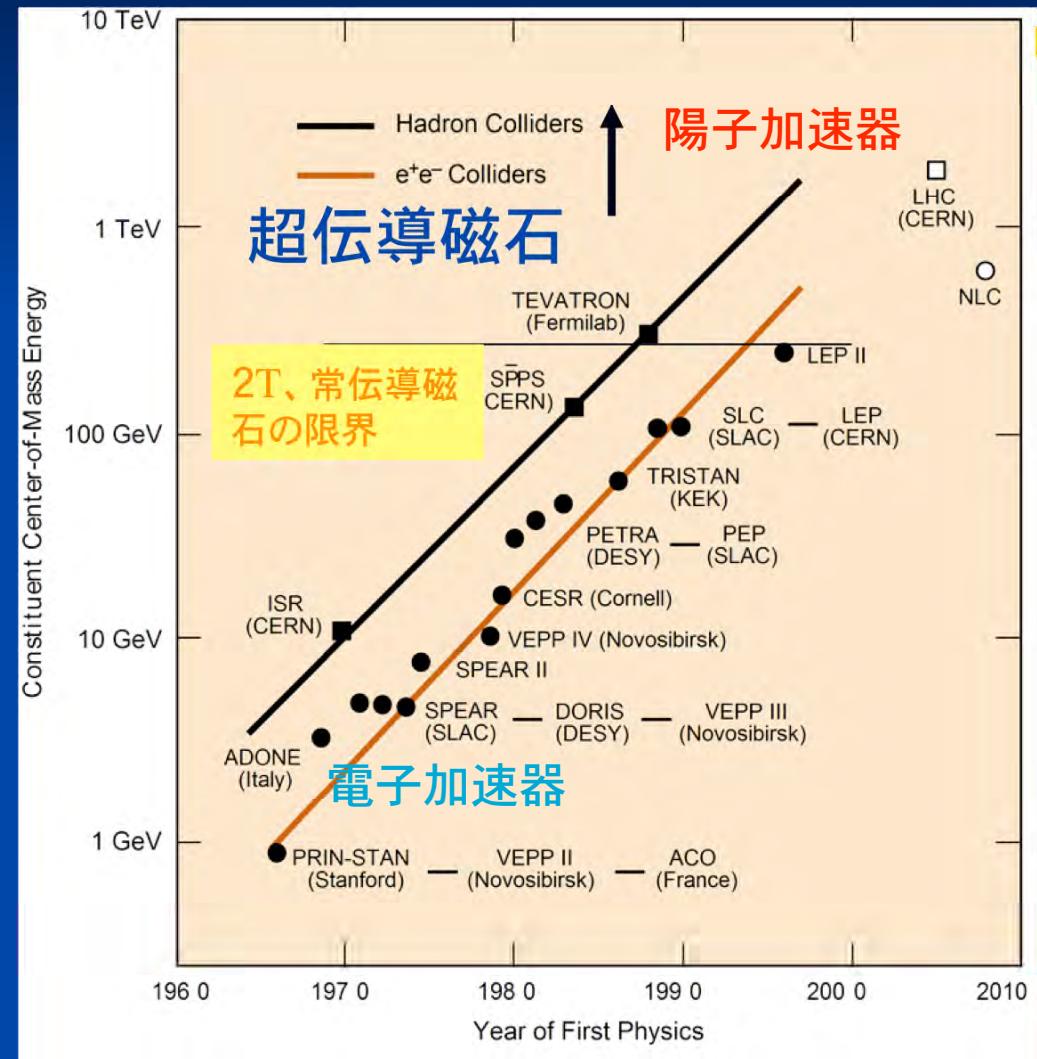
粒子加速器における基本

- 粒子を加速する
 - 電界: E
 - 静電界
 - 高周波空洞 (cavity)
 - > 超伝導技術

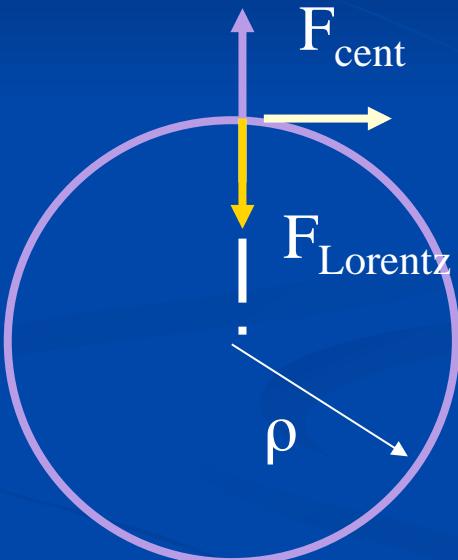
- 粒子の軌道を制御する
 - 磁界: B
 - 偏向磁石 (Bending Magnet)
 - ビーム収束 (Focusing Magnet)
 - > 超伝導技術



粒子加速器エネルギーの進展



■ 高エネルギー加速器では超伝導技術が不可欠



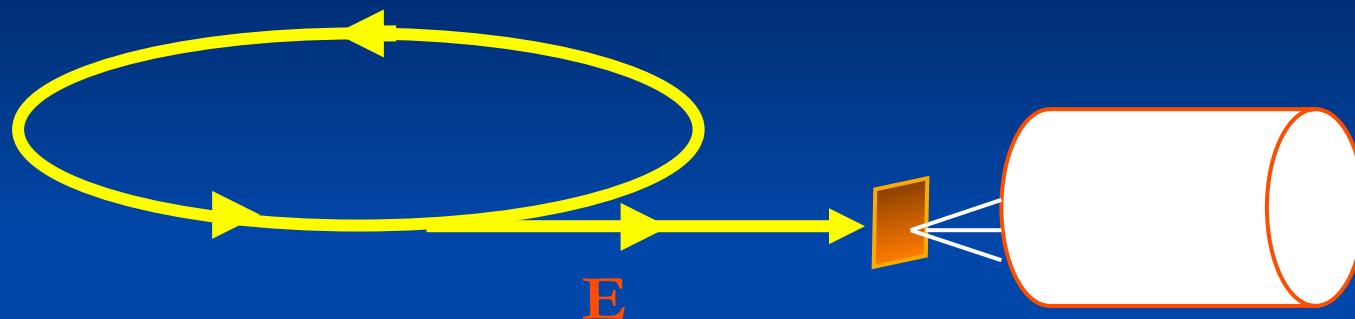
$$\mathbf{p} = \mathbf{q} \cdot \rho \cdot \mathbf{B}$$

$$P [\text{TeV}/c] = 0.3 \cdot \rho [\text{km}] \cdot B [\text{Tesla}]$$

- High Magnetic Field required

粒子衝突型加速器(コライダー)の威力

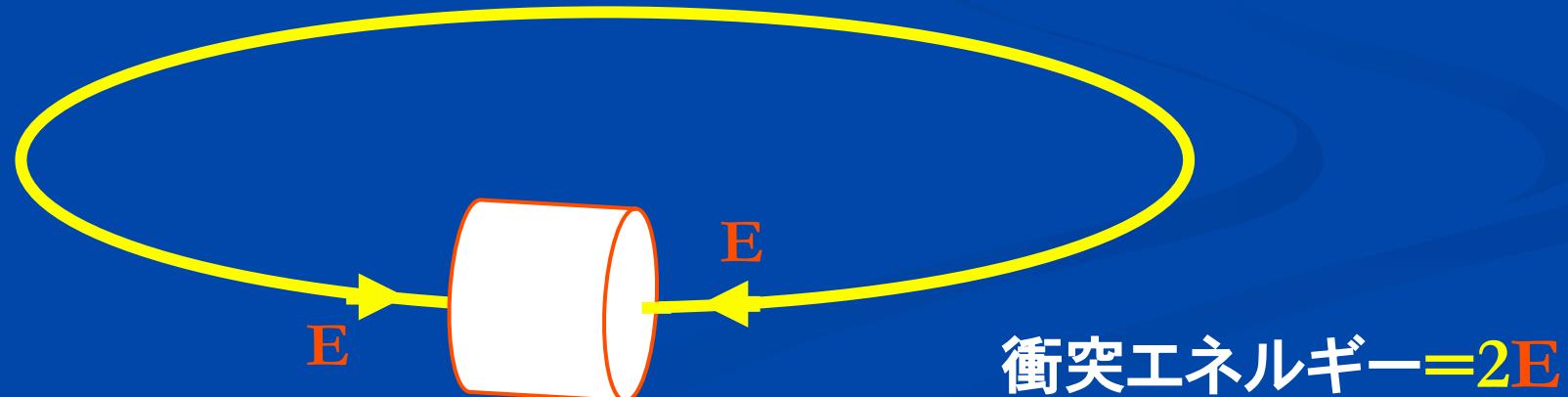
(1) 従来の加速器を用いた素粒子実験（標的実験）



$$\text{衝突エネルギー} = \sqrt{2mE}$$

m: 標的粒子の質量

(2) コライダーでの素粒子実験



$$\text{衝突エネルギー} = 2E$$

加速器の技術革新（75年の歴史）



1932年 ローレンス世界初の
サイクロトロン 直径13 cm
m, エネルギー80keV



LHC 2008年完成 2009年稼動
直径9km, エネルギー 14TeV

$$9\text{km}/13\text{cm} = 69,231$$

$$14\text{TeV}/80\text{keV} = 175,000,000$$

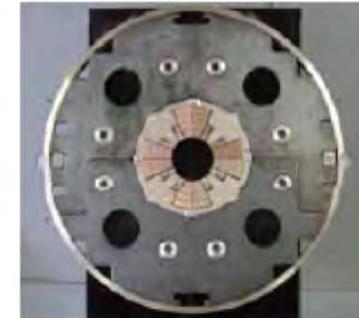
$$175,000,000/69,231 = (1.11)^{75}$$

粒子加速器のエネルギー frontierを担う 超伝導技術

加速器に使われる超伝導技術

超伝導磁石:

強いDC磁場: 加速粒子の軌道を曲げる
偏向磁石、収束磁石、測定器ソレノイドなど



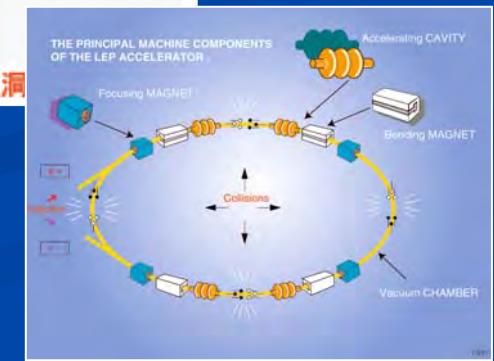
超伝導高周波空洞:

空洞共振器が作る高周波電磁場:
粒子に電圧を与える唯一の装置
加速空洞、クラブ空洞、
高周波セパレーターなど



KEK-ERL 9連空洞

■ 先端加速器の鍵を握る基盤技術



講演の内容

■ はじめに

- 高エネルギー加速器が探る宇宙のはじまりと歴史
- エネルギーフロンティアを担う先端技術、『超伝導』

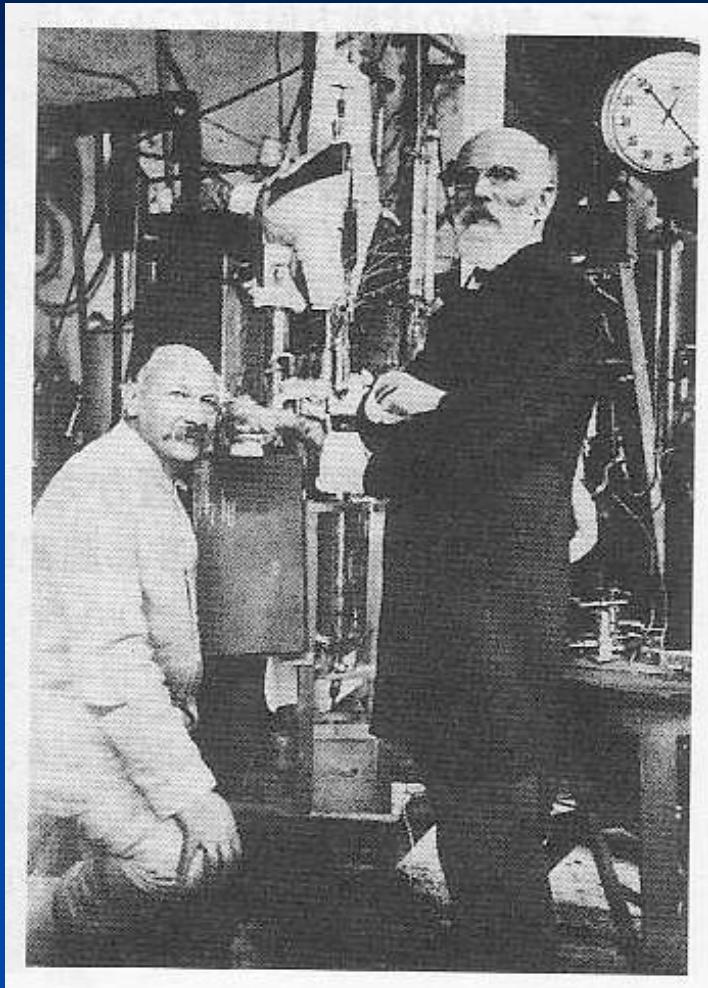
■ 超伝導技術が拓く加速器科学

- 超伝導って何?
- 粒子加速器、物理実験を先導する超伝導技術
- 将来への夢:国際リニアコライダー計画の実現にむけて
- 宇宙、エネルギー、社会生活の未来を担う超伝導
- まとめ

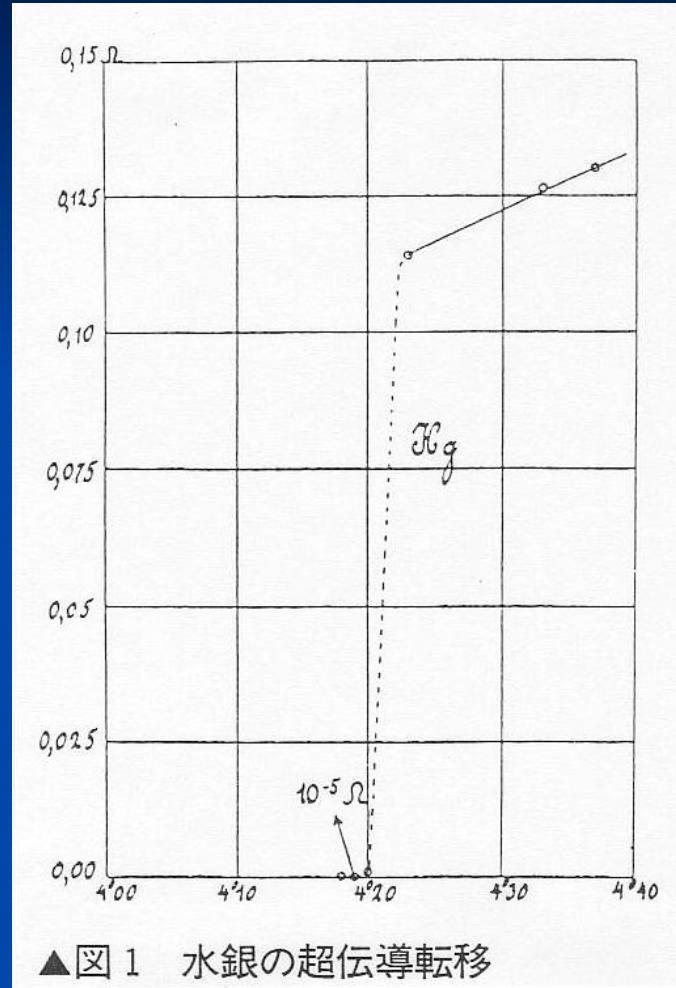
超伝導って何？



● 超伝導の発見



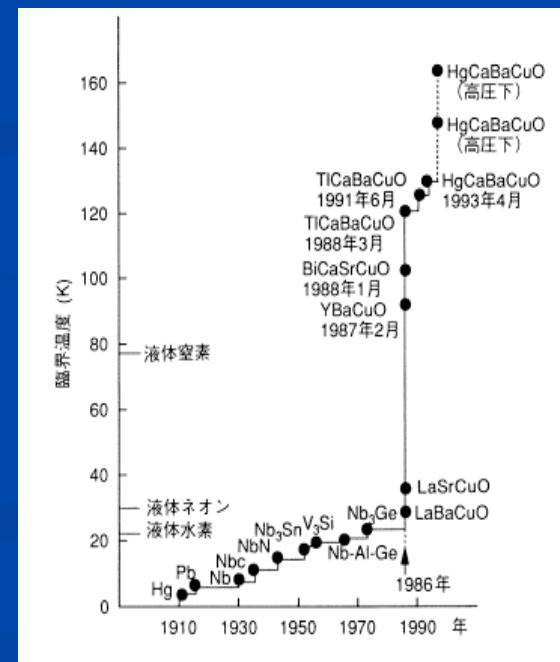
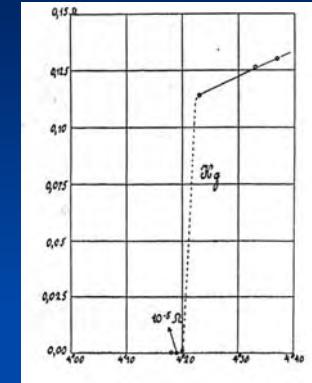
カメリンオネスがヘリウム液化
(1908)



水銀の電気抵抗値が測定不能(1911)

超伝導・低温技術の発展

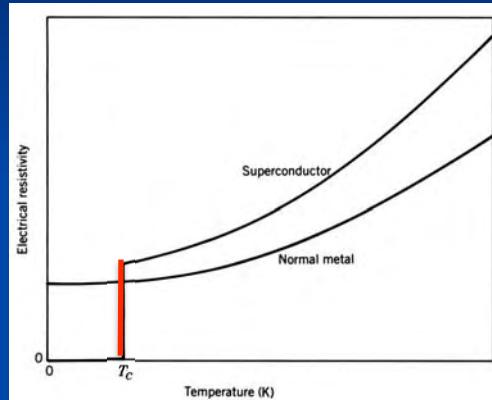
- 1908 ヘリウムの液化
- 1911 超伝導の発見
- 1924 超流動ヘリウムの発見
- 1933 マイスナー効果の発見
- 1957 BCS理論の完成
- 1970 NbTi伝導線の工業化
- 1979 医療用MRI超伝導マグネットの実用化
- 1983 米:超伝導加速器(米:FNAL)の完成
- 1986 高温超伝導の発見
- 1995 欧:CERN/LHC建設開始
- 1996 日:超伝導・核融合実験装置・LHD完成
- 1998 米:超伝導加速器(BNL/RHIC)完成
- 2001 新超伝導体・MgB₂発見(日:青学大)
- 2008 欧:CERN/LHC完成



超伝導の基本的な性質

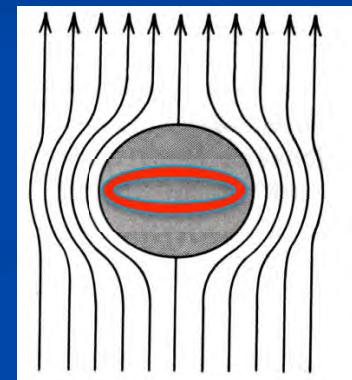
■ 完全導電性 ($E = 0$)

- 電気抵抗がゼロ ($R = 0$)
- 発熱なく多くの電流が流せる
 - $I^2 \times R = 0$
 - 大電流で、高磁場が発生できる



■ 完全反磁性 ($B = 0$)

- マイスナー効果
- 内部の磁場を打ち消す表面電流
 - 誘導電流による磁気浮上が実現できる



Superconductor
超伝導体

■ 量子性

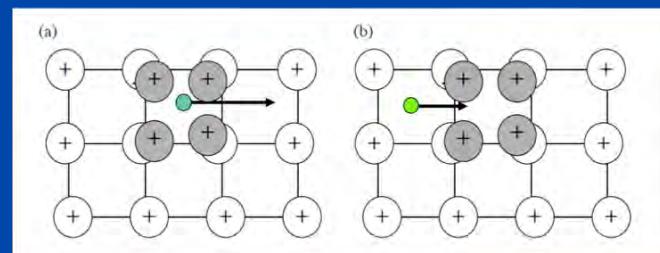
- 不連続な量子束(フラクソイド)
- ジョセフソン効果(トンネル効果)
 - 量子トンネル効果



ゼロ抵抗：超伝導電流

(BCS理論: Bardeen-Cooper-Schrieffer)

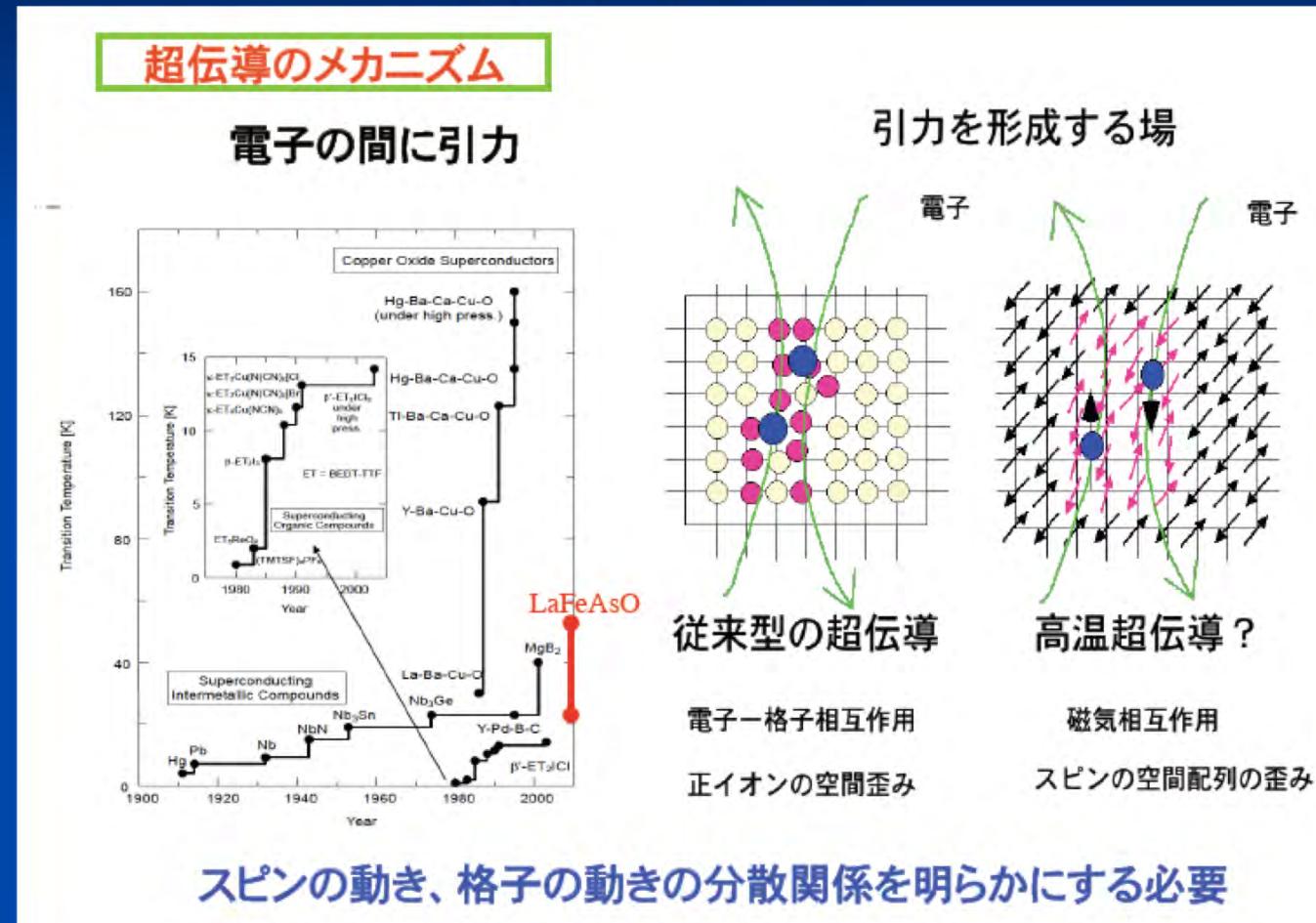
- 電子の振る舞いと関係づける。
- 電子対(Cooper-pair) :
- 電子“対”が金属格子の間を移動:
 - 同方向・同速度で動き超伝導、
 - 同じ運動量で移動できる。
 - 排他原理に抵触せず、ボーズ粒子として振る舞う。
- 電子とフォノン(格子振動)の相互作用:
 - 音速より小さな速度で移動
 - 金属格子によって運動量を失わず
 - 超伝導電流となる。



a) 電子は格子を振動させ抵抗を引き起こす,b)電子は引力を受け加速：
>> 電子対ではエネルギー損失がない状態

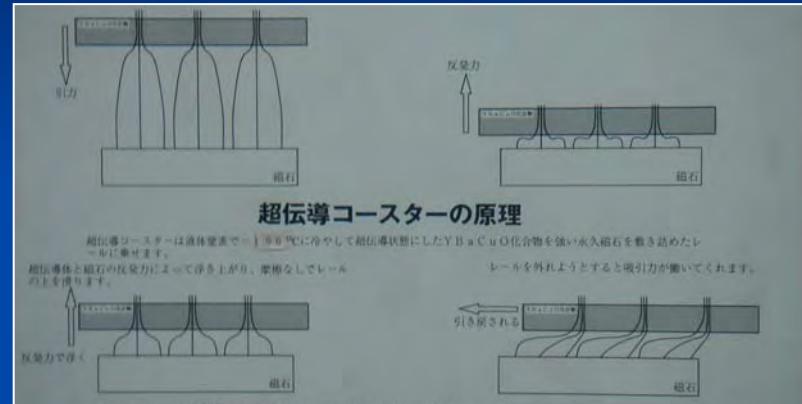
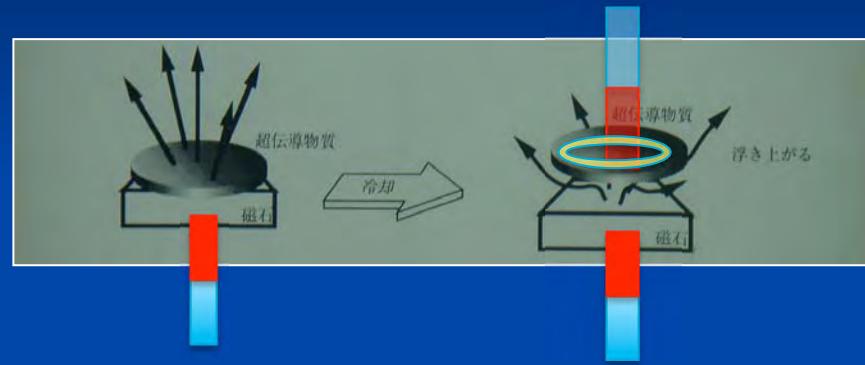


高温超伝導のメカニズム :解明中

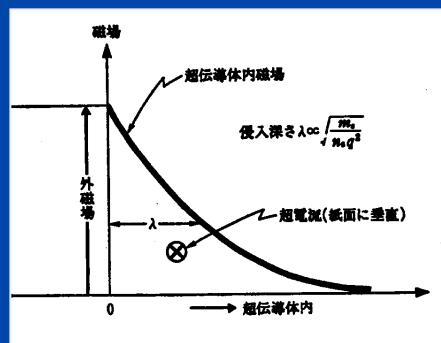


- Ref: 山田和芳:先端加速器科学技術協議会講演:2009-12

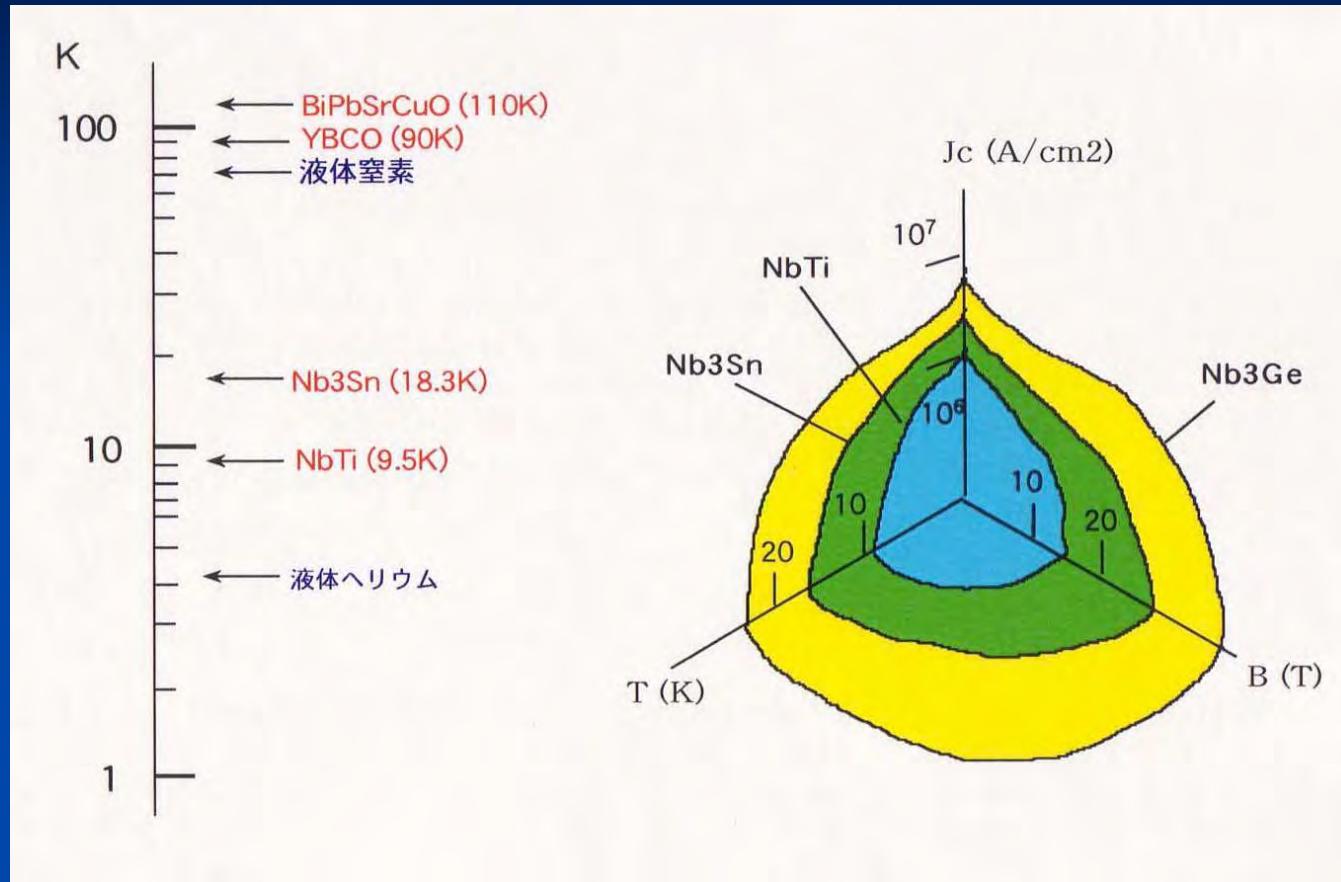
超伝導体による磁気浮上 マイスナー効果



- 超伝導体は磁場の侵入を許さない
 - 永久電流がリング(円筒)表面に流れる、
 - 永久磁石と逆向きの磁場の反発力で浮き上がる
- 一部のみ磁力線が突き抜ける
 - 第二種超伝導体
 - 磁束の状態の変化を嫌う



● 超伝導体の動作温度



超伝導状態を得るには低温が必要→臨界温度は高いほど利用価値が大きい

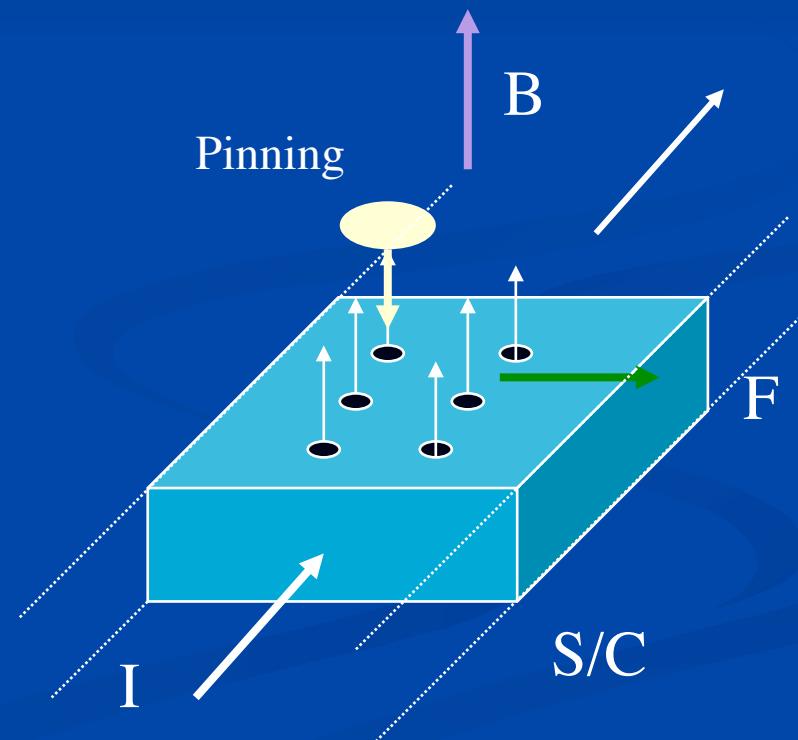
電流が受ける力とピン止め力

超伝導状態を保つには>>冷却が必要

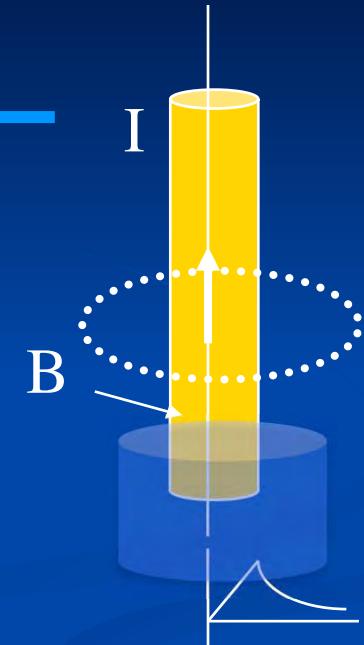
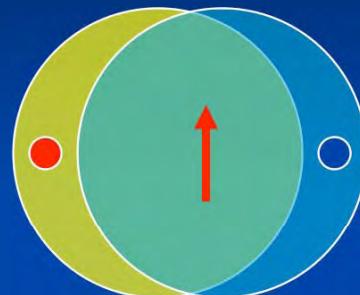
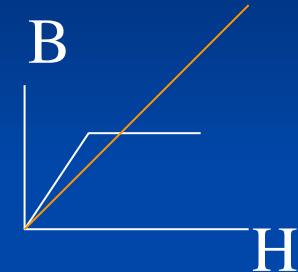
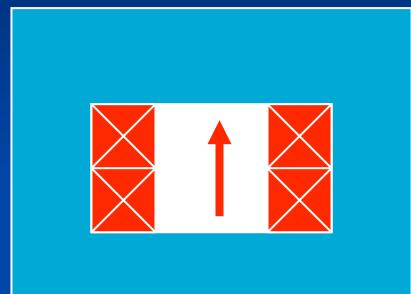
■ 超伝導が破れる条件

- 電流が受ける力(ローレンツ力)と
ピン止め力のバランス
- $F_L = I \times B = q \cdot v \cdot B > F_{Pinning}$

- ローレンツ力が上回ると
 - 磁束の移動、変化
 - $\text{Rot } E = - dB/dt$
 - ジュール発熱
 - 温度上昇
 - 超伝導の破れ



超伝導電磁石



$$B = \sim \mu_0 N I / (g + l/\mu_s)$$

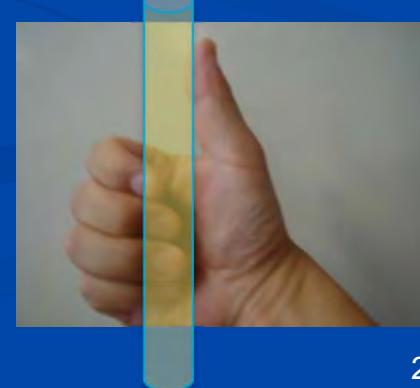
- 鉄芯を用いた常伝導磁石:

- 鉄芯の形状で磁場を形成
- 鉄の透磁率飽和で磁場が2Tで限界

- 超伝導磁石:電流の分布で磁場:

- 超伝導体に流す事ができる電流密度で限界
- 現状では~10Tまで到達

$$\text{rot } B = \mu_0 \cdot J$$



超伝導線には大電流を流せる>>高磁場の発生

電流密度を高められる事が本質的に重要

- 電流密度

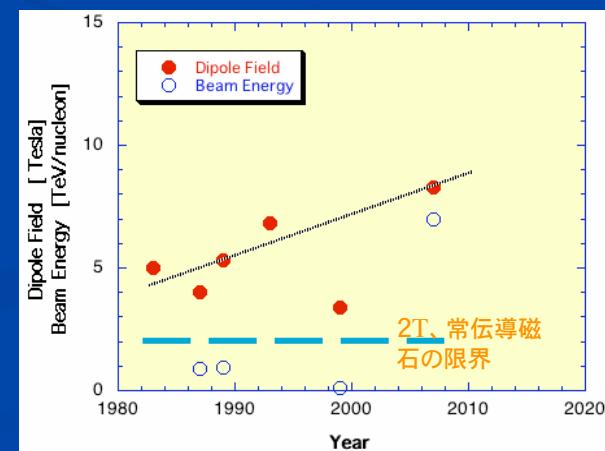
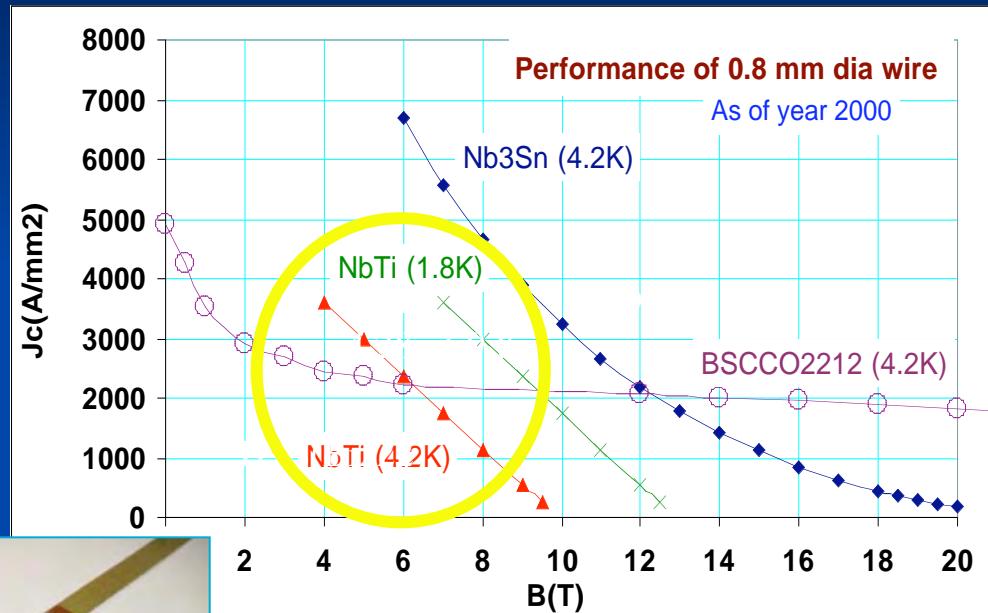
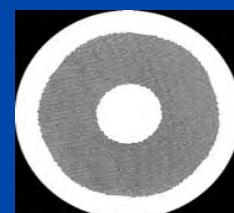
超伝導素線:~2000 A/mm²

超伝導磁石:~500 A/mm²

(安定化材、電気絶縁などで一桁下がる)

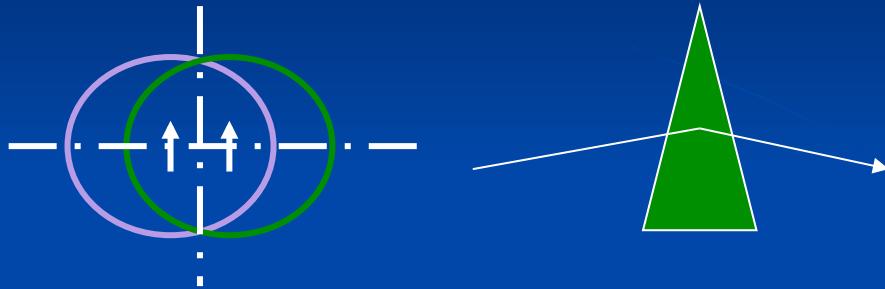
- 常伝導磁石:~10 A/mm²

超伝導:1~2桁高い電流密度。

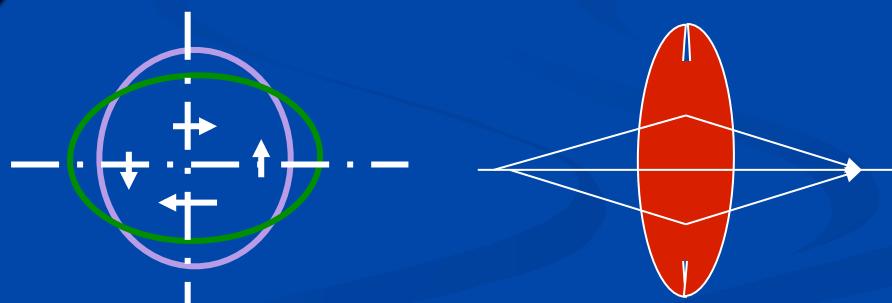


電流の作る磁場(続)

- Dipole(二極)
 - プリズムの役割

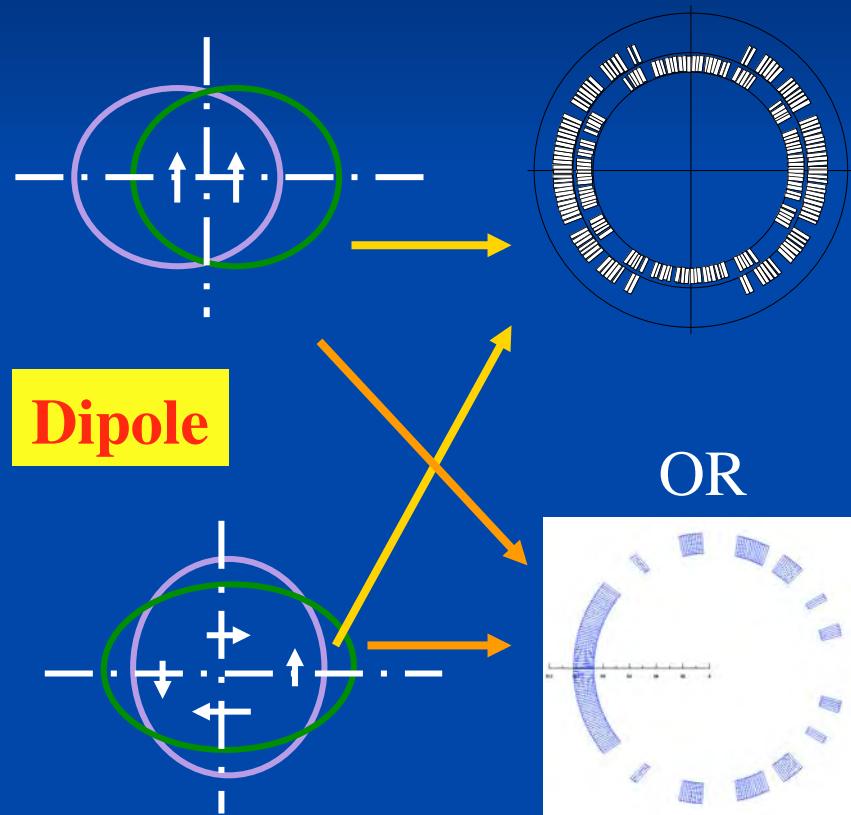


- Quadrupole(四極)
 - レンズの役割

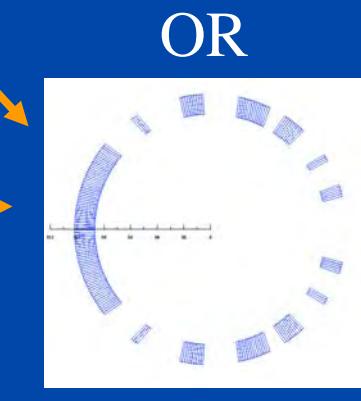
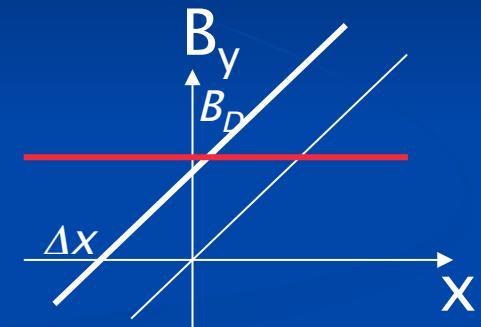


二極・四極磁場複合磁石の実現

2007年・加速器学会表彰(荻津／中本／東)

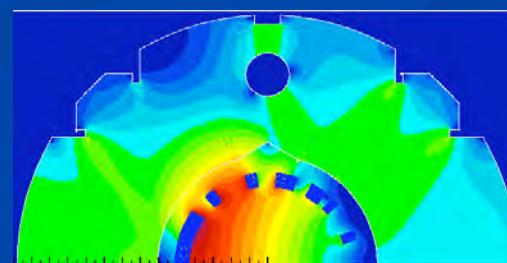


$$\begin{aligned}B_y &= B_D + Q_{\text{grad}} \times x \\&= Q_{\text{grad}}(x - \Delta x) \\ \Delta x &= -\frac{B_D}{Q_{\text{grad}}}\end{aligned}$$



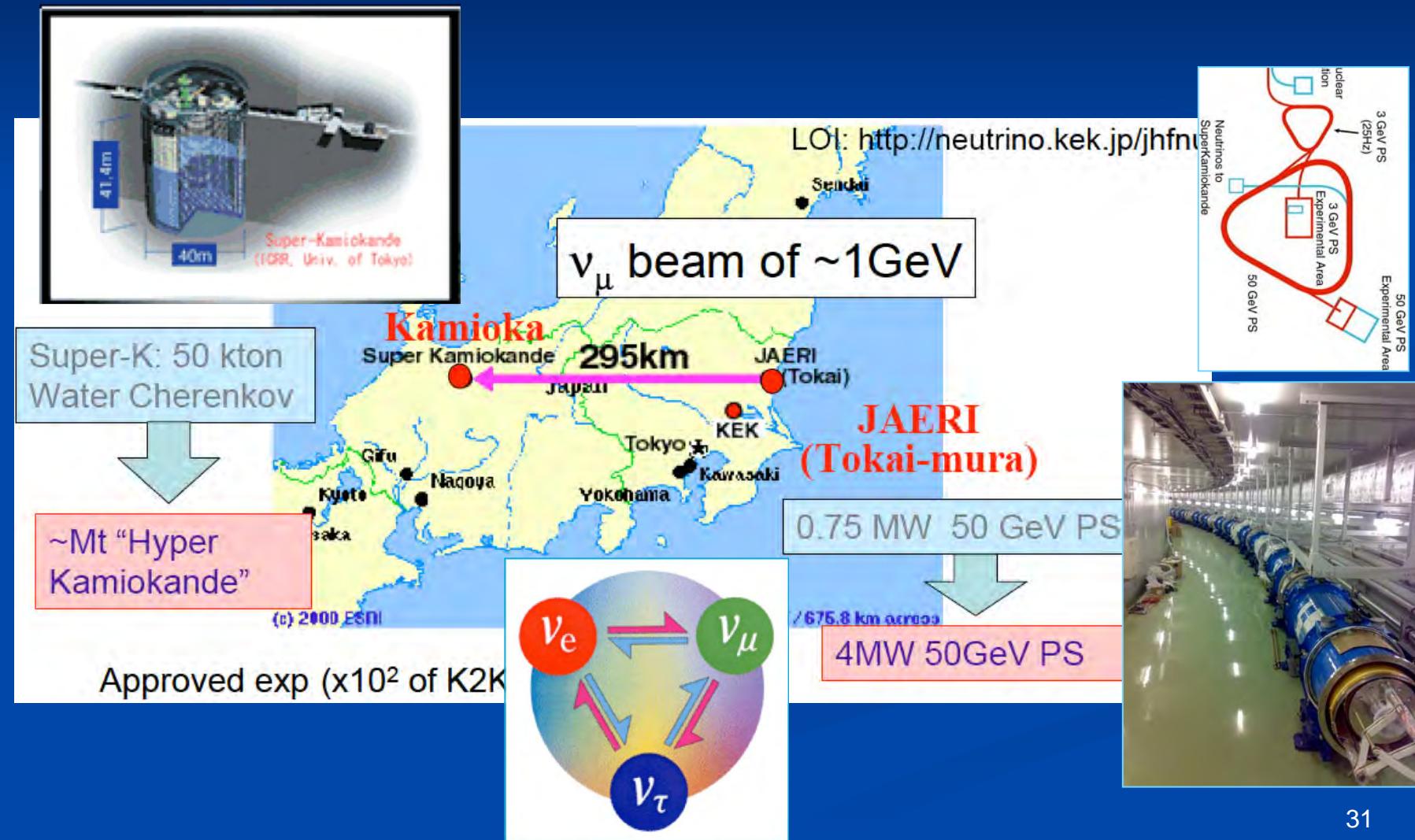
Quadrupole

Combined



Dipole: 2.6 T
Quadrupole: 19 T/m
Peak Field: 4.2 T

J-PARC ニュートリノ実験 超伝導一次陽子ビームライン



T2K: 第2世代の加速器長基線 ニュートリノ実験

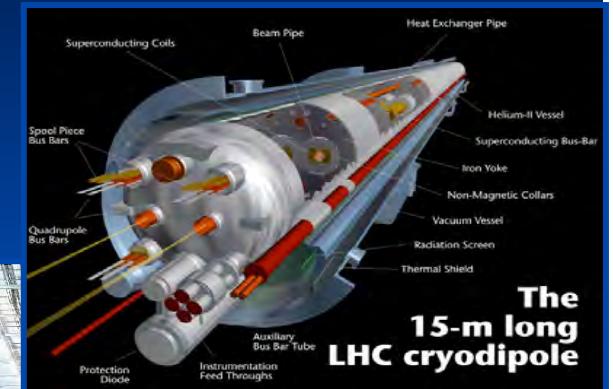
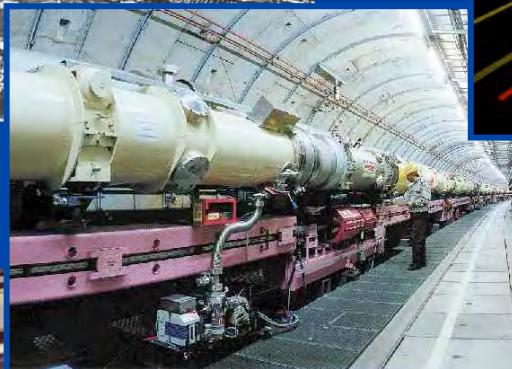
ミュー・オ・ン・ニュートリノが変換した 電子ニュートリノ発現現象を探る



世界の超伝導(磁石)加速器



HERA



LHC

Tevatron



RHIC



高エネルギー超伝導加速器の発展

Accelerator	Tevatron	SSC	HERA	RHIC	LHC
Lab.	FNAL	SSC	DESY	US	CERN
Energy [TeV]	0.9	20	0.82	0.1 / anm	7
Radius [km]	1	14	1	0.5	4.5
Ring	1 (p+p-)	2 (p+p)	1 (e+p)	2 (p+p) &	p+p-
B-dipole [T]	4.4	6.6	4.7	3.5	8.36
G-quad [T/m]	76	205	91	72	220
R-coil [mm]	38	25	37.5	40	28
#Dipoles	774	7986 (676)	422	288	2x1232
Temperature [K]	4.5	4.4	4.5	4.5	1.9
Complete year	1985	Canceled	1990	2000	(2007)
Note	First SC large Accelerator	Few training quench	First industrial contribution	Economical	Highest field SF-He

高エネルギー超伝導加速器の発展

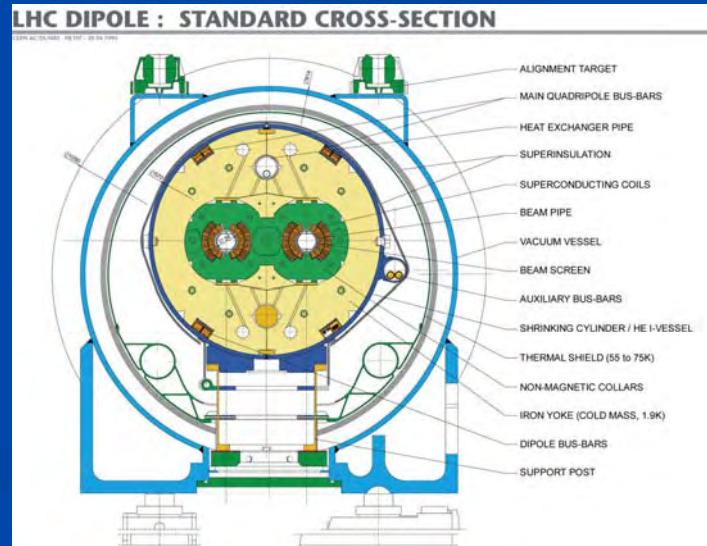
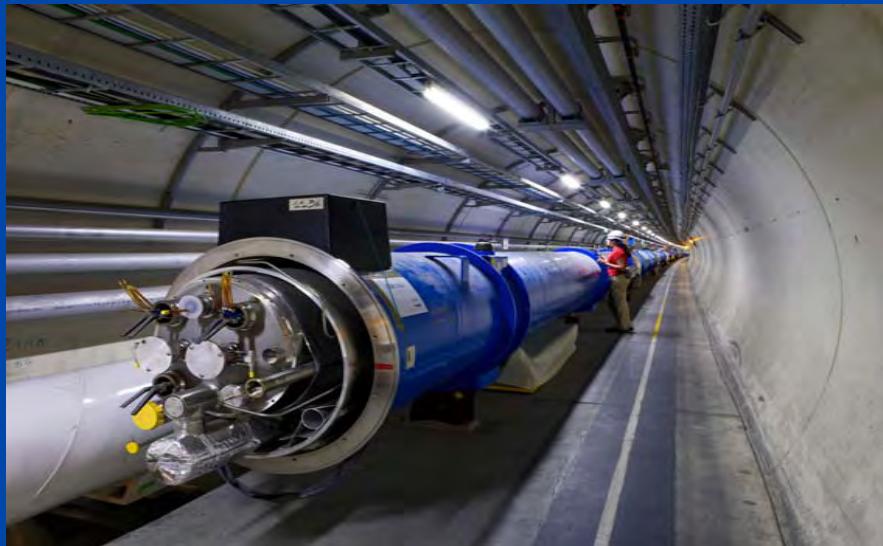
Accelerator	Tevatron	SSC	HERA	RHIC	LHC
Lab.	FNAL	SSC	DESY	US	CERN
Energy [TeV]	0	15			7
Radius [km]	1	SSC			4.5
Ring	1				p+p-
B-dipole [T]	4				8.36
G-quad [T/m]	7				220
R-coil [mm]	3				28
#Dipoles	7				2x1232
Temperature [K]	4	Dipole Field [Tesla] Beam Energy [TeV/nucleon]	Year		1.9
Complete year	1	1980 1990 2000 2010 2020	2000 microtron contribution	(2007)	
Note	F	training quench		Highest field SF-He	

The figure is a scatter plot illustrating the evolution of superconducting accelerator technology. The x-axis represents the year, with major ticks at 1980, 1990, 2000, and 2020. The y-axis has two scales: Dipole Field in Tesla (red circles) and Beam Energy in TeV/nucleon (blue circles). A dashed horizontal line at approximately 2 T is labeled "2T、常伝導磁石の限界" (Limit of conventional magnets).

Year	Dipole Field [Tesla] (Red Circles)	Beam Energy [TeV/nucleon] (Blue Circles)
~1985	~4.5	-
~1988	~3.5	-
~1990	~5.0	-
~1995	~7.0	-
~2000	~3.0	~0.5
~2005	~8.0	~7.0

LHC Superconducting Magnets

- 加速器 直径27 km
- エネルギー 7 TeV
- 主二極超伝導磁石 8.3 T, 約5,000台



CERN/LHC衝突点用四極磁石

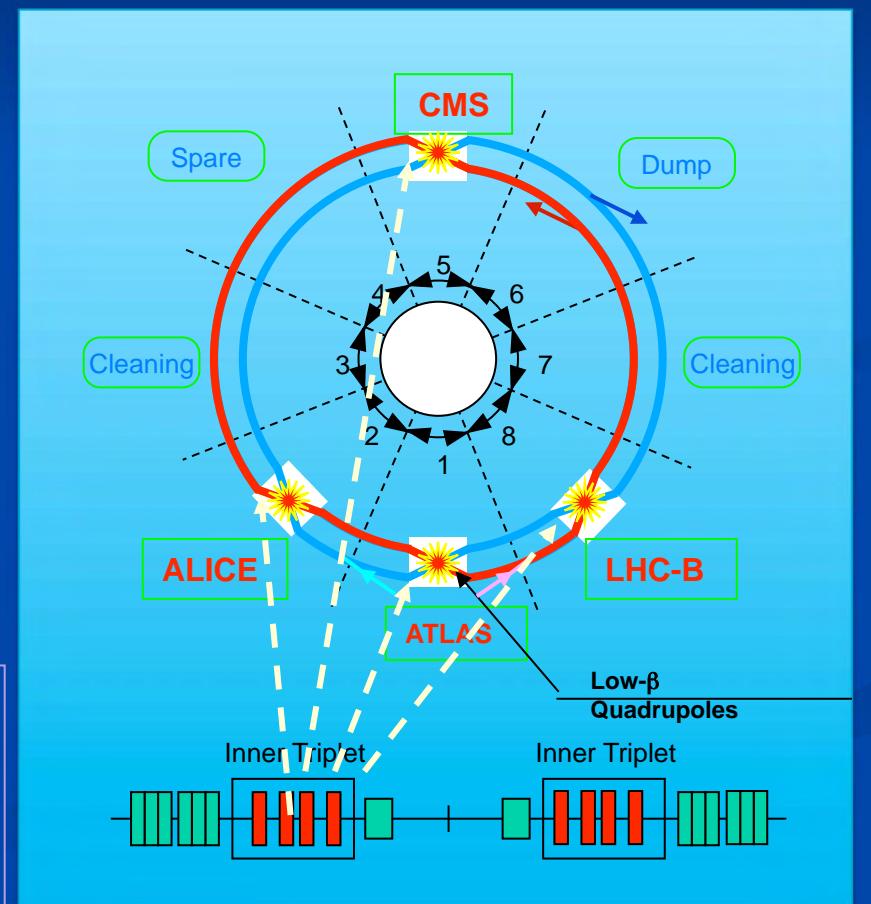
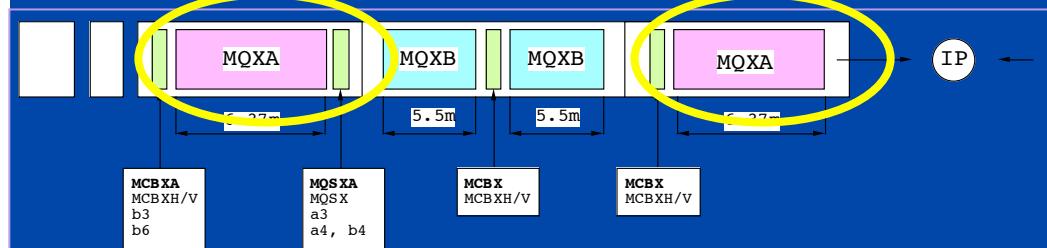
$G = 215 \text{ T/m}$, $L = 6.37 \text{ m}$

Aperture = 70 mm

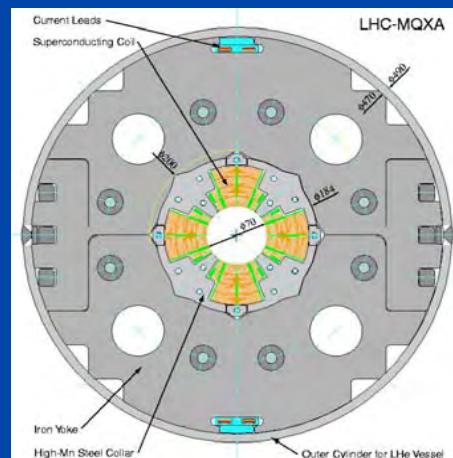
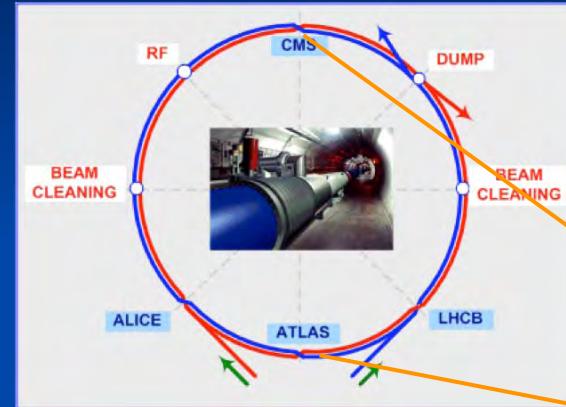
Higher Order Multipoles < 1 unit (10^{-4})

Beam Heating: 5 ~ 10 W/m

KEK が貢献: MQXA (16 + spare)

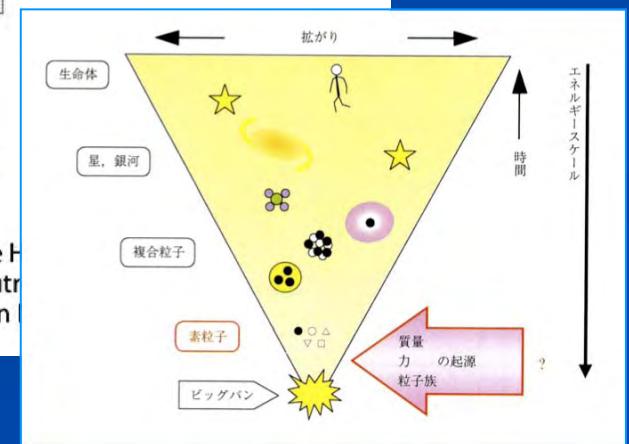
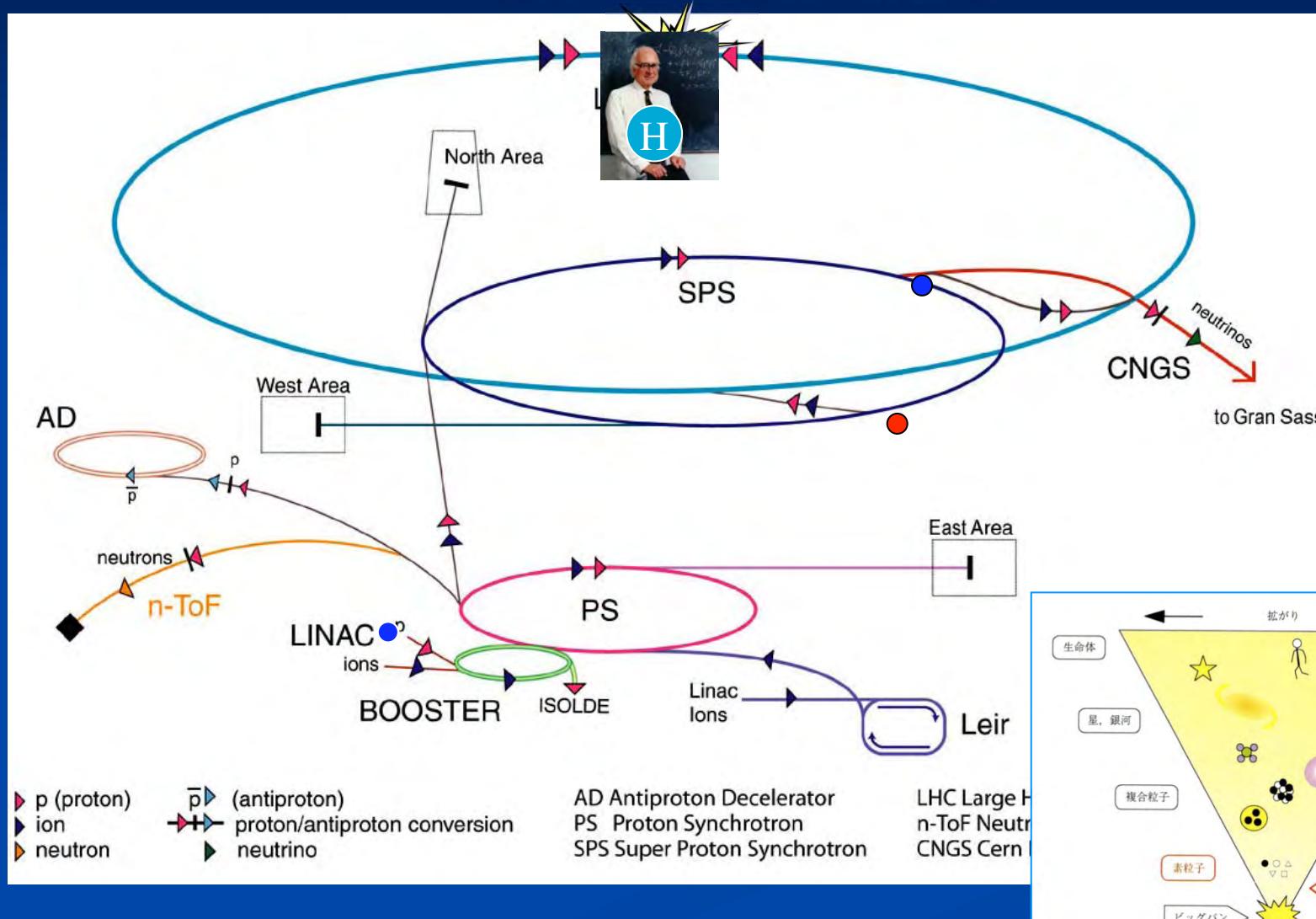


CERN-LHC ビーム衝突点収束磁石 KEK-Fermilab Collaboration



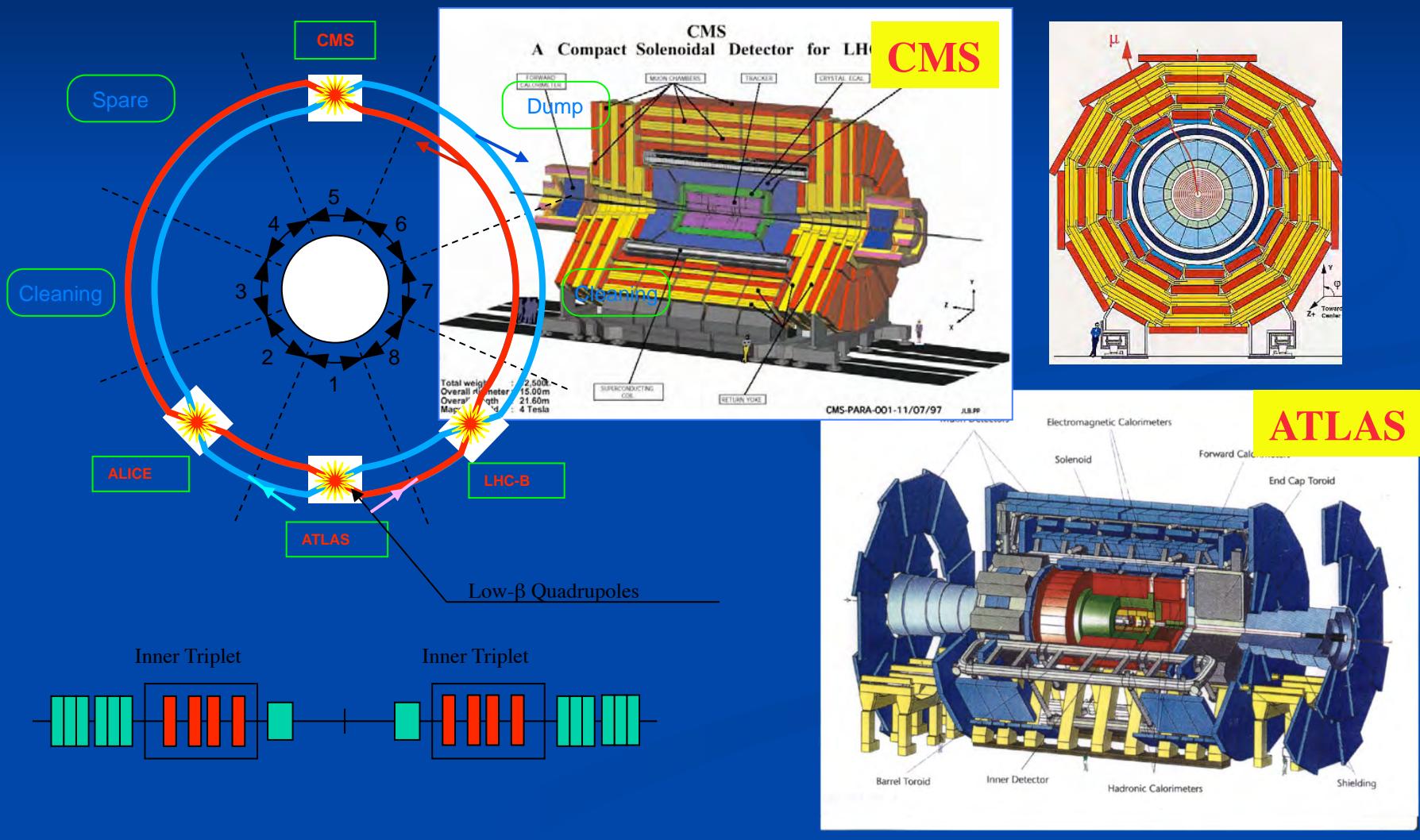
衝突点ビーム収束磁石:日本のLHC建設貢献
日(KEK)、米(Fermilab)間の国際協力

CERN LHC まもなく稼働 (2008-9-10)



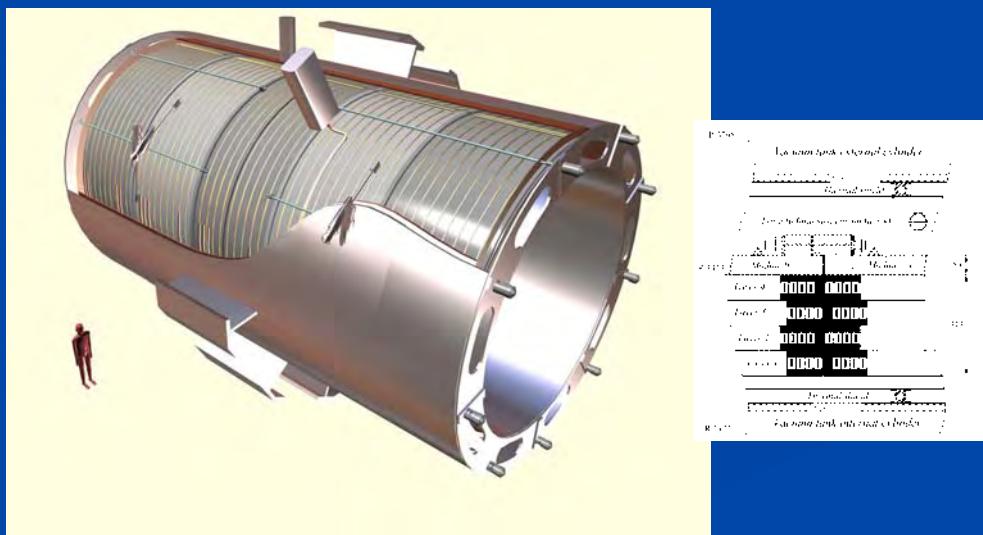
粒子検出器用超伝導磁石

CERN-LHC Experiments

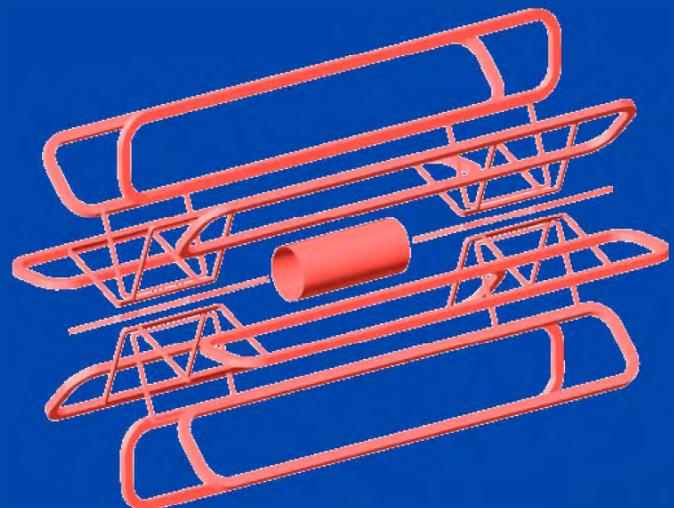
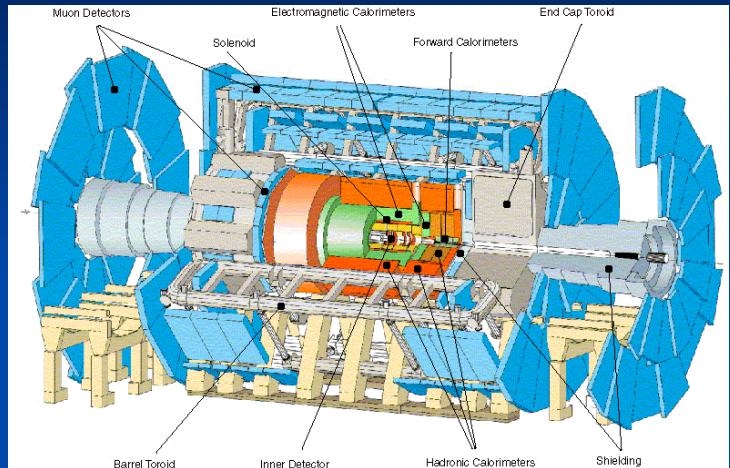


CMS

高磁場(4T)設計

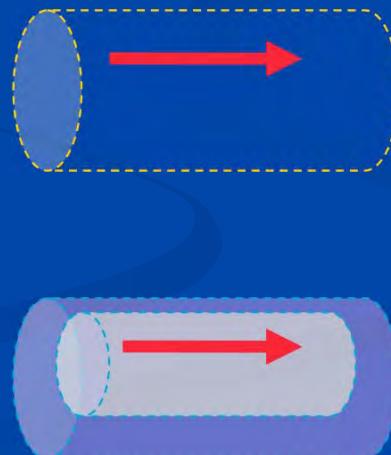


ATLASセントラルソレノイド 透明な磁場空間!!



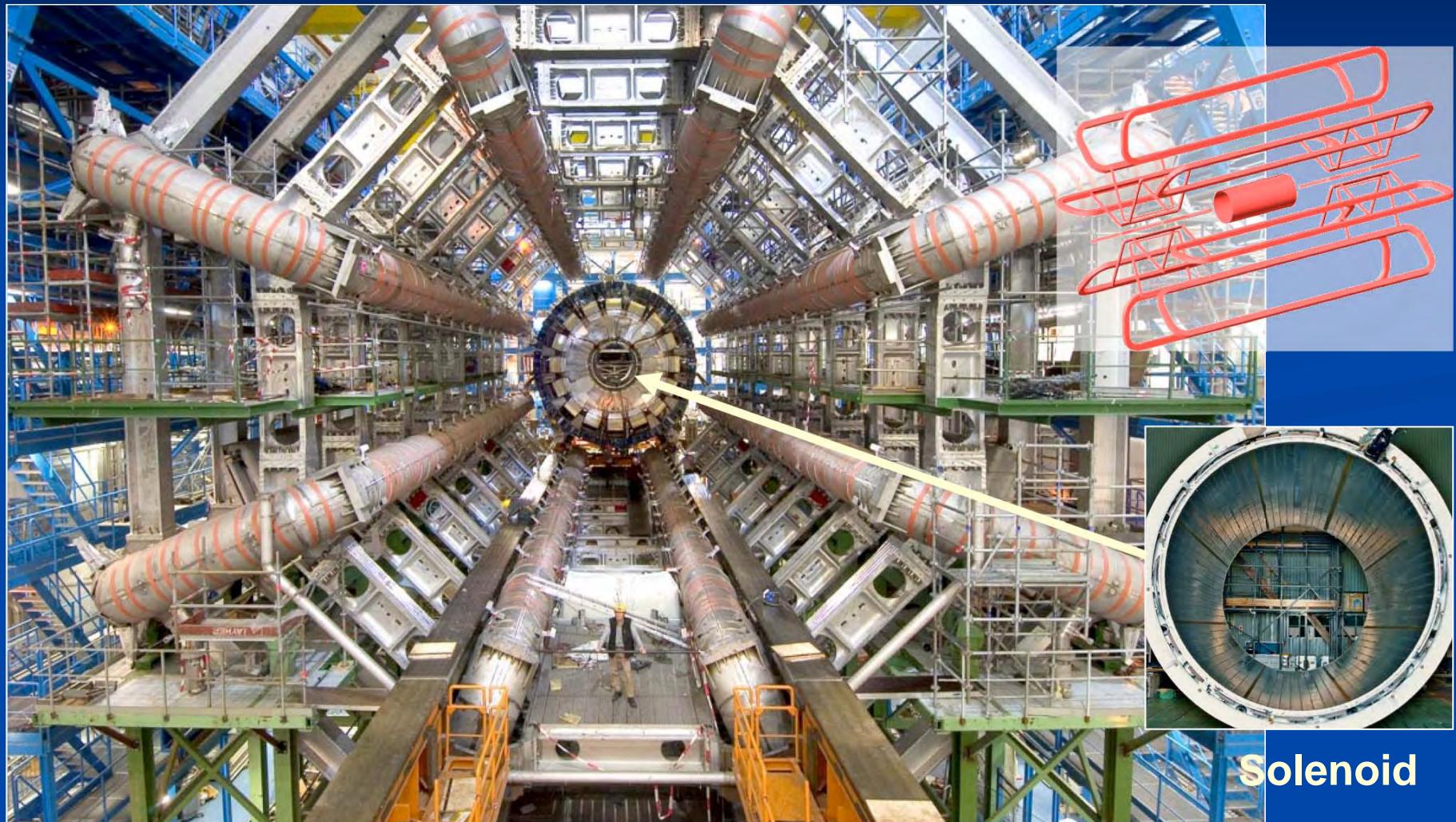
■ 理想

- 磁場だけ必要
- 理想に近づく為に、
 - 高電流密度(超伝導技術)
 - 軽量安定化(アルミ安定化)
 - 構造体

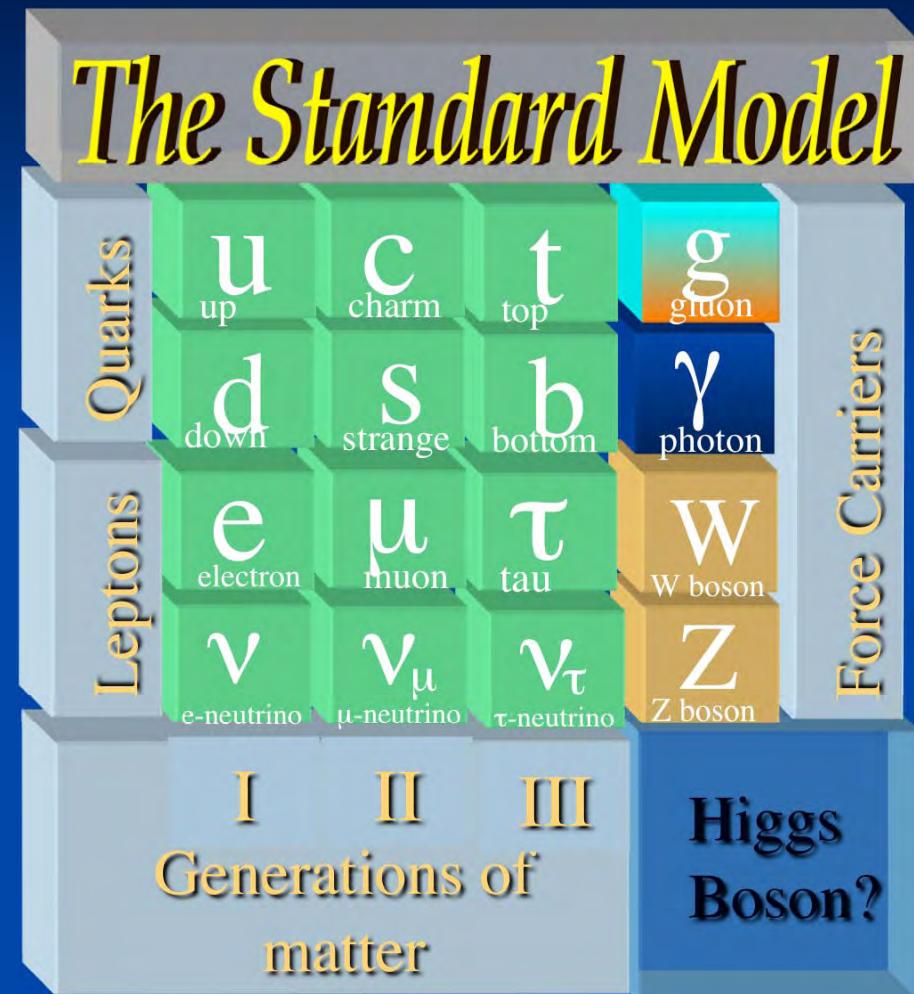


ATLAS 超伝導磁石システム

4 November 2005



これまで40年で確立した標準モデル：基本粒子

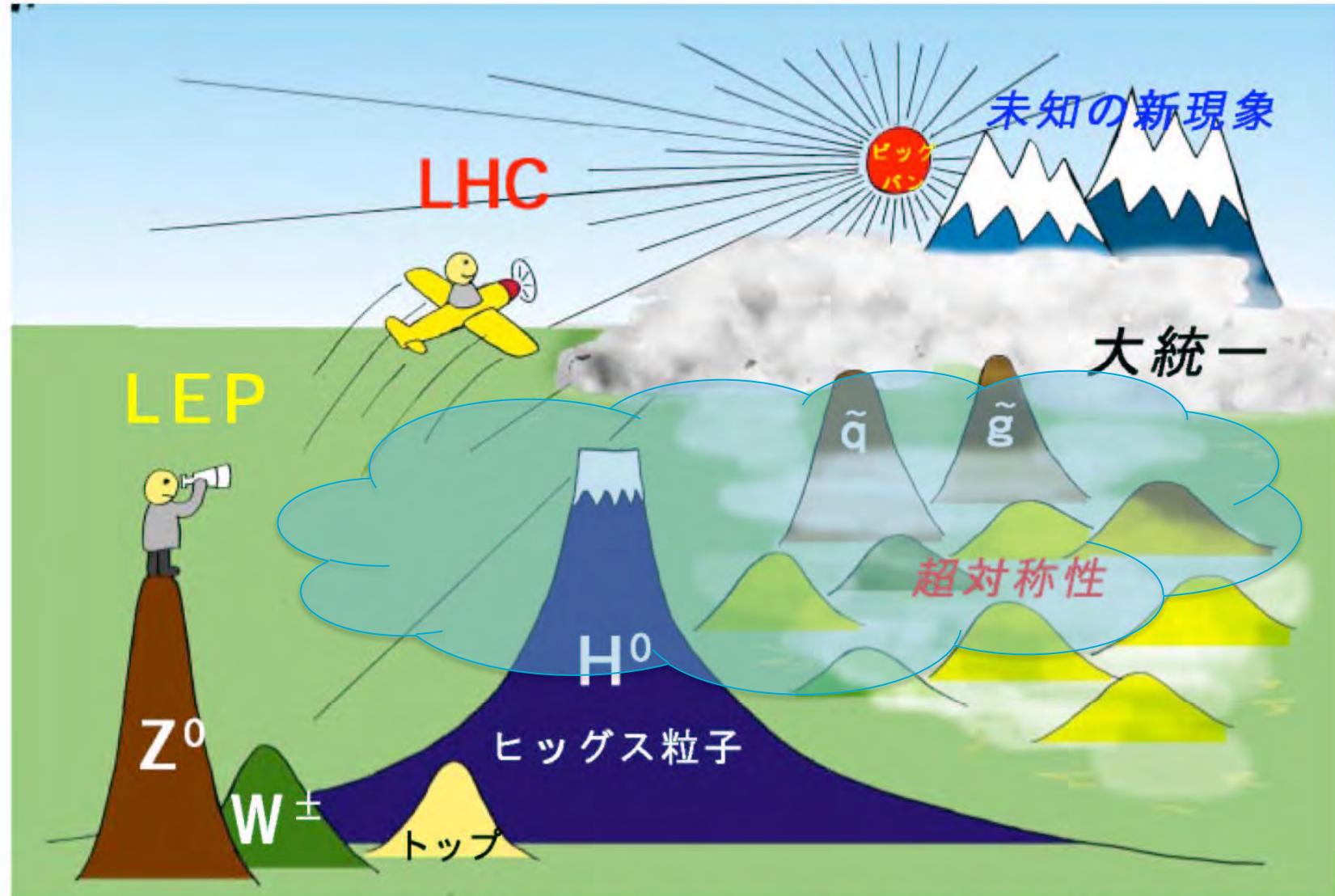


Particles
and
Forces



まだ、確認されていない
LHC実験での確認

LHC実験での素粒子物理学の展望



ヒッグス粒子、超対称性粒子も含め未知の新現象を俯瞰できる LHC

講演の内容

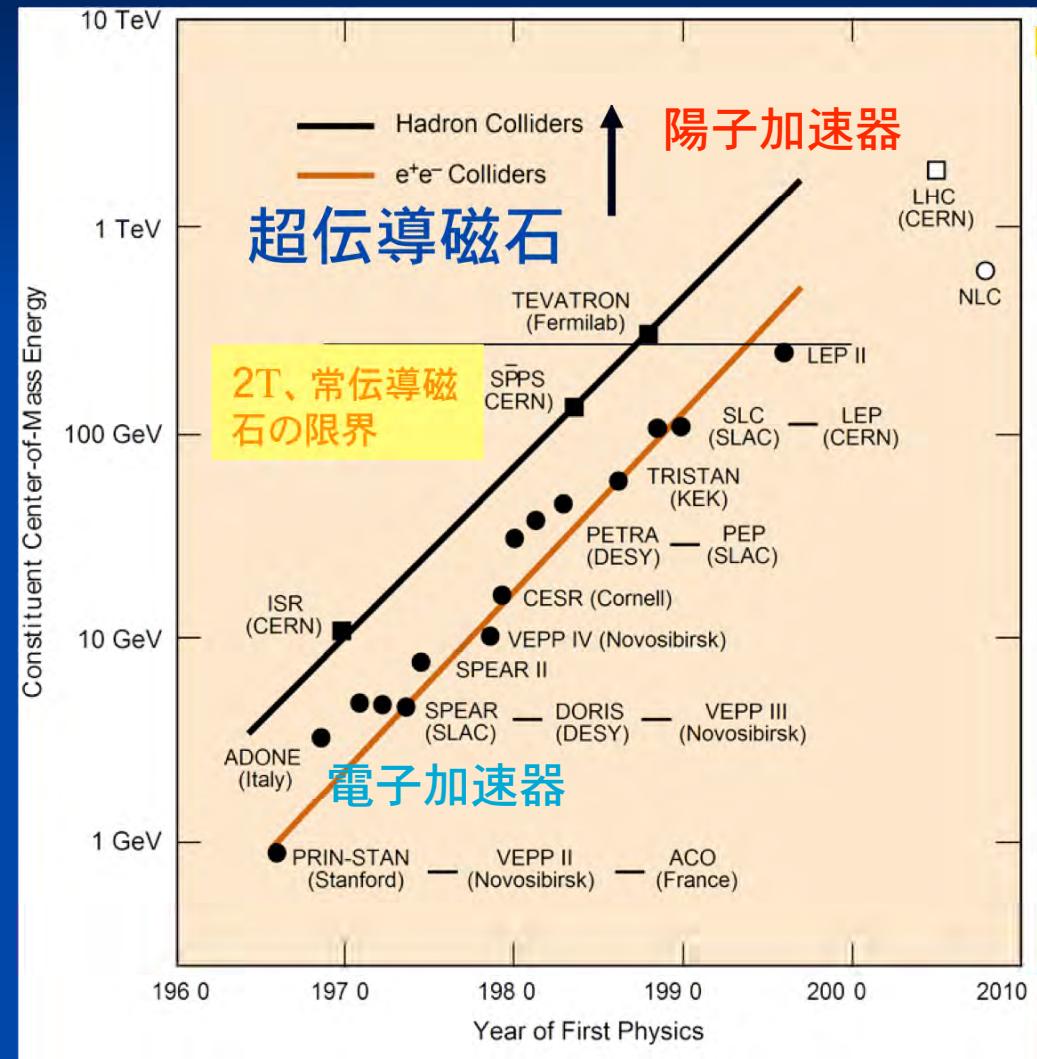
■ はじめに

- 高エネルギー加速器が探る宇宙のはじまりと歴史
- エネルギーフロンティアを担う先端技術、『超伝導』

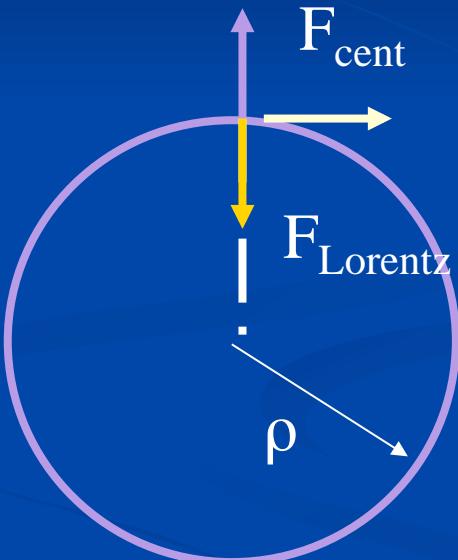
■ 超伝導技術が拓く加速器科学

- 超伝導って何?
- 粒子加速器、物理実験を先導する超伝導技術
- 将来への夢:国際リニアコライダー計画の実現にむけて
- 宇宙、エネルギー、社会生活の未来を担う超伝導
- まとめ

粒子加速器エネルギーの進展



■ 高エネルギー加速器では超伝導技術が不可欠



$$\mathbf{p} = \mathbf{q} \cdot \rho \cdot \mathbf{B}$$

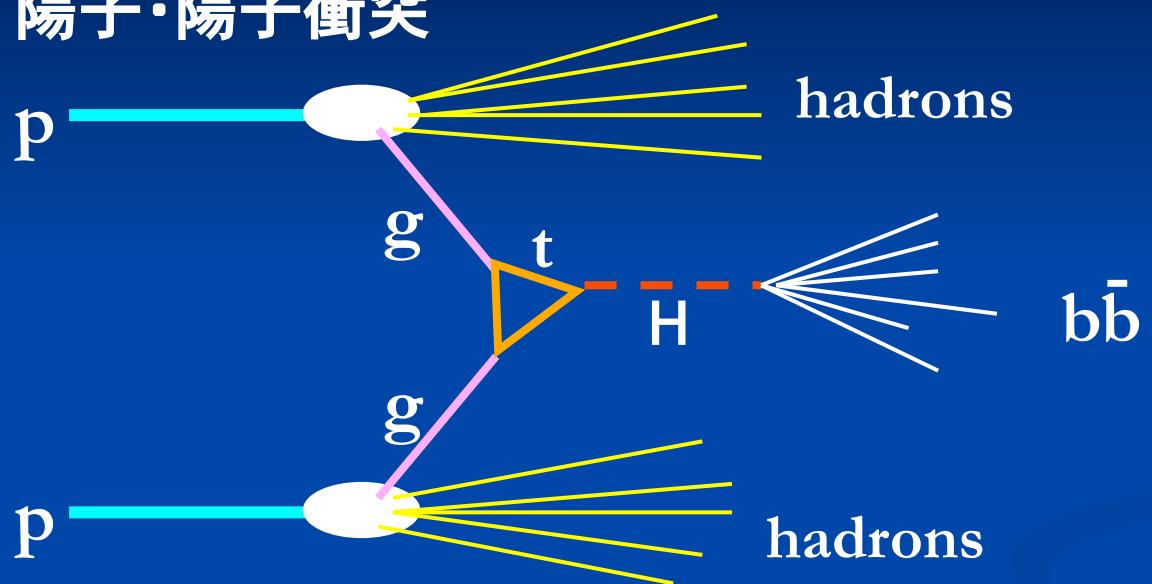
$$P [\text{TeV}/c] = 0.3 \cdot \rho [\text{km}] \cdot B [\text{Tesla}]$$

- High Magnetic Field required

陽子・陽子衝突 vs 電子・陽電子衝突

例 ヒッグス粒子生成

陽子・陽子衝突



陽子は複合粒子 ⇒
反応は複雑

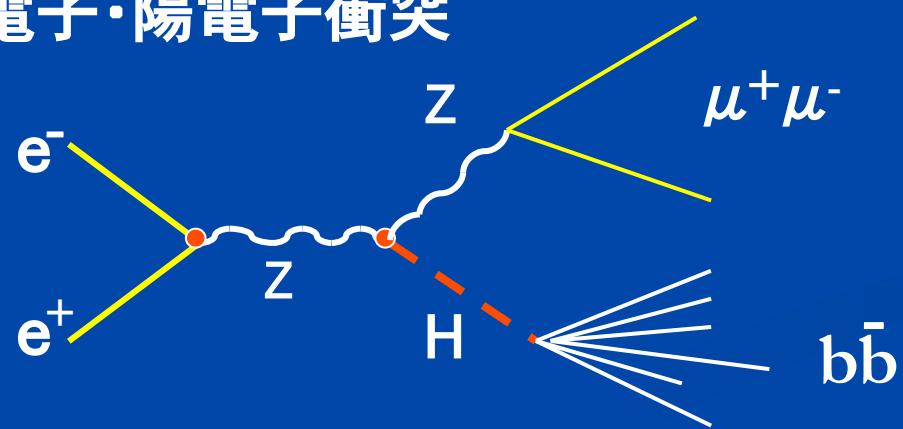


高放射線

高事象頻度

⇒ハイテクが必要

電子・陽電子衝突

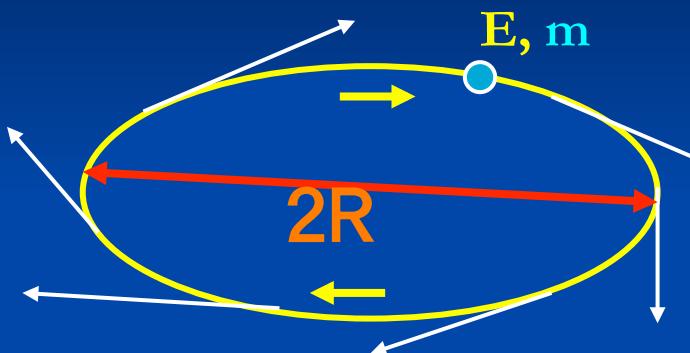


電子・陽電子は素粒子
素過程の直接観測

⇒ 実験は容易

円形電子・陽電子コライダーの限界

反応は単純、実験は容易 しかし...



電子は磁場で曲げられると放射光を出してエネルギーを失う。

一周に失うエネルギー ΔE は

$$\Delta E \propto (E/m)^4/R$$

E:粒子のエネルギー, m:粒子の質量
R:半径

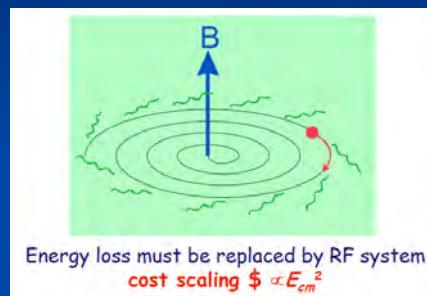
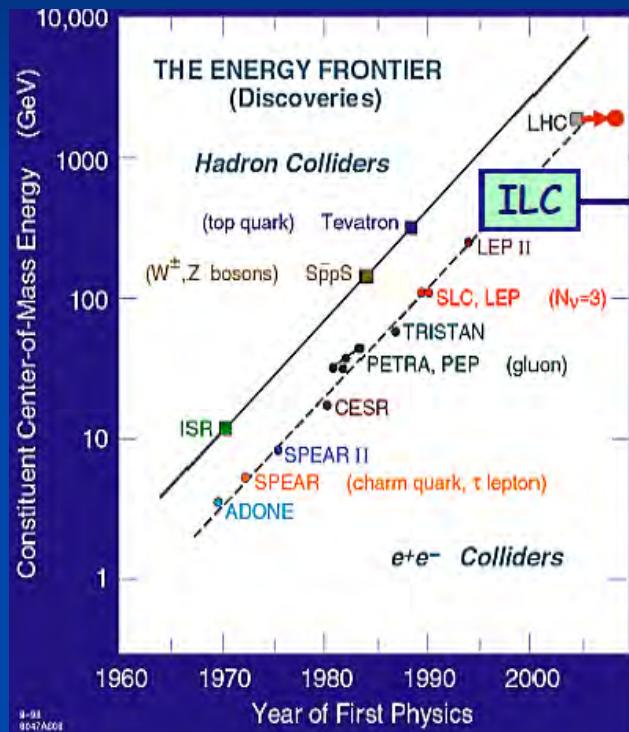
ローン破産のような状態

>> エネルギー欠損を補ってより高いエネルギーを得たい

(1) 重い粒子を回す (陽子質量/電子質量=1800) \Rightarrow LHC

(2) Rを大きくする \Rightarrow LEP(周囲27km)が限界 \Rightarrow ILC

円形から線形加速器へ

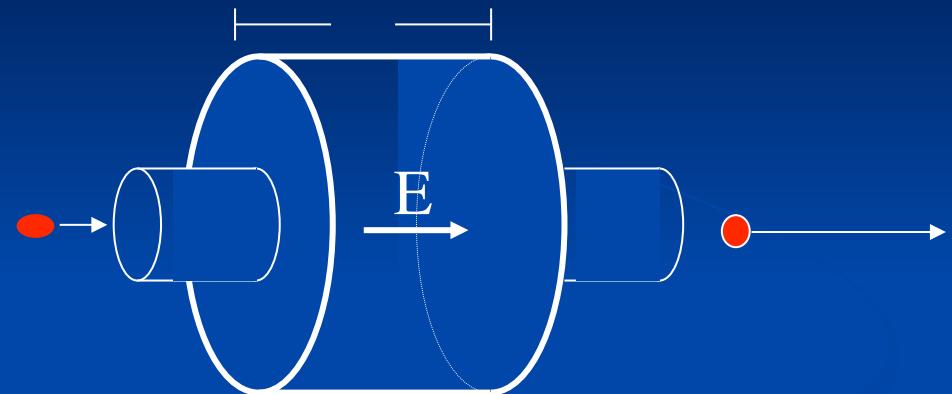
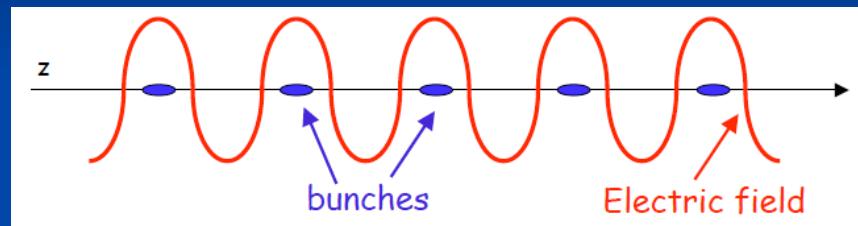


Electron machine
Ring accelerator
-->> Linear Accelerator



加速器における加速電場と超伝導応用(加速空洞)

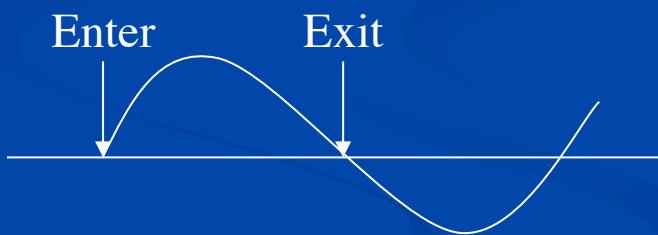
$$\vec{F}_{\text{Lorentz}} = \frac{d\vec{p}}{dt} = q \cdot (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) = \vec{F}_{\text{el}} + \vec{F}_{\text{mag}}$$



$$\Delta E = \Delta T = \int \vec{F}_{\text{Lor}} \bullet d\vec{s} = q \cdot \int \vec{E} \bullet \vec{v} \cdot dt$$



E



time

Freq = ~ 1 GHz

加速空洞によるビーム加速

導体に囲まれた空洞共振器

電極間距離を粒子速度に一致させる
放射損失を防ぐために導体で囲む

超伝導高周波加速空洞:

加速電圧: V_c

電気抵抗により空洞壁でジュール損失: P_c

$$R_0 = \frac{V_c^2}{P_c} = \frac{V_c^2}{\frac{1}{2} \int_s R_s H^2 ds}$$

R_o : 空洞性能(シャントインピーダンス)

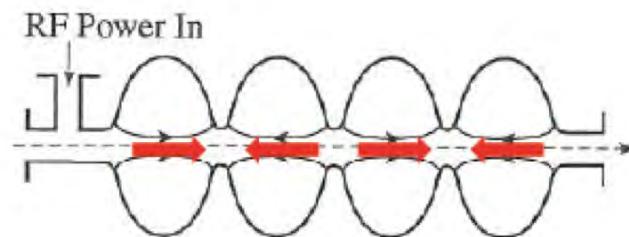
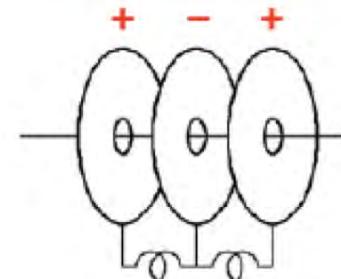
R_s : 高周波表面抵抗

空洞材料を超伝導体にすると、発熱が10万分の一から百万分の一になる

高い加速電圧がCWで得られる

電力効率が良い → 100Wで1000万ボルトの電圧を作ることが可能。

CW運転: continuous wave運転 cf: DC運転



- Ref: 古谷貴章(先端加速器科学技術協議会技術部会講演, 2009-10)

超伝導加速空洞の特徴

超伝導空洞の表面抵抗は

表面抵抗: R_s

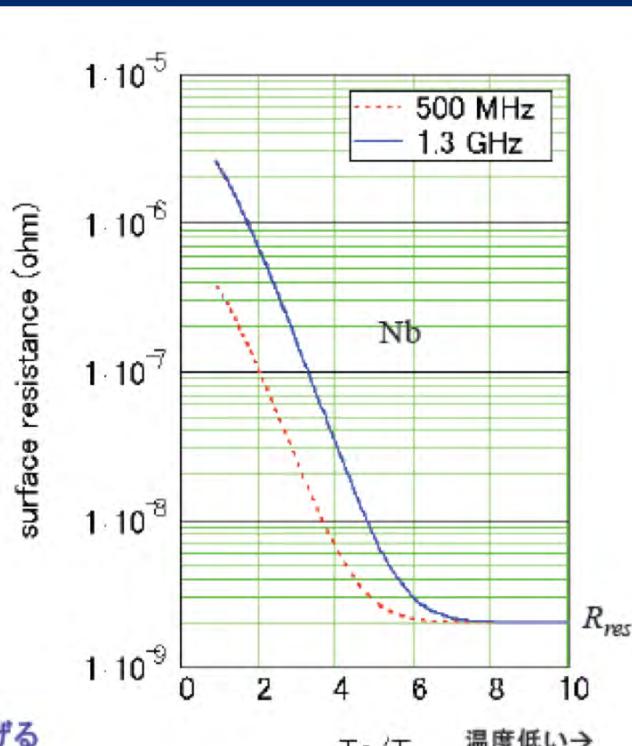
$$R_s = R_{BCS} + R_{res},$$

↓
↓
残留表面抵抗: R_{res}

BCS理論による: R_{BCS}

$$R_{BCS} = A \frac{\omega^2}{T} \exp\left(-\frac{\Delta(0)}{k_B T_c} \cdot \frac{T_c}{T}\right)$$

- ・超伝導材質と周波数、温度に依存する
- ・低い周波数を選ぶ、あるいは運転温度を下げる
- ・付加的な残留抵抗を減らすことが大事である



- Ref: 古谷貴章(先端加速器科学技術協議会技術部会講演, 2009-10)

加速空洞を超伝導化すると

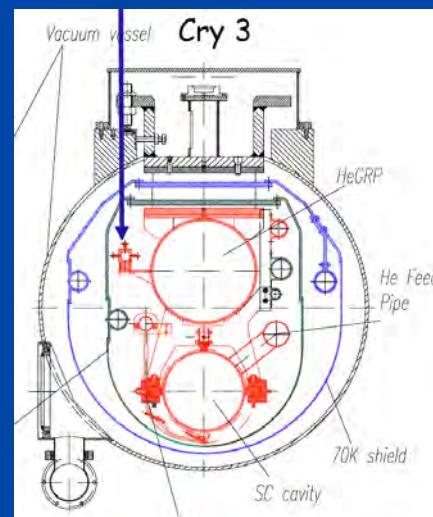
■ 超伝導化により

- 高周波抵抗が小さい
- パワーロスが小さい
- Q値(蓄積エネルギー／エネルギー損失)が大きい
- 周波数を低く、口径を大きく
- ビームロスが少ない(スクレーパー等が少ない)

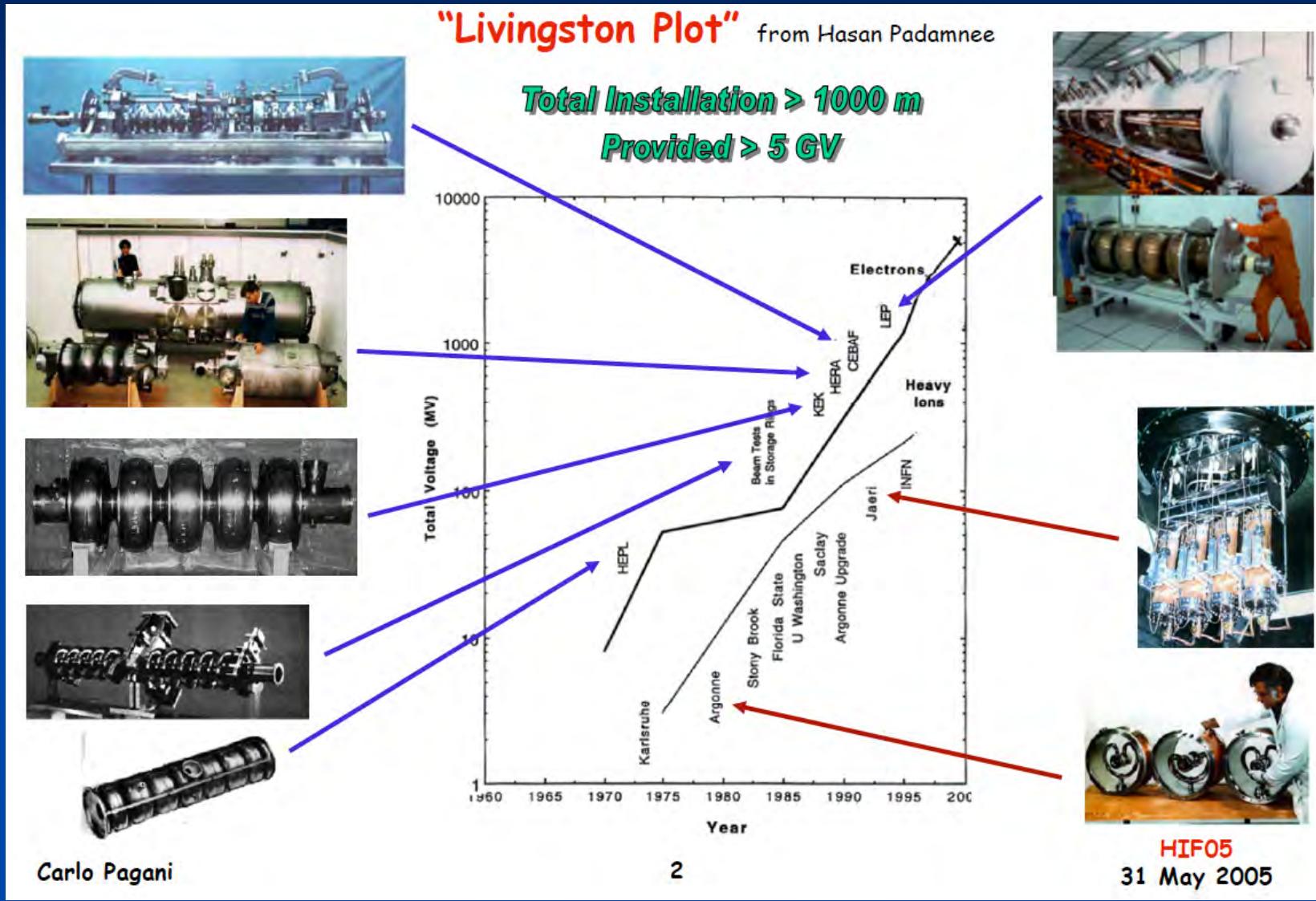


■ 低温化の為に

- クライオスタッフ(断熱真空容器が必要)
- 冷却、冷凍機の電力



高周波加速空洞による粒子加速器



大電流加速器への応用

大電流蓄積型加速器(ファクトリー加速器)

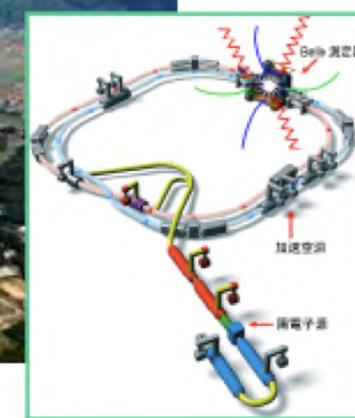
- ・1990年代に精密実験のための高ルミノシティー加速器が提案された(Bファクトリー)
- ・アンペア級の電子・陽電子ビームを蓄積し衝突させる蓄積リング型衝突加速器(ファクトリー)であり、**cwで運転できる強力なRFシステム**が必要である
- ・大電流加速では、多数のパンチに分けて蓄積するため、高調波による結合パンチ不安定性が生じる
- ・有害なインピーダンスの主因は高周波空洞であり、空洞の高調波インピーダンスを下げる必要がある。



コーネル大（米国）CESR-B



KEKB



超伝導加速空洞・加速器の進展と これからの期待

年	進展	ノート
1965	超伝導加速空洞加速器応用研究のはじまり	3-4 MV / m
1978	連続運転の重イオンリニアック	
1988	高エネルギー電子蓄積リング (KEK/TRISTAN)	
1996	連続運転電子リニアック (JLab-CEBAF)	
1996?	高エネルギー電子蓄積リング (CERN -LEP)	
1998	大電流蓄積リング (KEK-KEKB)	
2006	大電流陽子加速リニアック	
2007	クラブ空洞の実現 (KEK-KEKB)	
これから	FEL	25 MV / m, pulse
	ILC	31.5 MV / m, pulse
	ERL リニアック (大電流)	15-20 MV / m, cw

European XFEL Facility

ドイツ・ハンブルグ

Introduction



エネルギー回収型加速器の応用

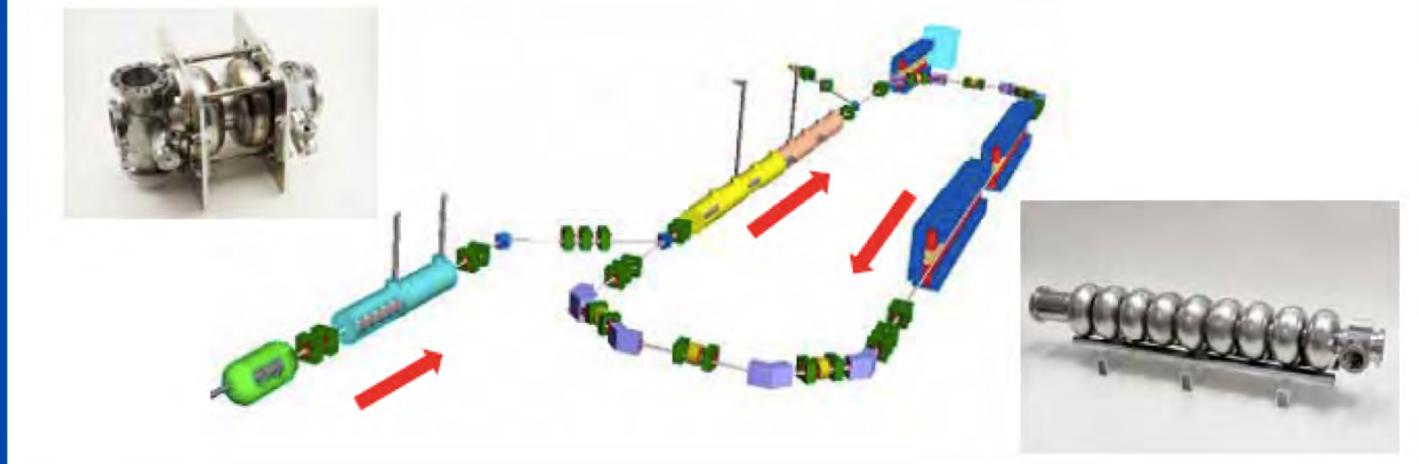
ERL : Energy Recovery Linac (エネルギー回収型リニアック)

リニアックビームの特性を備えた放射光リング

リニアックの極細ビームを加速、同じ加速管に減速位相で再入射。
エネルギーだけを電磁場として回収して、新しい入射ビームを加速。
原理は1965年にM. Tignerにより提唱された。

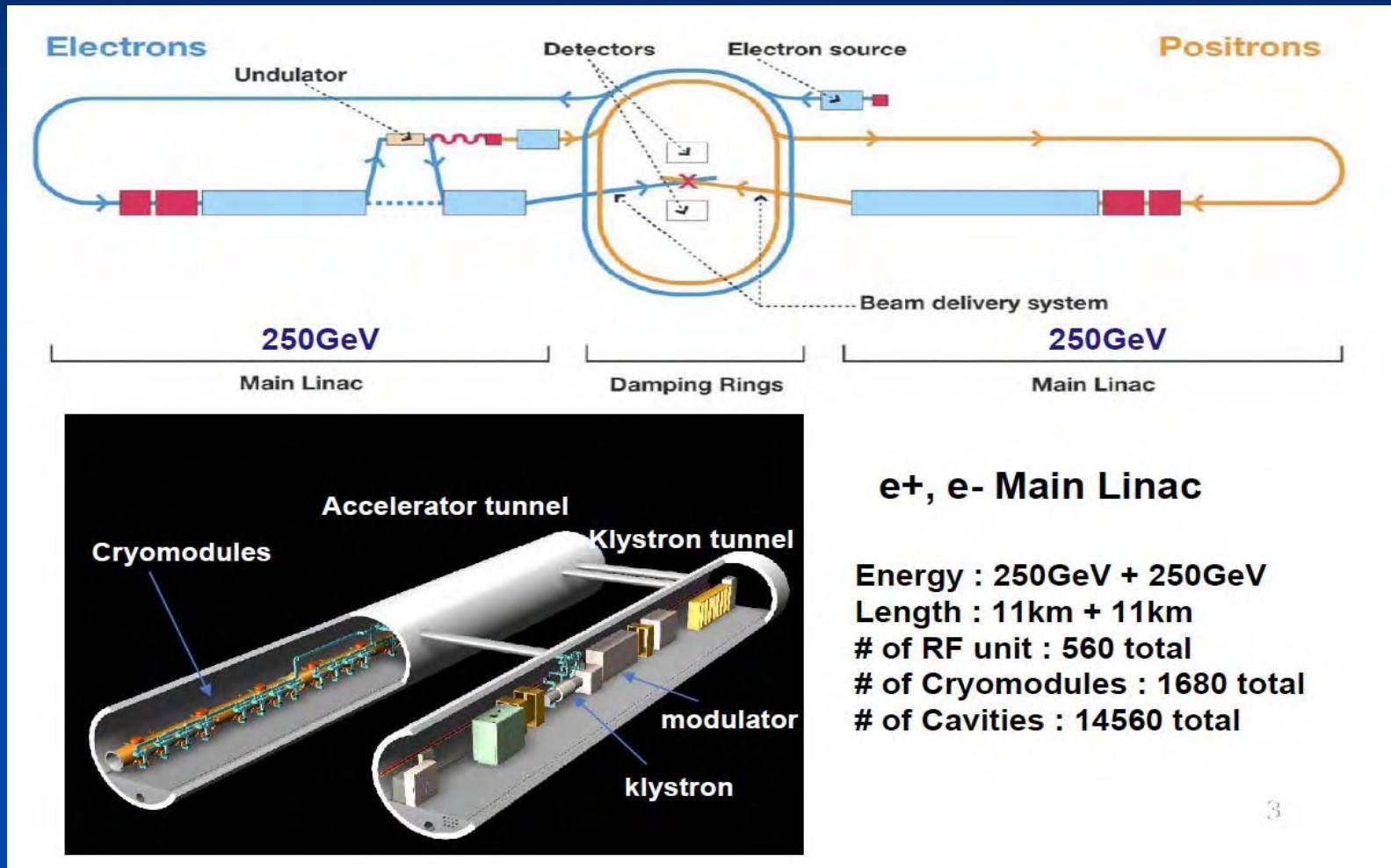
超伝導空洞の究極の応用

高い連続(CW)運転 → 高電界空洞の実現
高い加速電流(100mA + 100mA) → 高調波対策(大電流がビームを乱す)



■ エネルギー効率の良い超伝導加速器

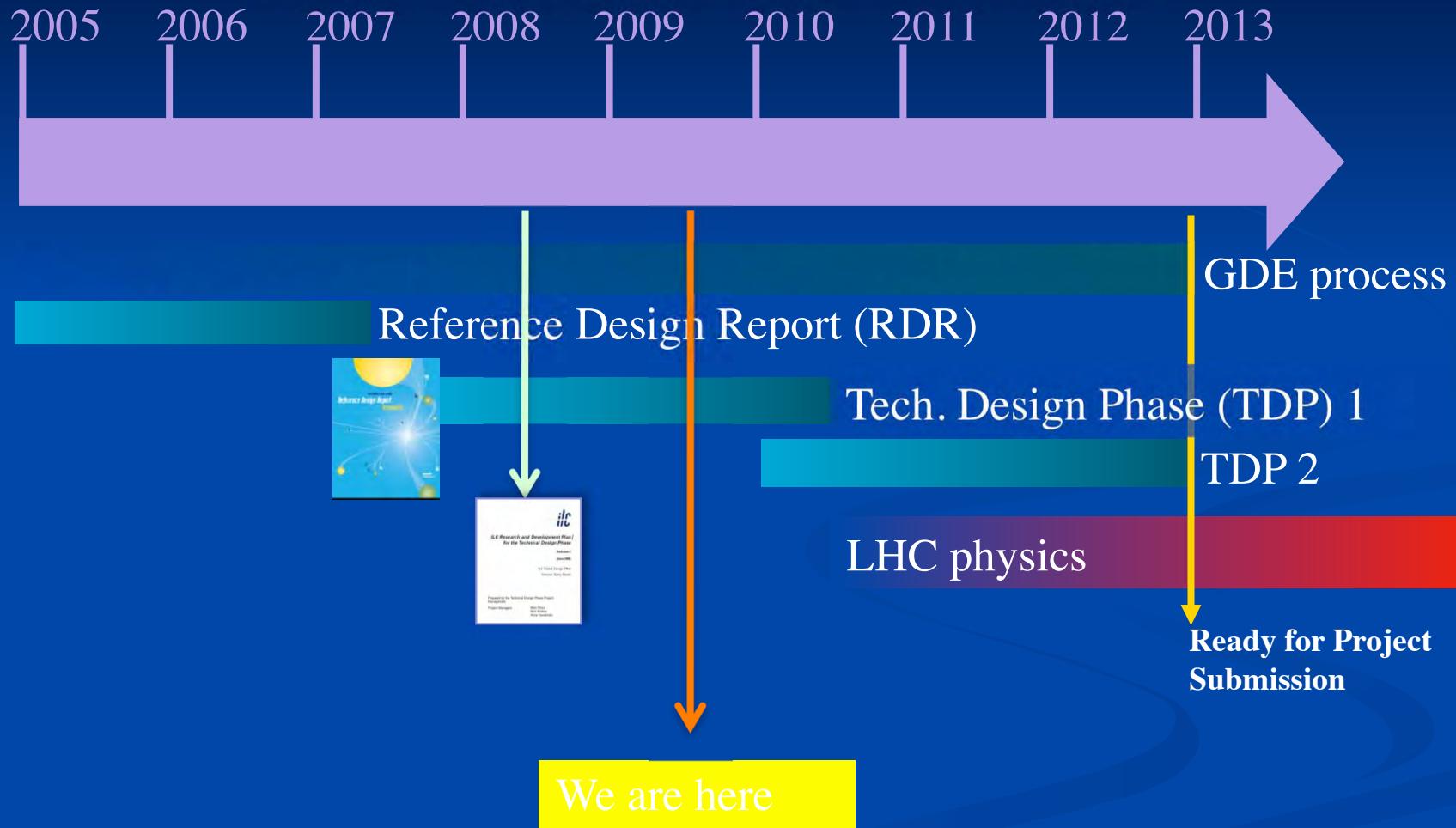
国際リニアコライダー(ILC)



ILC実現にむけた国際協力



GDE: ILC Timeline



超伝導加速空洞の設計

形状の最適化

・高い加速電場を得る

低い表面電場: 電界放出の抑制
低い表面磁場: 臨界磁場の制限
MPを抑制する球形空洞形状
高いRを有する多セル空洞

・高い電流値を得る

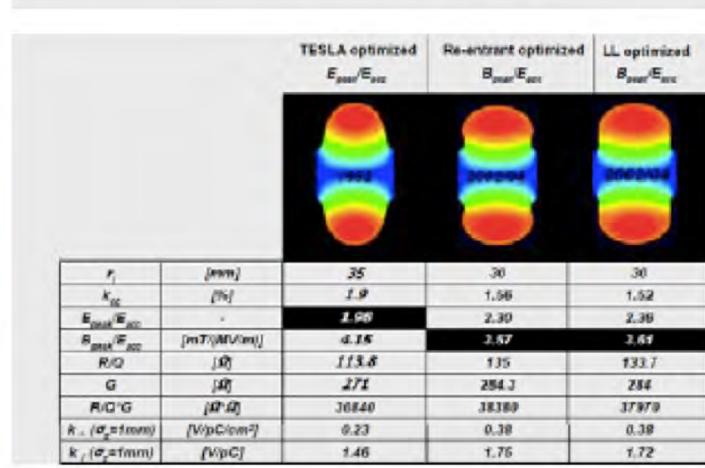
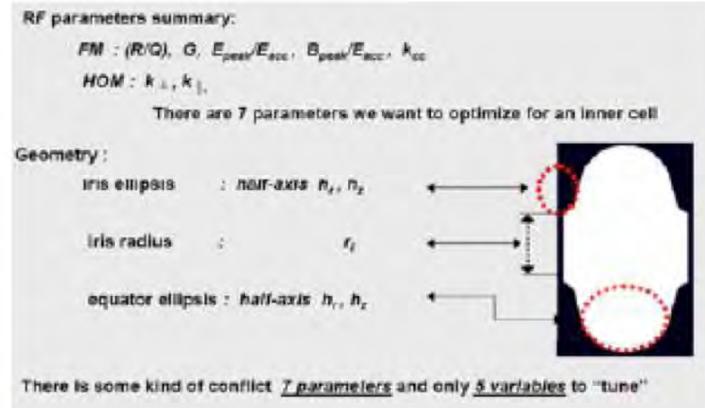
低いR/Q: 蓄積エネルギーを増やす
口径の大きな単セル構造:
高調波(HOM)を減らし取り出す
空洞あたり電力を軽減する

・製作工程からの要求

滑らかな曲面: 洗浄のしやすさ
単純な形状: 部品加工のしやすさ
溶接工程を減らす
ポートは電界放出の原因
機械強度の保証: 冷却からは板厚は薄い方が有利

・計算コード:

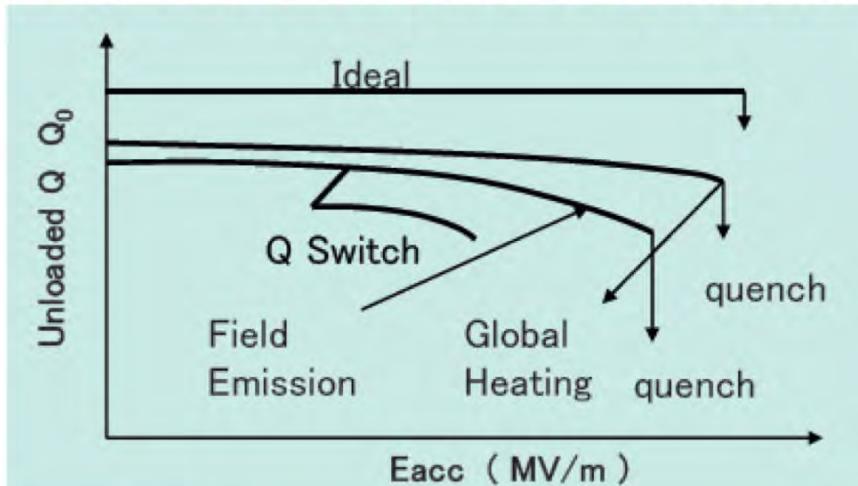
SUPERFISH, CLANS, MAFIA, HFSS, GdfidLなど



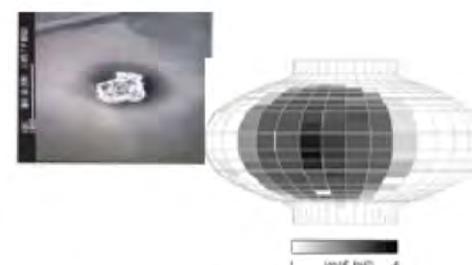
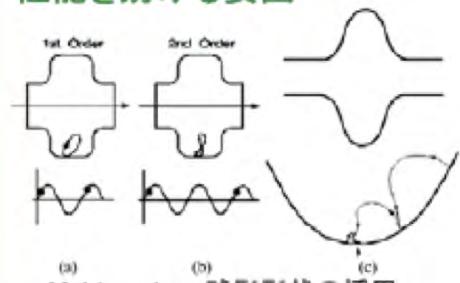
- Ref: 古谷貴章(先端加速器科学技術協議会技術部会講演, 2009-10)

超伝導加速空洞の性能制限

Q-E特性: 空洞ロスの逆数と加速電場の相関

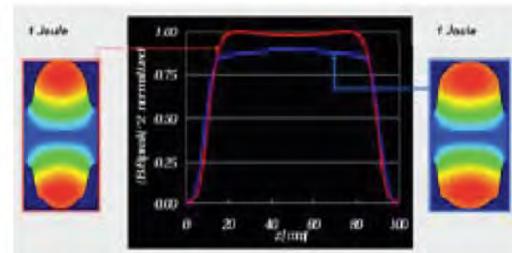


性能を妨げる要因

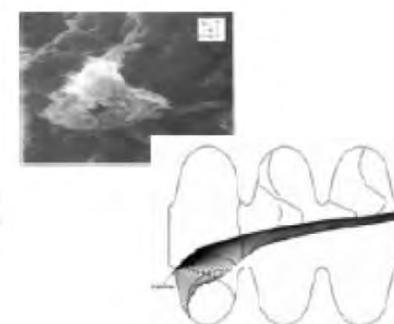


熱破壊: 表面欠陥による発熱
Nbの熱伝導度を改善

理論的な限界
Q値は加速電場に依存せずに臨界磁場まで。
(Nbでは 50 MV/m 程度とされる)



ピーク磁場を抑えた形状が採用される



電子放出: 放出源の存在
空洞表面の管理

冷却することとのバランス

超伝導空洞の power loss

Nb, 1.3 GHzなら

2Kで高周波抵抗は $13 \text{ n}\Omega$

TESLA空洞は
10 MV/mなら 5 W/m
35 MV/mなら 61 W/m

CW運転が可能

ビームへの電力は

$$35 \text{ MV/m} \times 10 \text{ mA} = 350 \text{ kW/m}$$

これに比べると、空洞損失は無視できる
(高効率)

冷凍機能力の制限がある

2Kでの 61 W/m を冷却するのに 60 kW/m 程度の電力を消費する

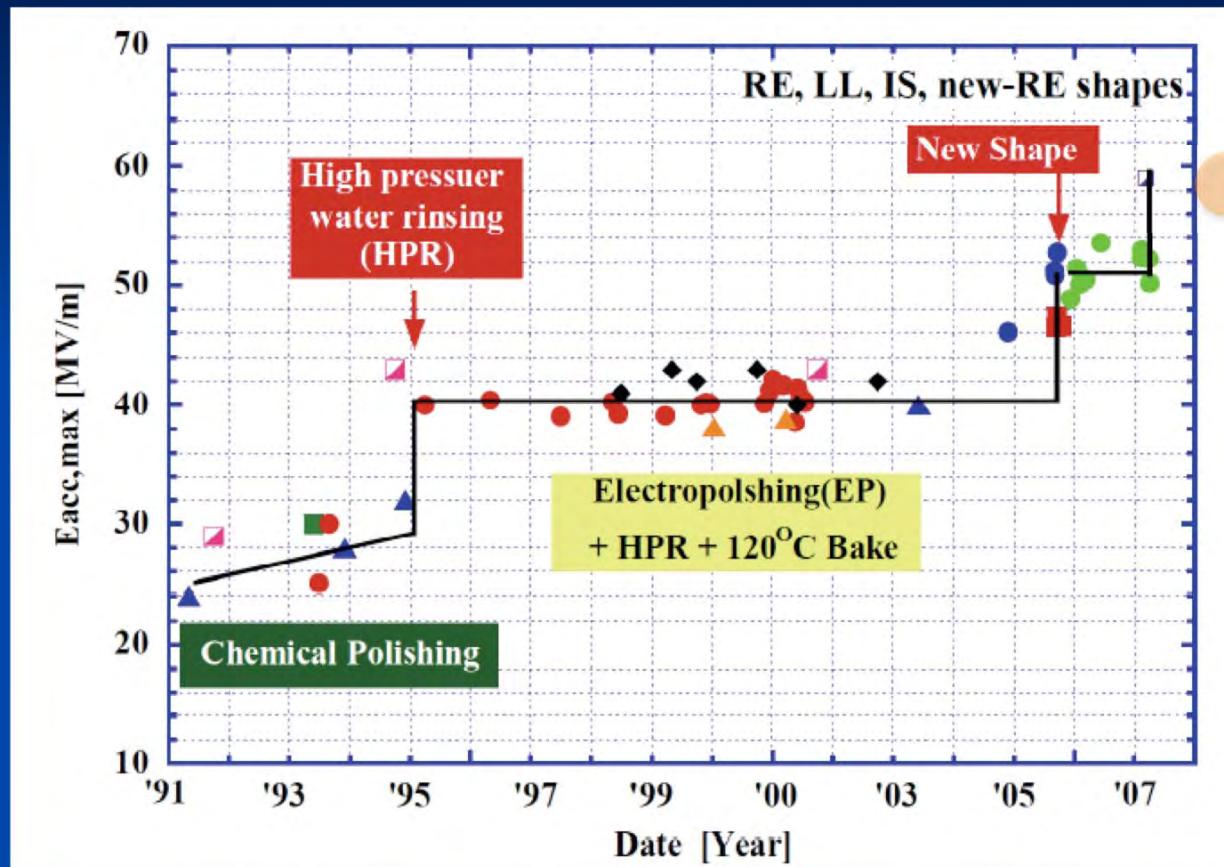
全長 20 kmでは 1200 MWになる

超伝導といえどもパルスにする必要がある。
ただし、常伝導に比べるとduty cycleは
3桁程度大きい値が可能である。



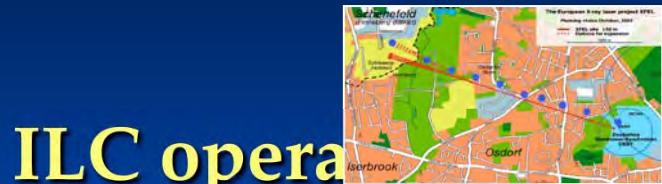
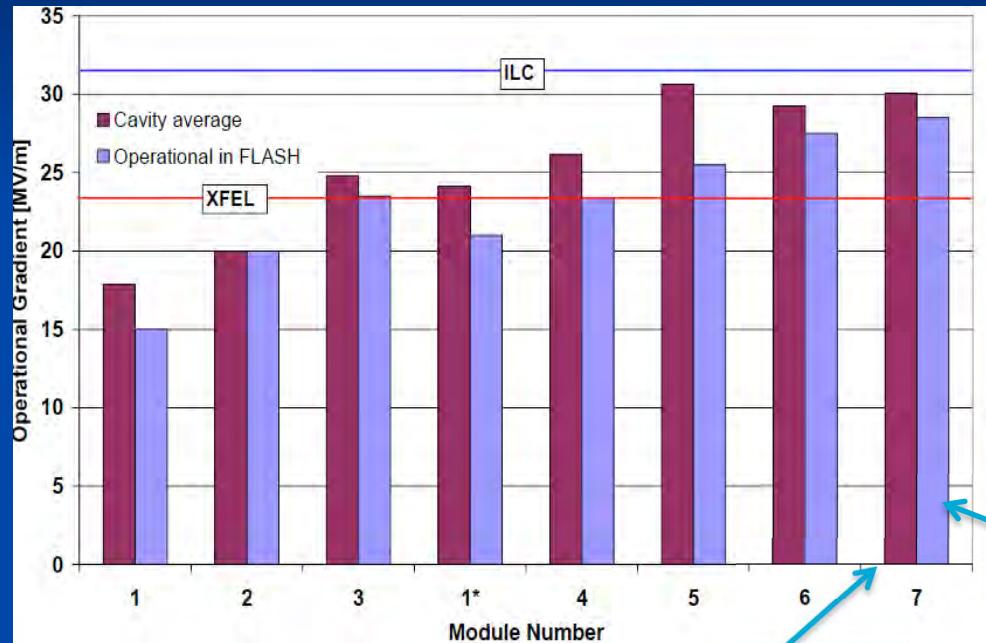
超伝導空洞は高い加速電圧での
CW運転、あるいはロングパルス運転
ができる。
(低いピーク値で、高い平均電流が狙える)

単一空洞基礎開発の進展



- KEK-Conellの協力：最高性能記録を樹立
- Record of **59 MV/m** achieved with the RE cavity with EP, BCP and pure-water rinsing with collaboration of Cornell and KEK
- (K. Saito, H. Padamsee et al., SRF-07)

加速器ユニットとしての性能の進展 in progress at TESLA/FLASH toward EuroXFEL



ILC opera
■ <31.5> MV/m
R&D Status:
■ ~ 30 MV/m to meet
XFEL requirement



•9連空洞 x 9: 加速器ユニットとしては、30 MV/mのレベル、
>> さらに開発、性能の向上／安定性が不可欠

鍵となる課題

■ 空洞(基礎開発)

- 表面欠陥のない材料(単結晶材の可能性)
- 成形技術、電子ビーム溶接、内面の安定化
- 表面処理
 - 電界研磨
- 表面清浄
 - 高圧超純水洗浄、
 - エタノールリンス、洗浄剤、マイクロEP
- 表面観察技術

■ 空洞ユニット(マルチセル)

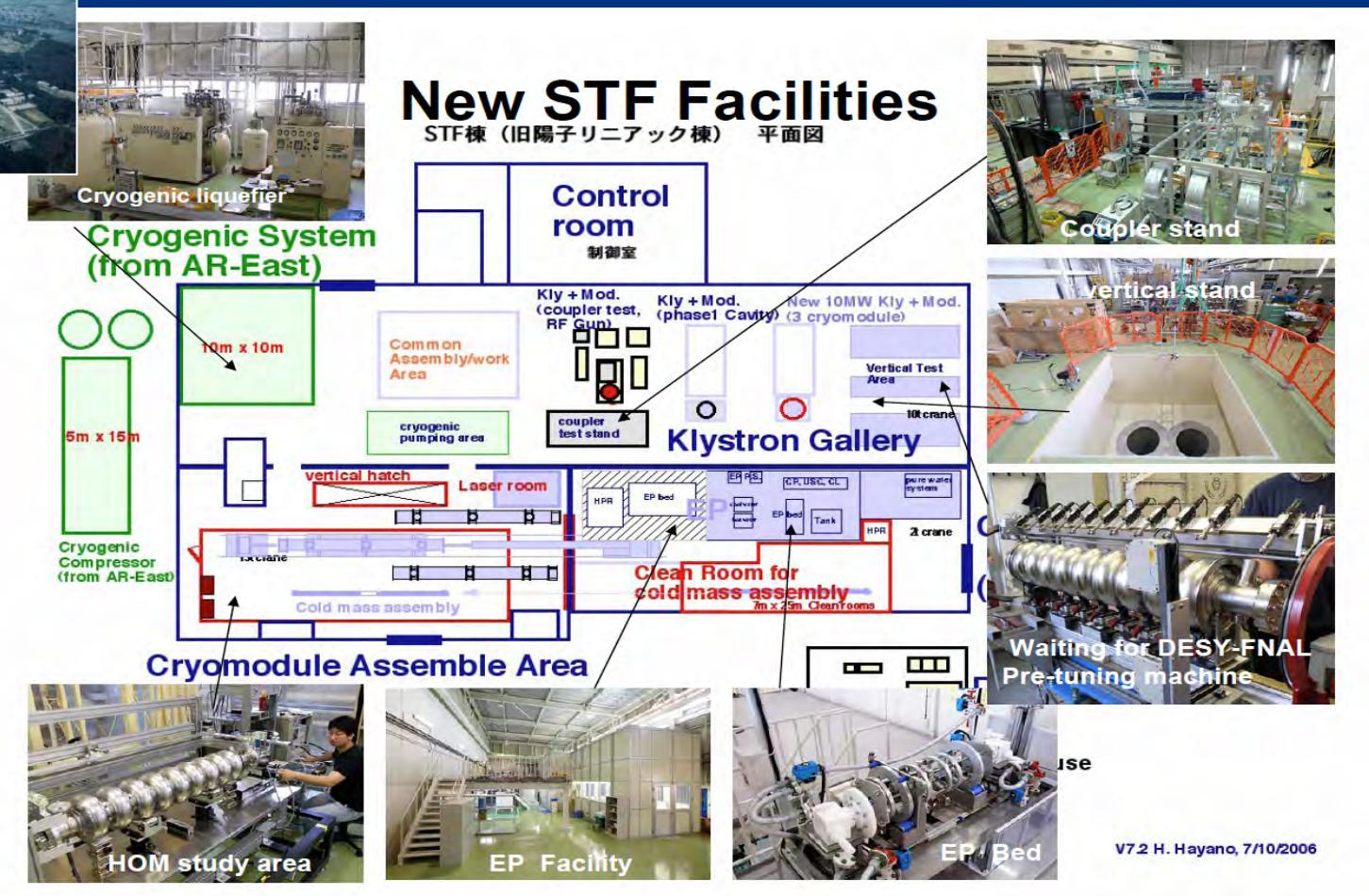
- 端部インターフェース
 - カプラー等取り合い
- 異種材ジョイントフランジ(Nb>>SUS)
 - ヘリウム容器(外筒)SUS化基本技術
- アラインメント



KEKにおける超伝導加速空洞開発



STF実験棟(KEKBリング内)



STF-2 計画

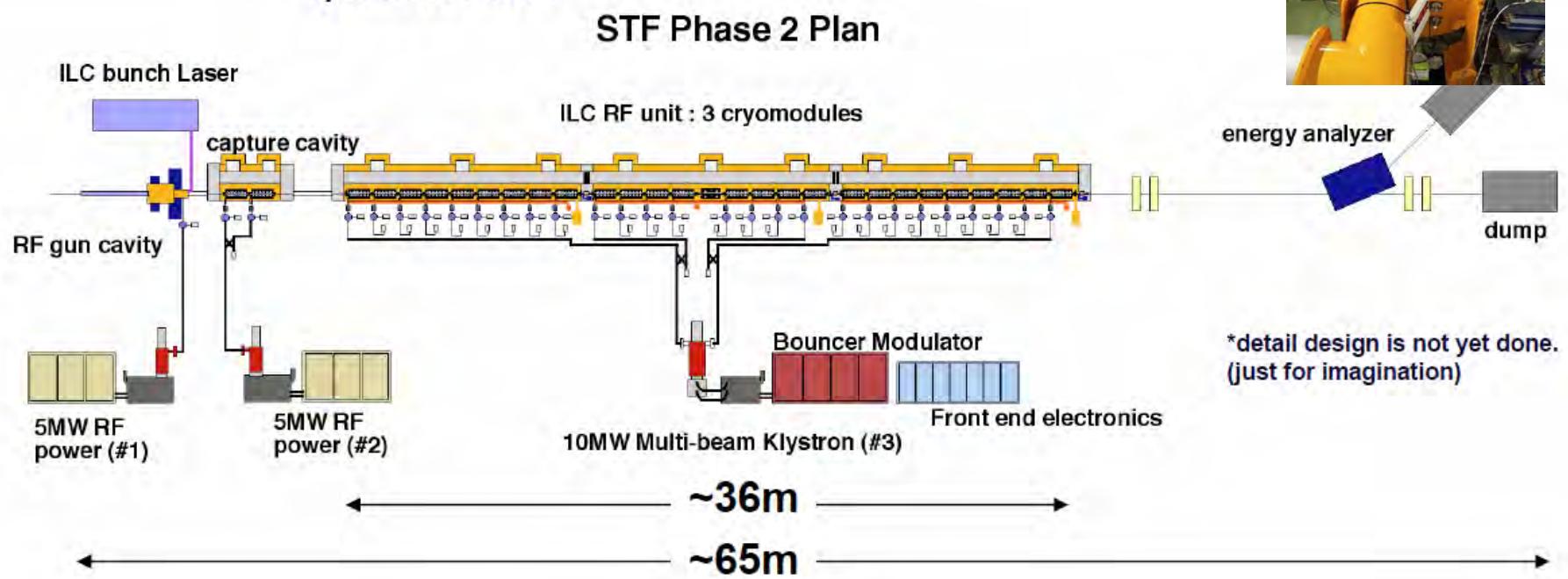
システム・ビーム加速試験

*ILC RF unit test, in the existing STF tunnel,
With ILC beam by L-band RF-gun.*

design and preparation of vessel code : 2008

fabrication : 2009 - 2010

operation : 2011



講演の内容

- はじめに
 - 高エネルギー加速器が探る宇宙のはじまりと歴史
 - エネルギーフロンティアを担う先端技術、『超伝導』
- 超伝導技術が拓く加速器科学
 - 超伝導って何?
 - 粒子加速器、物理実験を先導する超伝導技術
 - 将来への夢:国際リニアコライダー計画の実現にむけて
- 宇宙、エネルギー、社会生活の未来を担う超伝導
- まとめ

宇宙における反粒子・反物質？

■ 反粒子？

- 電荷の符号が反対の粒子
- 陽子の反粒子は反陽子

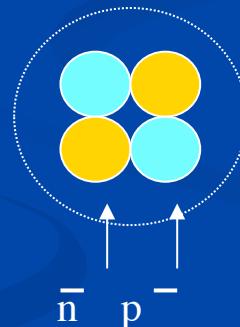
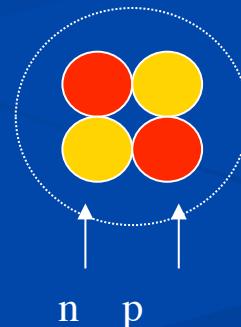
粒子 反粒子
陽子(+) 反陽子(-)



■ 反物質？

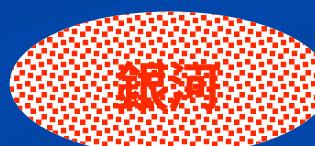
- 反粒子によって構成された物質

物質 反物質
ヘリウム 反ヘリウム



■ 反銀河

- 反物質で構成された銀河



反粒子、反物質は消滅？

サハロフ、吉村

■ 物質／反物質対称性の破れ？

ビッグバン宇宙において

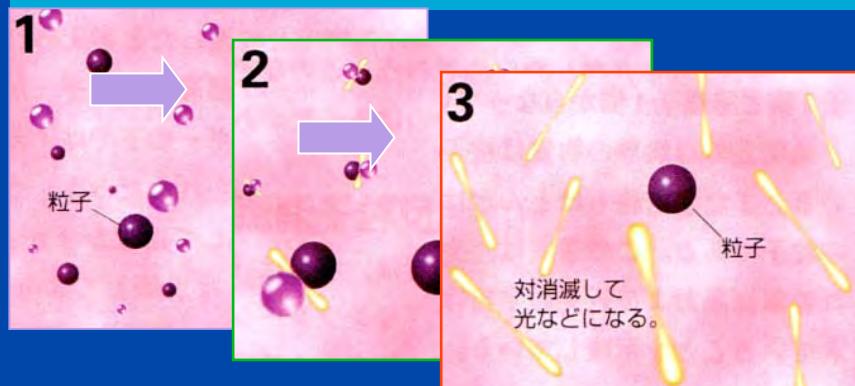
- 温度が下がり重粒子が崩壊して 粒子と反粒子が生成。その時、
- バランスが僅かに崩れる

粒子: $10^{8\sim 9}+1$

反粒子: $10^{8\sim 9}$

粒子／反粒子が出会うと対消滅

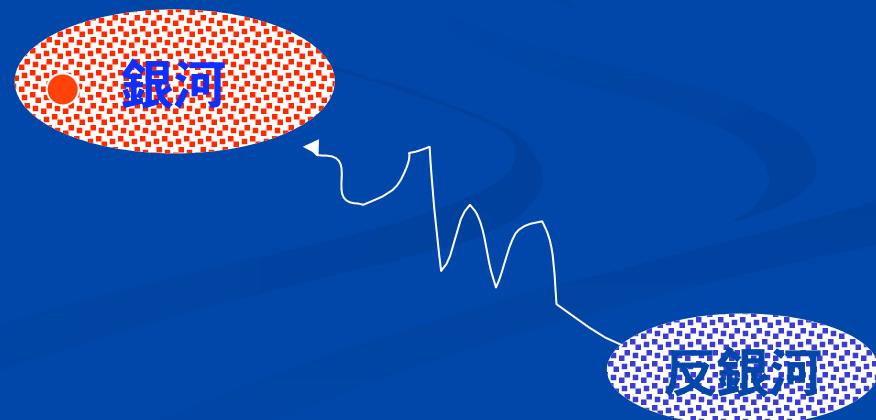
→ 粒子のみが残る



全体としては対象？

反粒子(物質)が遙か彼方に存在
➢➢反物質が伝播してくる

反物質が見つかれば、反銀河の存
在を示す直接的な証拠！
➢➢検証を試みる。



宇宙空間(大気圏外)での 宇宙線観測の方法

■ 超伝導磁石(磁場)、飛跡検出器

- 電荷極性、
- 運動量 (質量×速度) / 電荷(Z) = R

■ 飛行時間測定器

- 速度(β)測定
- エネルギ損失 $dE/dx \propto$ 電荷数(Z^2)

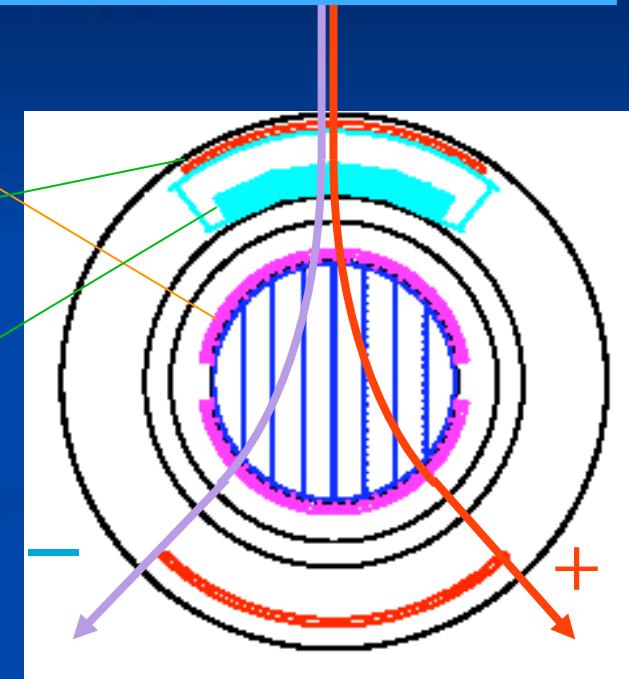
■ チェレンコフカウンター

- 速度、光量差による粒子識別

■ 質量の決定

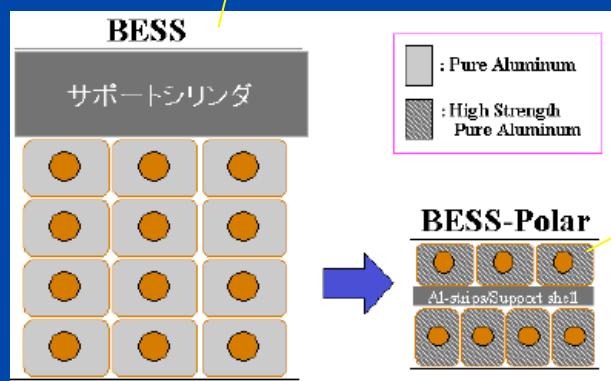
- 粒子の同定
- →質量 = f(運動量, 電荷, 速度)

$$m^2 = R^2 e^2 Z^2 (\beta^{-2} - 1)$$



粒子透過性のあるコイル。
正負の粒子を振り分ける。
荷電粒子の軌跡から運動量を決定

BESS-Polar 薄肉超伝導コイル



超伝導線の高強度化でコイルをさらに透明／軽量化

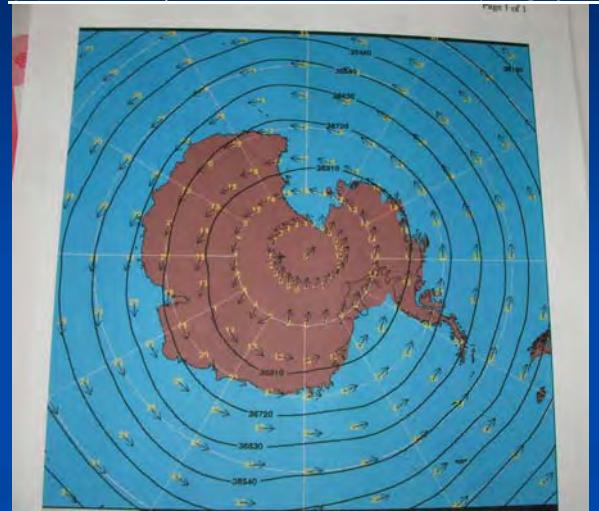
永久電流の実現



- ヒーターを点いて、超伝導ループを遮断
↓
- 外部から電流を供給して充電
↓
- ヒータをオフして、超伝導ループを形成
↓
- 外部からの電流をオフ、電源切り離し
↓
- 永久電流磁場の達成

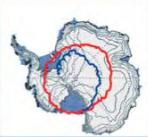
打ち上げ (2007.12.23)

打ち上げ当日の上空の風向き



- 時間 : 2007.12.23 午前6:27
- 場所 : ウイリアムズ氷原 (南緯77-51.8, 東経167-5.4)
- 天候 : 晴、無風
- トラブル : 無し

打ち上げ挑戦 !



BESS
Balloon-borne Experiment with
a Superconducting Spectrometer
Since 1993

打ち上げ(Launch)



Williams Field, McMurdo, in Antarctica(S77-51,E166-40)
06:27(McM), 12/23 2007

無風状態で完璧な打ち上げ

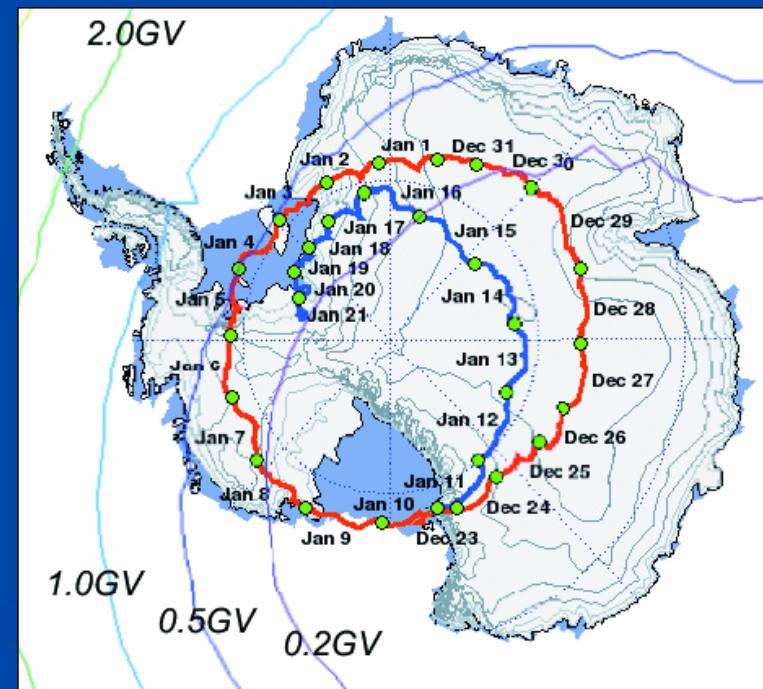
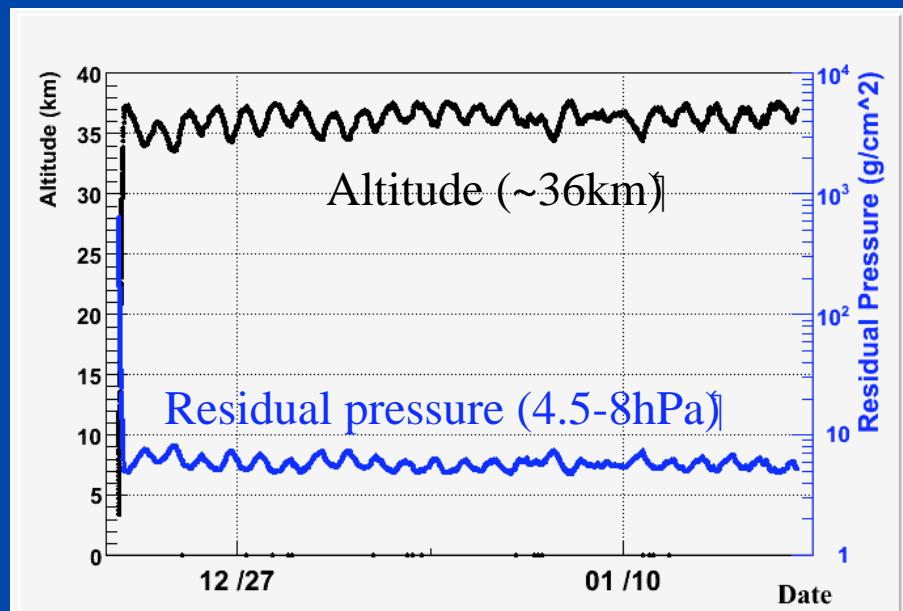


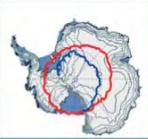


BESS
Balloons Experiment with
a Superconducting Spectrometer
Since 1993

フライト状況

- フライト期間：29.5日(観測期間：24.5日)
- 飛翔高度：~36km
- 取得イベント数：47億イベント(13.5TB)
- 地磁気カットオフ：最大0.5GV
- マグネット/太陽電池システム/DAQとともに安定動作



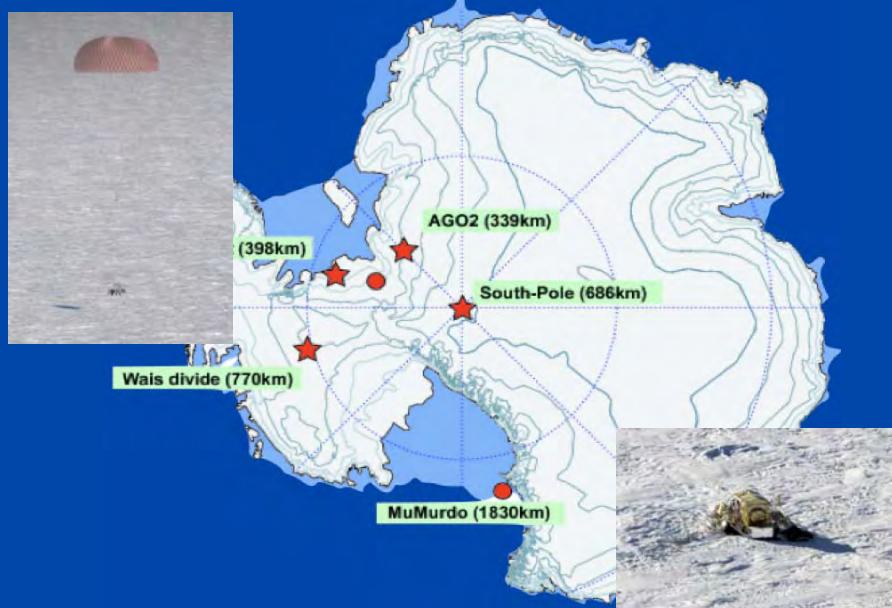


BESS
Balloon-borne Experiment with
a Superconducting Spectrometer
Since 1993

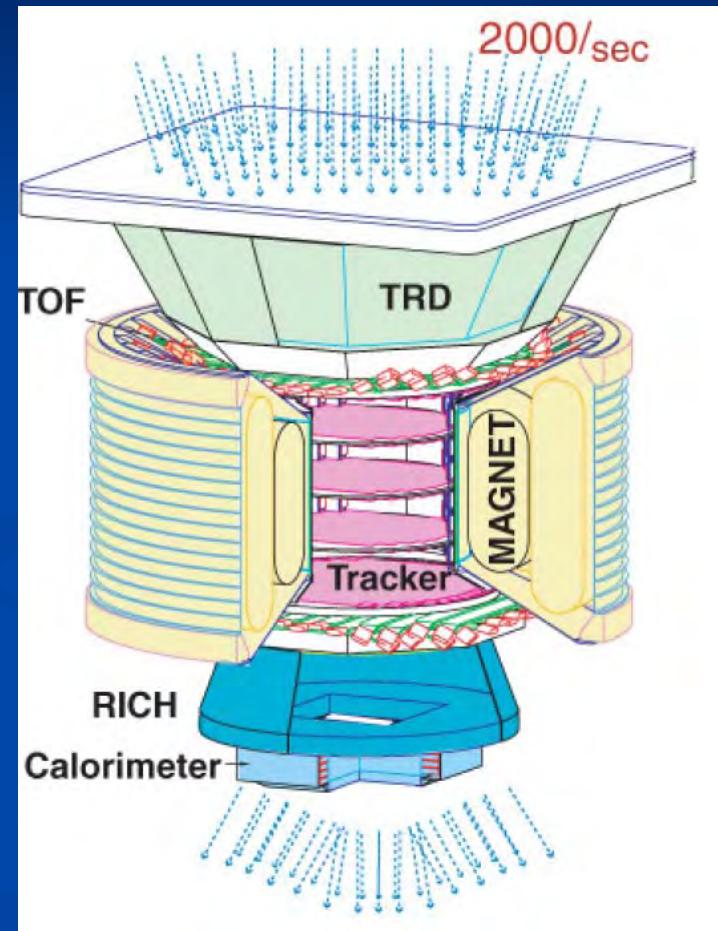
フライト成功着地、回収を待つ

データは回収、解析が進む：

- 南極の気候(-70度)とそのサイズから回収を断念した測定器は2008-2009年冬に回収作業が予定されている。
- South Poleにある基地を拠点とし、フィールドで1,2週間のキャンプをしながら、測定器の掘出し/解体を行う。



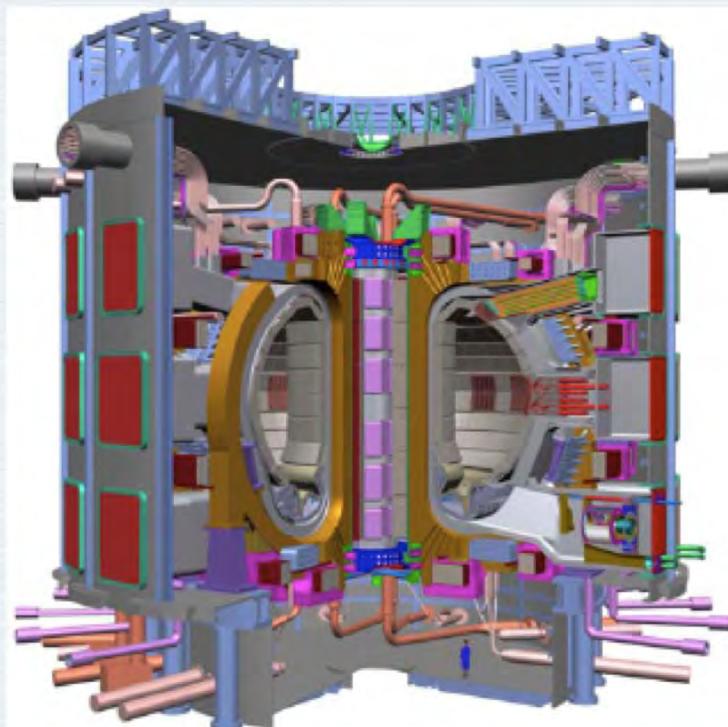
AMS-02: 宇宙ステーション実験



Alpha Magnetic Spectrometer
NASA/DOE ヨーロッパ大学
共同実験

核融合への活用

ITER



- ・ 欧州・ロシア・日本・米国・中国・韓国・インドの国際協力で実施
- ・ 建設サイト
フランス・カダラッシュ
- ・ 超伝導トカマク装置
 - Nb_3Sn -CICC D型トロイダルコイル: 18個
 - Nb_3Sn -CICC 中心ソレノイドコイル: 6個
 - NbTi-CICC ポロイダルコイル: 6個
- ・ プラズマ小半径 2.0 m
- ・ プラズマ大半径 6.2 m
- ・ プラズマ中心磁場 5.3 T
- ・ 最大プラズマ電流 15/17 MA
- ・ エネルギー増倍率 $Q=10$
- ・ 燃焼時間 400秒
- ・ 核融合熱出力 500 MW
- ・ 2018年完成予定

超伝導技術：社会生活への応用展開

- 医療: MRI、SQUID
 - 電力: 核融合、送電、モーター(小型化)、電力貯蔵
 - 輸送: 船舶、飛行機(小型化、効率向上)
 - 高速計算機、高感度センサー
-
- 高温超伝導体への期待
 - MgB₂, YBCO, BSCCO ,

MGB2 超伝導材を用いたMRI画像診断装置

Magnet assembly

The magnet consists of a U-shape ferromagnetic yoke and two MgB₂ coils (one for each pole, 12 DP total) *The magnet "MR Open"*

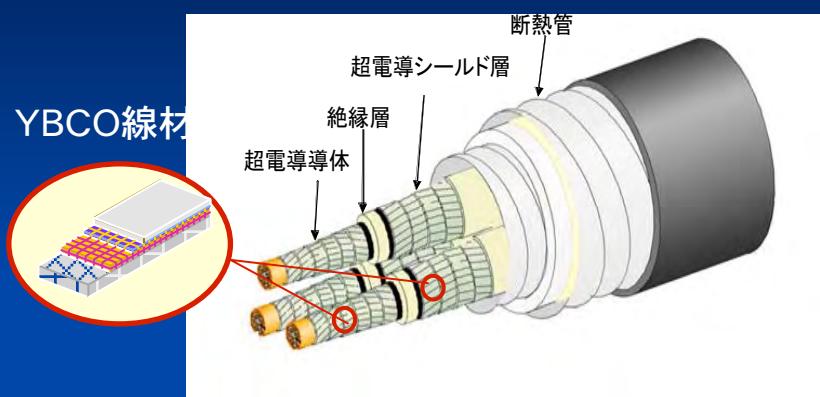


Main Magnet Parameters	
Nominal Field	0.5 T
Peak Field on the Conductor	1.3 T
Nominal Current	90 A
Number of Pancakes	12
Conductor Length (total)	18 Km
Inductance	60 H
Overall Dimensions	2x2x2.4 m
Patient Bore Size	0.6 m
Weight	25000 Kg

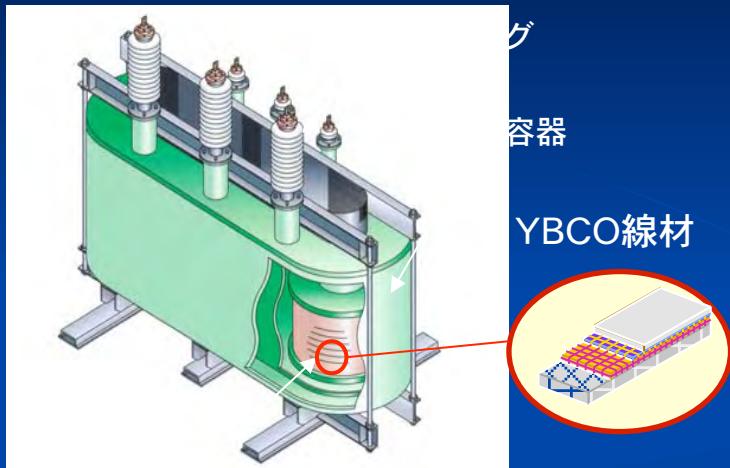


機器要素技術開発

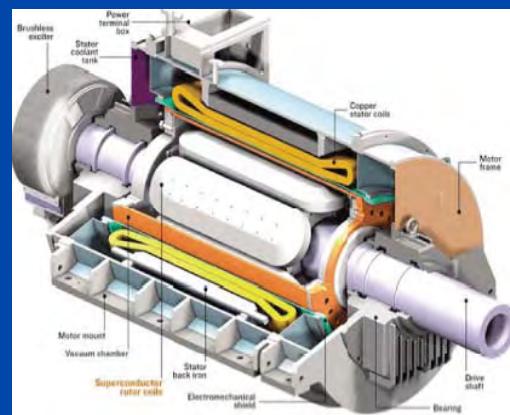
超伝導ケーブル <20m導体>



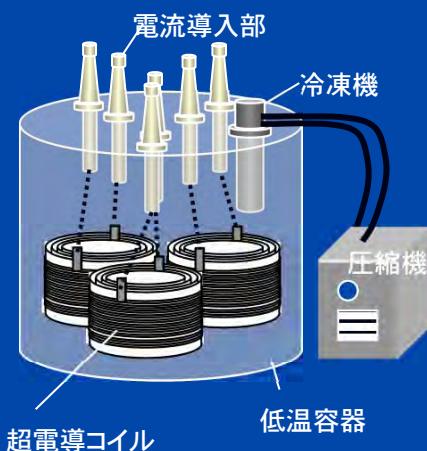
超伝導変圧器 <低損失コイル&耐電圧技術>



超伝導モーター <超伝導回転界磁コイル>



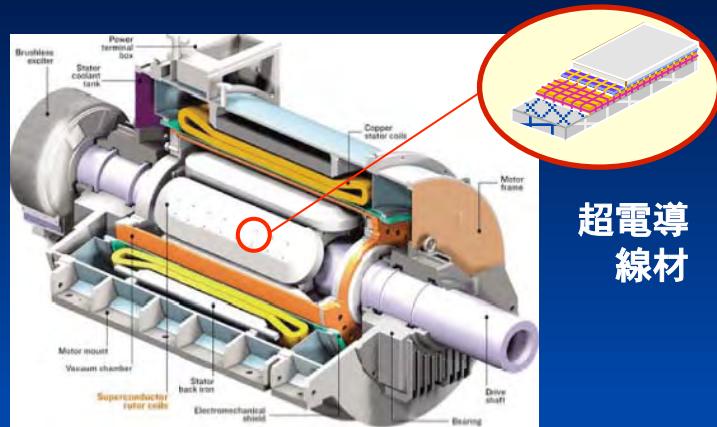
超伝導限流器 <S/N転移型コイル>



小型タービン式冷凍機 <冷却技術>



超電導モータ: 応用の期待



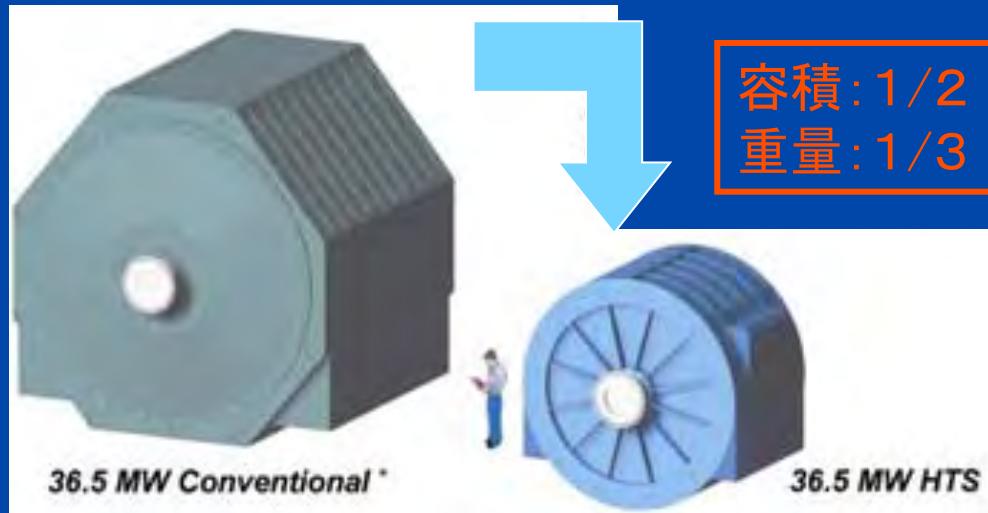
超電導
線材

超電導モータのメリット
<低損失> <コンパクト>
<軽量> <低速大トルク>

[用途]

- 1)産業用モータ 2)船用モータ 3)航空機用発電機・エンジン
代替用モータ 4)風力発電機 等

超電導でコンパクト化



現状モータ
36.6MW

超電導モータ
36.6MW

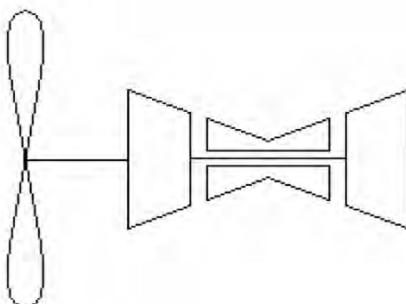
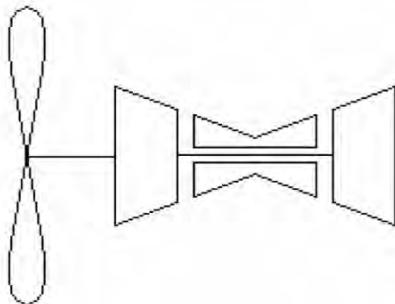
低損失による
省エネ効果
従来モータの効率
を5%改善

2035年
682万t-CO₂/年
2015年から徐々に導入の仮定

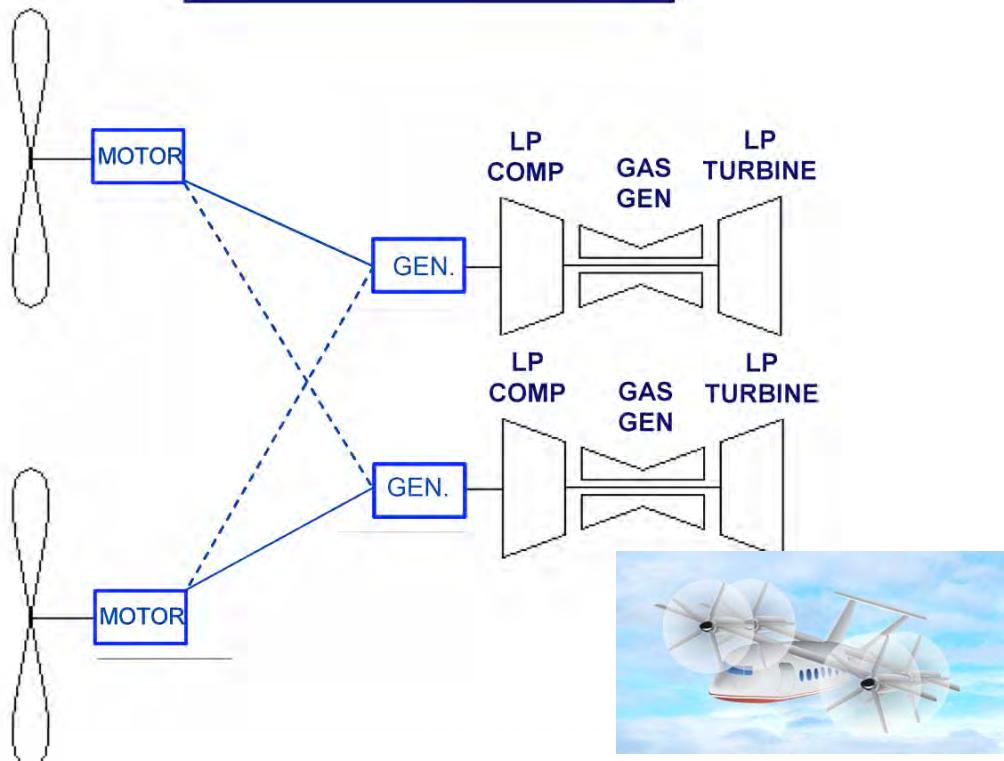


超伝導技術によるモータ駆動飛行機

CONVENTIONAL DRIVE



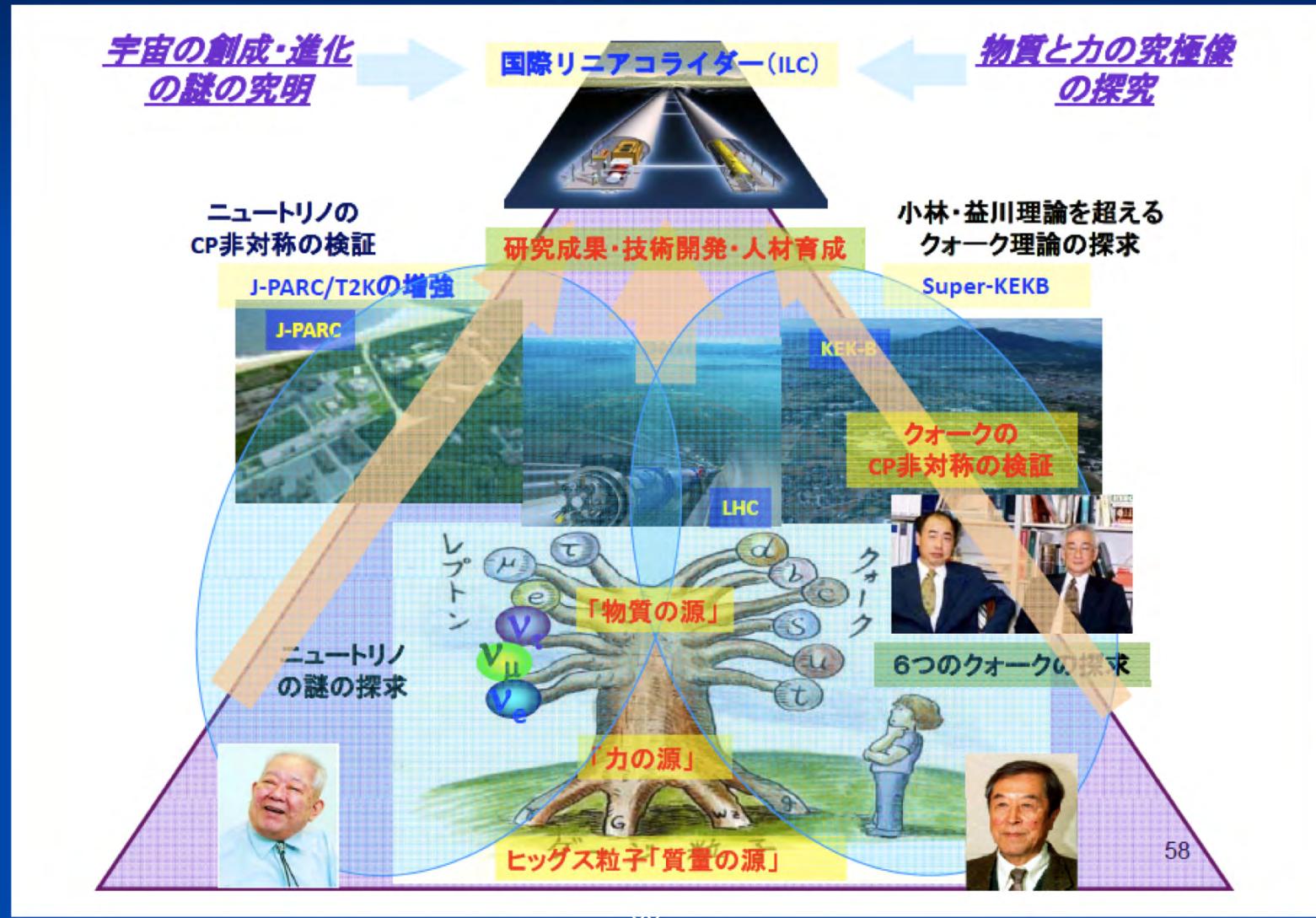
TURBO-ELECTRIC DRIVE



Engine and propulsor must be co-located
Turbine shaft RPM limited by sonic speed in
propulsion fan blade tip
Torque/speed inflexibly linked
Engine out gives asymmetrical thrust

Turbine engine & fan location flexibility
Optimum turbine main-shaft speed -- not propulsor limited
Distributed propulsion easier : many fans, few engines
Cross coupling for symmetrical thrust with OEI.

素粒子物理学・加速器科学・超伝導技術 の連携



次世代の超伝導加速器から生まれるもの

21世紀の技術基盤

加速器医療の高度化・効率化
中性子高速ストロボ立体撮影
廃棄物処理・脱煙
低消費・安価・強力小型加速器
創薬・高機能材料
核廃棄物処理(ADS)

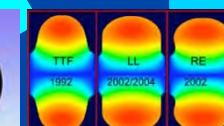
新しい量子ビームの創出



新加速器技術の直接応用 超伝導加速器技術とナノ・ビーム制御技術



超伝導ケーブル
サブミクロン・アライメント



超高速シミュレーション
超高速制御通信・計算



電界研磨



電子ビーム溶接装置



自動成型装置



超伝導加速空洞
セラミック素材
超伝導材料

宇宙と素粒子のフロンティア

エネルギー・フロンティア加速器 リニアコライダーの実用化

放射光技術の高度化(FEL, ERL) 中性子科学技術の高度化

広がる応用



超高真空、耐放射線技術
(宇宙利用)



MRI, ポジトロン4次元
CT (医療)



デバイス加工



電力効率向上

要素技術の多岐の応用

量子ビーム・ナノコントロール

まとめ

- **超伝導技術が拓く先端加速器科学**
 - 加速器科学、粒子物理学、宇宙物理(エネルギー・フロンティア)を支える先端技術
 - ものを見る“新しい目”、素粒子、放射光、中性子、ミュオン
 - “先端技術”への取り組みが“科学”的進歩を切り拓く
- **超伝導技術が拓く身近な社会、産業、エネルギー、宇宙(科学技術)の未来への役割**
 - エネルギー循環型社会への貢献
 - 医療、電力エネルギー、輸送等への応用
 - 未来への不可欠な先端技術