

加速器の歴史と物理学の進展

横谷 馨

高エネルギー加速器研究機構

2007.11,3

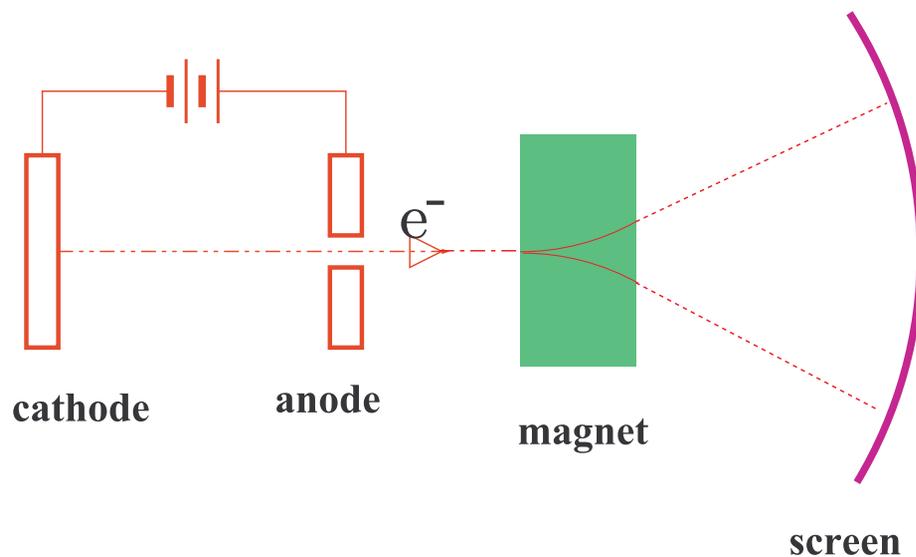
加速器とは

- 電子などの「粒子」を加速する機械
- 何のために加速？
- 物理のため
- でも、最近では、医療用・工業用の加速器が圧倒的に多い
- 「物理のため」も2種類ある
- 高エネルギー物理
- 加速器で光を作って原子・分子・生物物理に使う
- ここでは「高エネルギー物理」用加速器のみ
- ただし、その時代時代の「高エネルギー」
- 物理学は加速器とともに進歩してきた
- いつから加速器が始まったか、定義によるが、普通「陰極線管」をはじめとする。100年以上まえ。

陰極線管

CRT : Cathode Ray Tube

- 2枚の金属板の間に電圧をかける
- 陰極を温めると、何かが出るらしい、
- 電子の存在の証明
1897年 J.J.トムスン
- ブラウン管の原理



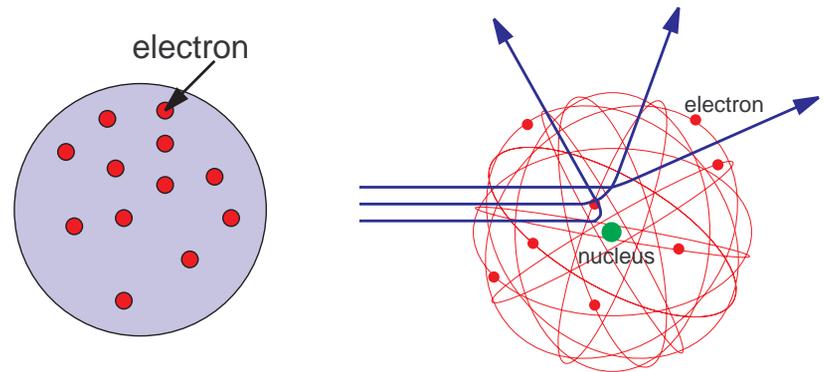
エネルギーの単位

- 1つの粒子(電子、陽子など)のもつエネルギーを表す単位としては、「ジュール」は大きすぎる
- 2枚の極板間で加速したときのエネルギーは極板間の電圧だけで決まる。(極板間距離によらない、電子でも陽子でも同じ)
- そこで、この電圧を粒子のエネルギーの単位にする。1ボルトで加速したとき、1eV(電子ボルト)。
 - $1000 \text{ eV} = 1 \text{ keV}$
 - $1000 \text{ keV} = 1 \text{ MeV}$
 - $1000 \text{ MeV} = 1 \text{ GeV}$
 - $1000 \text{ GeV} = 1 \text{ TeV}$

もちろん、 $0.001 \text{ eV} = 1 \text{ meV}$ などもあるが、今日の話には出てこない。

ラザフォードの実験

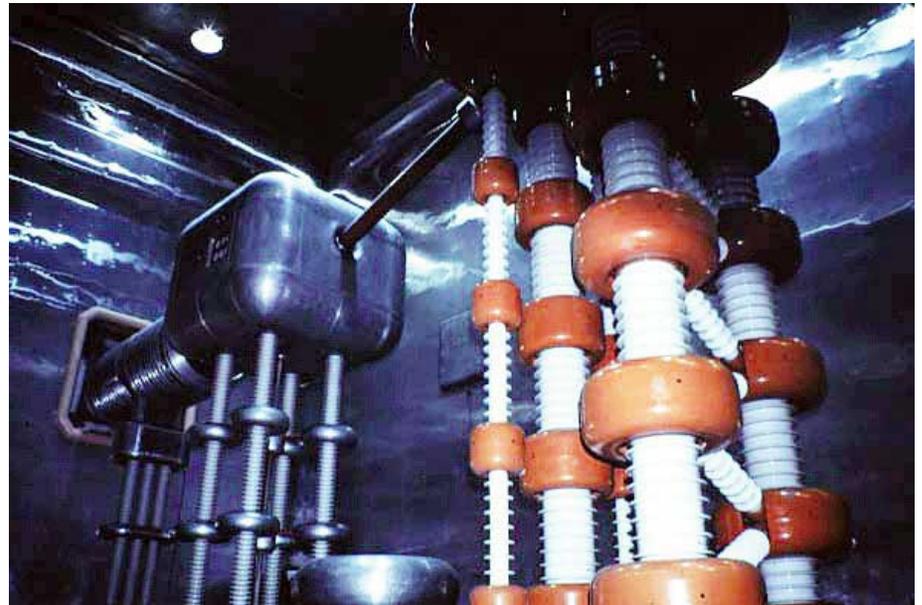
- **ラザフォード散乱**
原子の構造を調べるために、
金箔にアルファ線を当てる。核
の存在を1911年に説明



- **原子核の人工変換**
1919年、アルファ線を窒素原子核にあてて、酸素原子核に変換
- これらはいずれも自然放射性元素の崩壊によるアルファ線を使った
- 数MeVのエネルギー。当時はこのエネルギーの加速器は存在しなかった。

コッククロフト・ウォルトン型静電加速器

- 静電気を集めて高い電圧をつくる
- 加速器ビームを使った初めての原子核変換
 $H + Li \rightarrow 2 He$
- 1932年 英国キャベンディッシュ研究所
- 800keV
- 直流型の限界
放電の危険



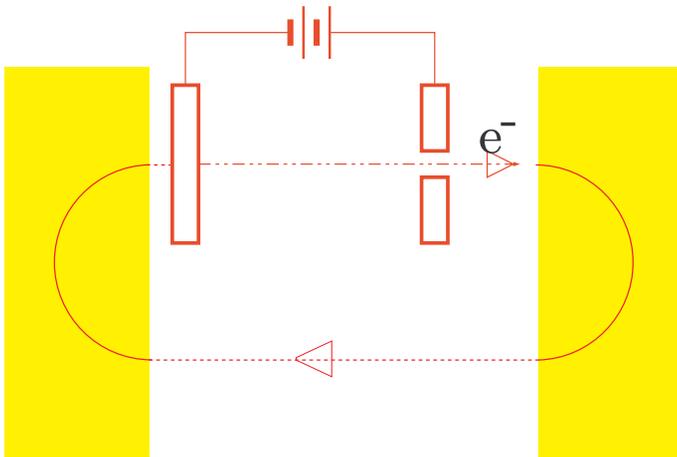
KEK 750keV Cockcroft-Walton

もっと高いエネルギーへ

- 磁石でもどしてCRTを何度も使う
- これは可能？

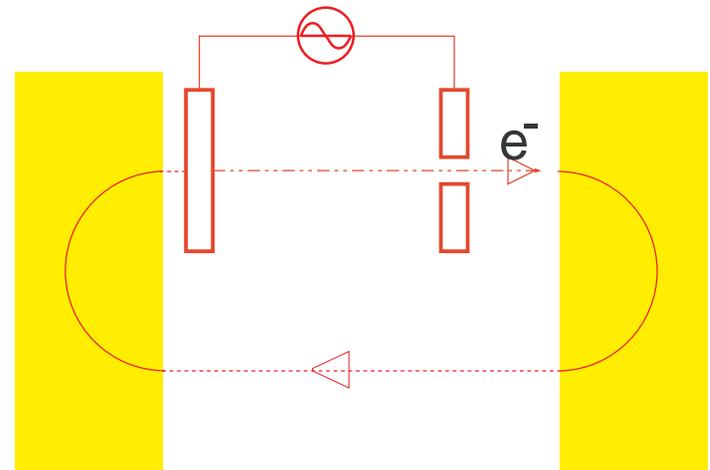


- 交流電圧に変えればよい
- 高い周波数が必要



magnet

magnet

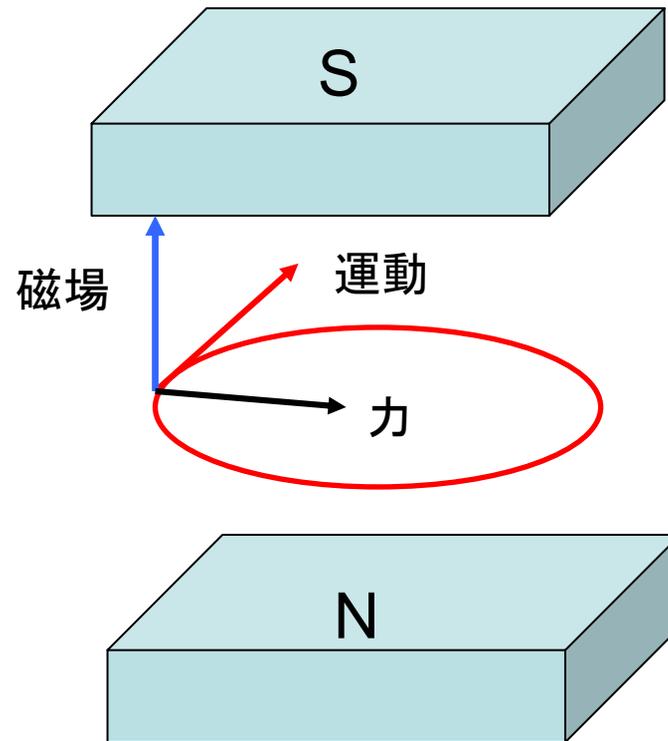


magnet

magnet

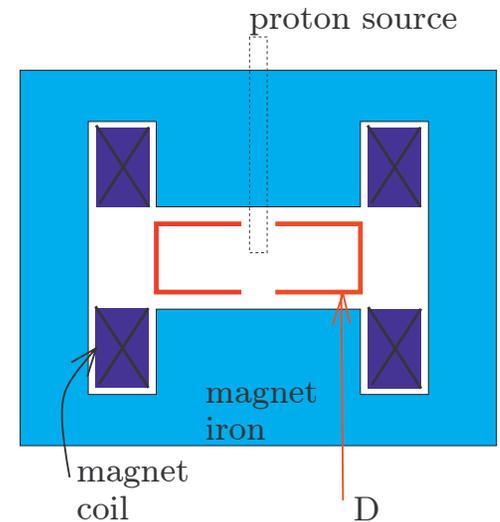
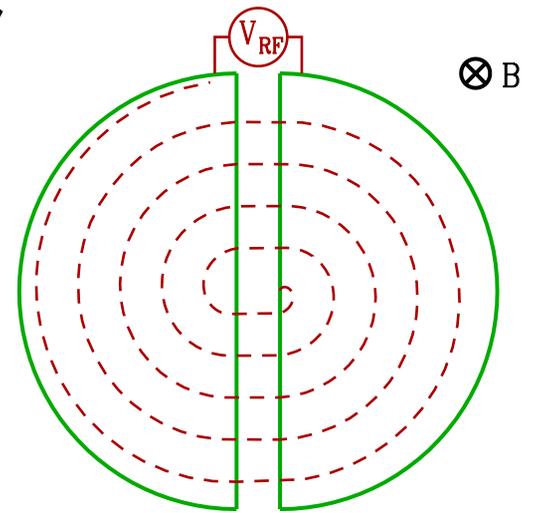
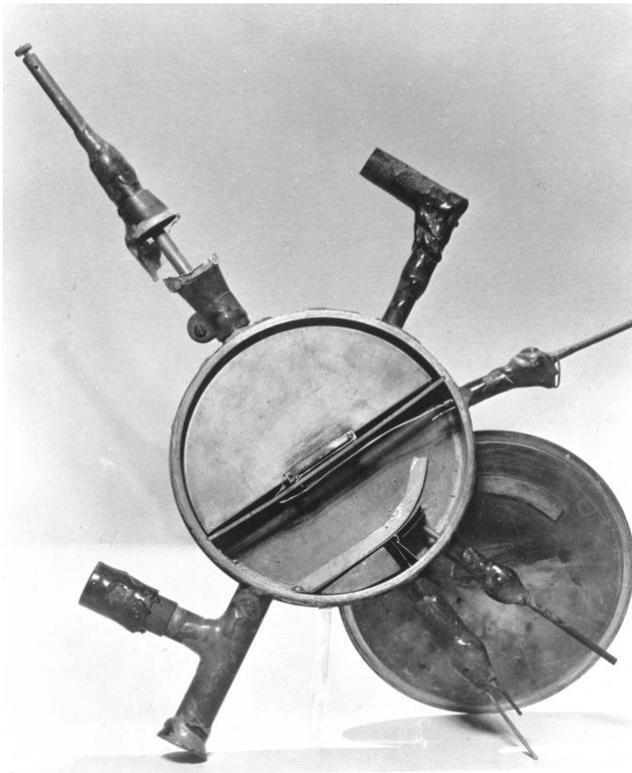
磁場のなかの粒子の運動

- 電気をもつ粒子は磁場のなかで円運動する
- $p = Q \times B \times R$
 - p = 粒子の運動量
 - Q = 粒子の電荷
 - B = 磁場の強さ
 - R = 円の半径
- 粒子の運動量が大き
いと半径が大きくなる



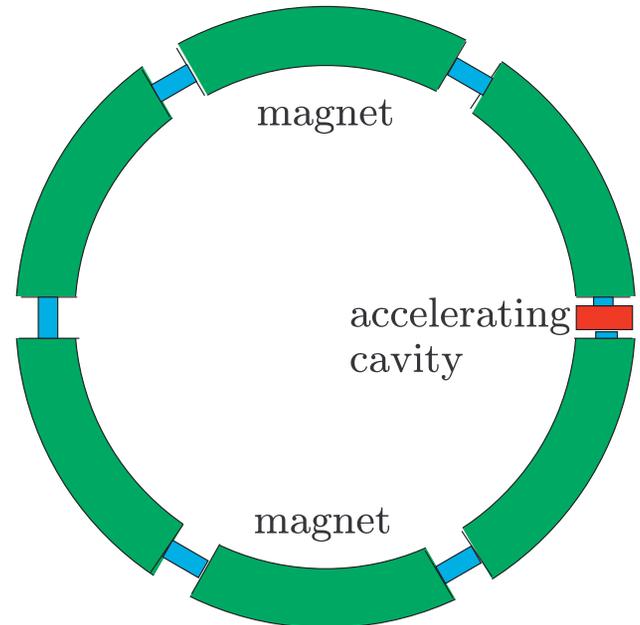
サイクロトロン

- 1931年、E.O.ローレンス、カリフォルニア・バークレー
- 1周の時間はエネルギーによらない



シンクロトロン

- サイクロトロンの限界
 - エネルギーを上げるには磁石を大きくするしかない
 - エネルギーがあがりすぎると、1周する時間があわなくなる（相対性理論が必要）
 - 低エネルギー分野ではいまでも使われている（ビームが連続的に出ることが強み）
- エネルギーが上がっても半径が変わらないようにすればよい
 - エネルギーが上がるとともに磁石を強くする
 - 磁石の体積の節約
 - ビームは連続的に出ない
- 円型加速器の主流



加速器時代以前の粒子の発見

- 中性子 1932
- 陽電子 1932
- ミュー粒子 1937
- パイ中間子 1947

これらは宇宙線粒子を使って発見された

- 1950年代に入ると、高エネルギー化した加速器によって粒子が発見されるようになる

Bevatron

- 弱収束シンクロトロン
- ローレンス・バークレー研究所
- 1954年運転開始
- Bev.. = Billion Electron Volt
= Giga Electron Volt (GeV)
- 1955年、**反陽子**を発見

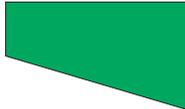


1950年代: 加速器の大型化

- 多数の新粒子の発見
- 反陽子
- ラムダ、シグマ、グザイ、オメガ.....
- これらは大型化したシンクロトロンによって発見された
- これらの統一的記述のため、クォーク粒子が1964年 M.ゲルマンによって提唱された

強収束の原理の発見

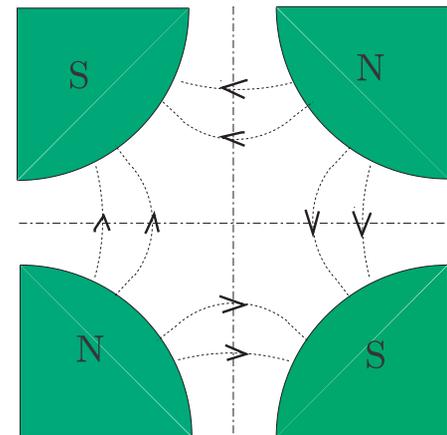
- シンクロトロンでもBevatronほどになると磁石の大きさが問題

- 断面が  型の磁石と  を組み合



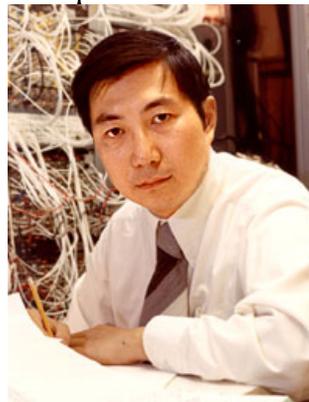
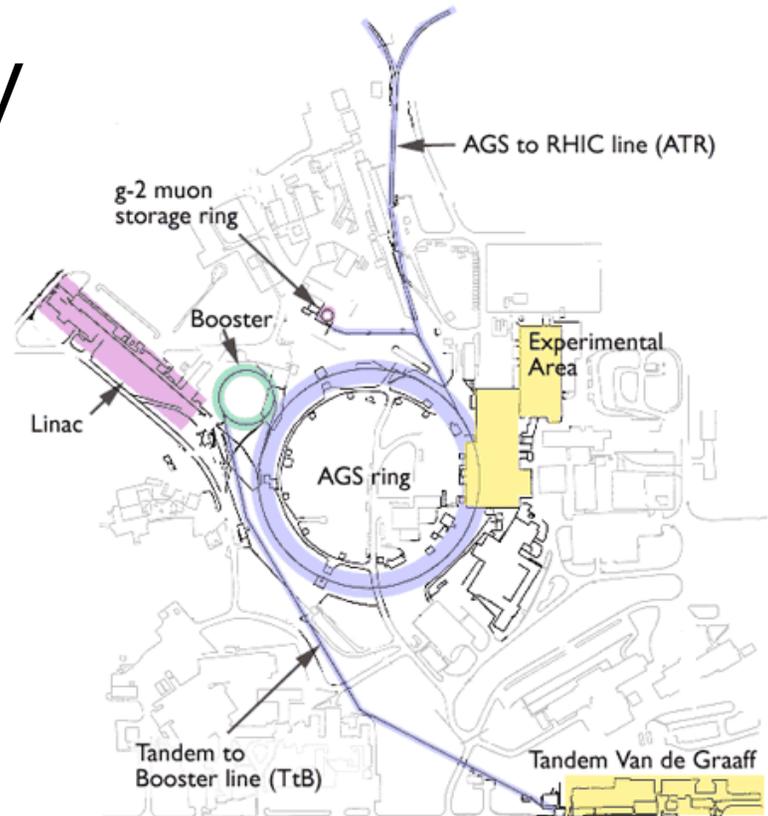
わせるとビームを細くできる

- 1957年ごろの発明
- 4極磁石の組み合わせでも同じ効果がある



AGS: Alternating Gradient Synchrotron

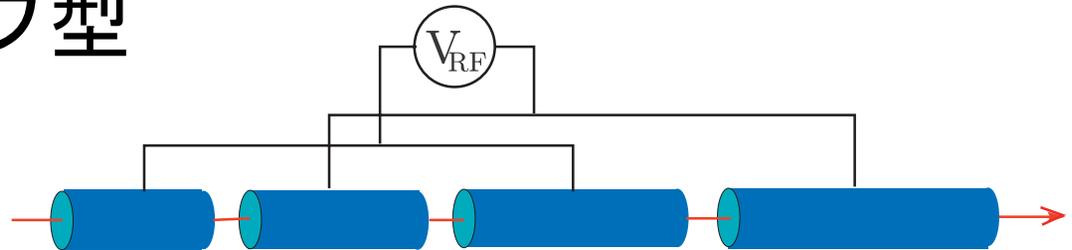
- 強収束原理に基づくシンクロトロン
- 米国ブルックヘブン研究所
- 1960年運転開始、~20GeV
- 数々の新発見
 - J/ψ の発見
 - ミューニュートリノ ν_μ の発見



Sam Ting

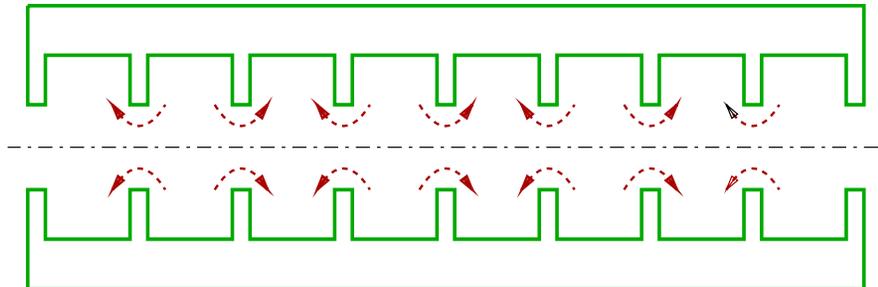
線形加速器

- まっすぐな加速器
- ドリフトチューブ型



- 原理の発明は古いですが、戦時中のマイクロ波技術（レーダー）の発達により、戦後大きく発展

- 共鳴型



Stanford Linear Accelerator

- 電子線形加速器
- 全長2マイル
- 1967年運転開始
- ~1968年 deep inelastic scattering (電子と陽子の散乱で陽子の構造を調べる)の研究
- この加速器はその後多くの目的に使われ、いまでも一線級の加速器
SPEAR, PEPII, SLC, LCLS,

Stanford Linear Accelerator



コライダー：衝突型加速器

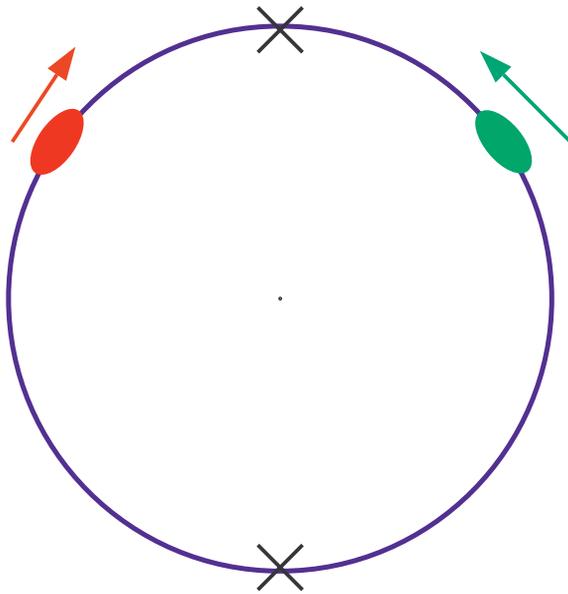
- 物理で肝心なのは衝突エネルギー



- 衝突エネルギーが同じならどちらでもよい
- 右の方が各粒子のエネルギーは低くてよい
- 相対性理論は、やりたくないが、高エネルギーでは、右の方が圧倒的に楽
- たとえば、電子の場合、1GeV同志をぶつけるのと、1TeVの電子を静止電子に当てるのは同等

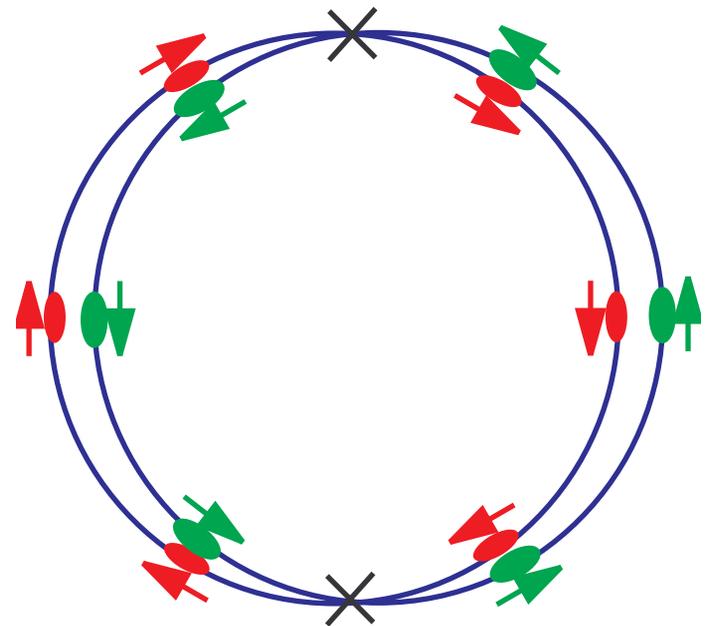
どうやってぶつけるか

- 電子・陽電子、陽子・反陽子のよう、同じ重さで逆電荷なら、1つのリングでできる



.... PETRA, TRISTAN, LEP,
..... Spps, Tevatron

- 2つのリングを使えば、もっと自由にできる



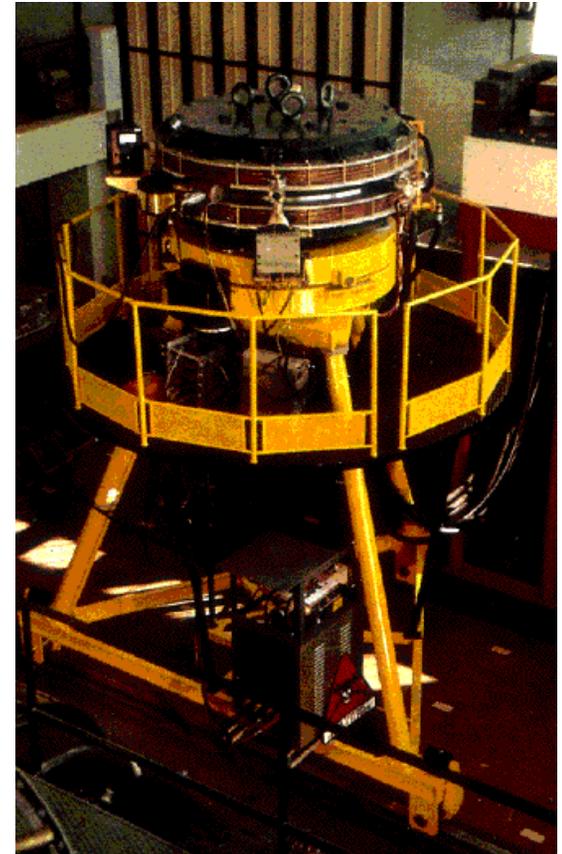
PEP-II, KEKB,

最初の電子陽電子コライダー AdA

- 1961年にイタリアで最初のビーム
- フランスオルセーに移築されて、1964年に最初のビーム衝突
- 軌道半径65cm、衝突エネルギー0.5GeV



現在は庭に展示されている



2代目 : Adone

- 1967年に最初のビーム
- 周長105m
- Collision energy < 3GeV
(J/ψ に届かず)
- Luminosity
 $3 \times 10^{29} / \text{cm}^2 / \text{s}$



素粒子モデル

- 物質を構成する基本粒子
 - 6つのレプトン
 - 6つのクォーク
- それらの間の力はボソンによって伝えられる
 - 弱い相互作用 Z^0, W^+, W^-
 - 電磁的相互作用 γ (光)
 - 強い相互作用 グルーオン
 - 重力 重力子

$$\begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \tau \\ \nu_\tau \end{pmatrix}$$
$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$$

相互作用の統一理論

- Weiberg-Salam model
 - 1960年代末、
 - 電・弱を統一
 - 新しい粒子として Z^0 , W^+ , W^- を預言
1983年に発見された
 - これには、加速器の飛躍が必要

SPS: Super Proton Synchrotron

- CERNの大型陽子シンクロトロン
- 1976年運転開始
- 1978年500GeV達成
- その後、世界最初の 陽子・反陽子コライダーに改造

Stochastic Cooling

- 反陽子は普通には自然界に存在しない
- 粒子をぶつけて作るので、太いビームしか作れない
- コライダーにするには「冷却」が必要
- 1968年に冷却方法が発明された。
Simon van der Meer
- AA (Antiproton Accumulator)で冷却・集積、SPS
に送る
- SPS → SpS
- 1981年、初めての陽子・反陽子衝突
- 1983年、 W^{+-} , Z^0 の発見

巨大円型コライダーの時代：Tevatron

- Fermi国立研究所
- 陽子・反陽子
- 1周6.3km
- 1TeV
- 1983年完成
- 超伝導磁石
4.2Tesla
- 1995 Top Quark
- 2009 shutdown



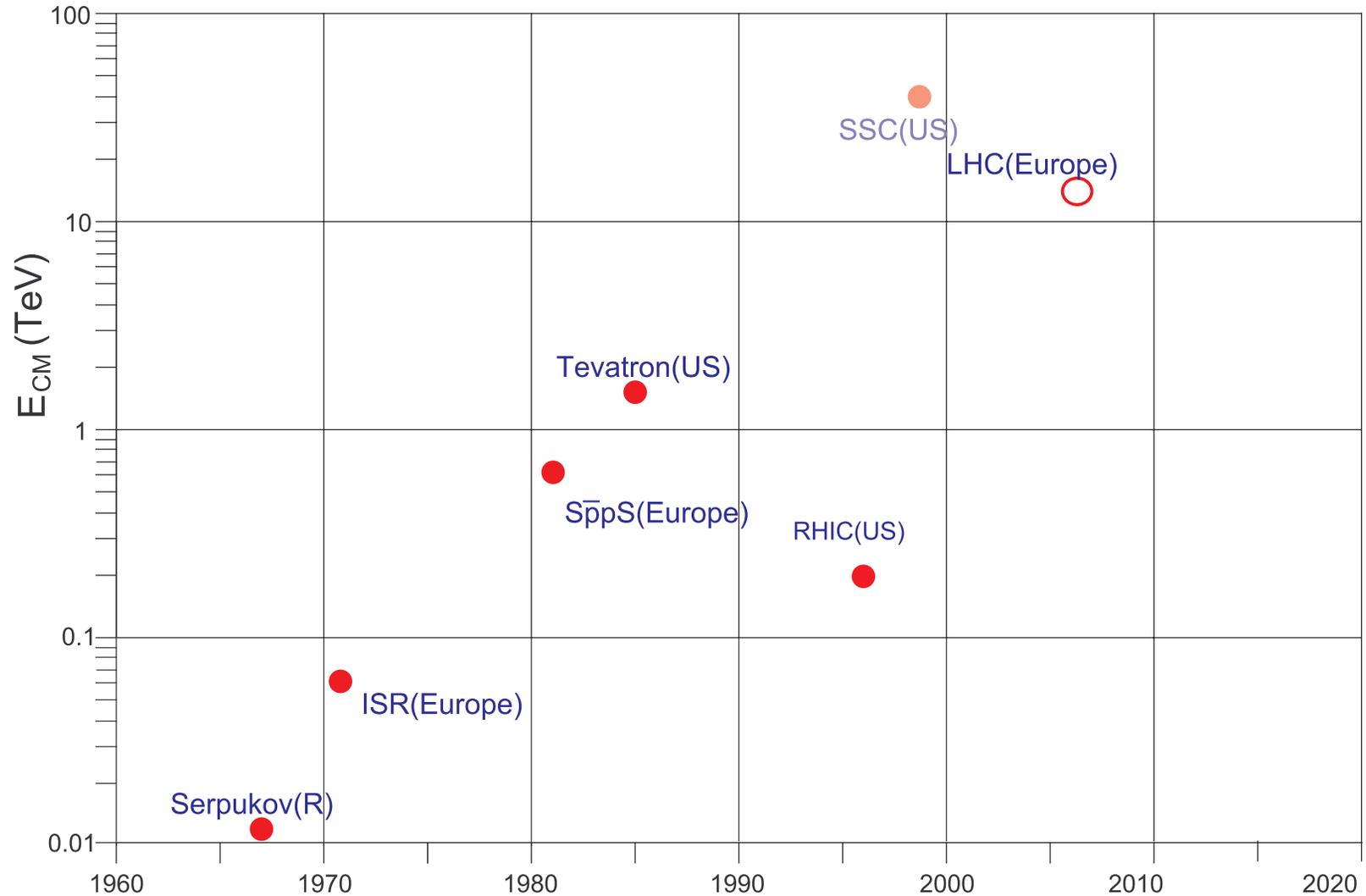
後方Tevatron、手前Main Injector

巨大円型コライダーの時代：LEP

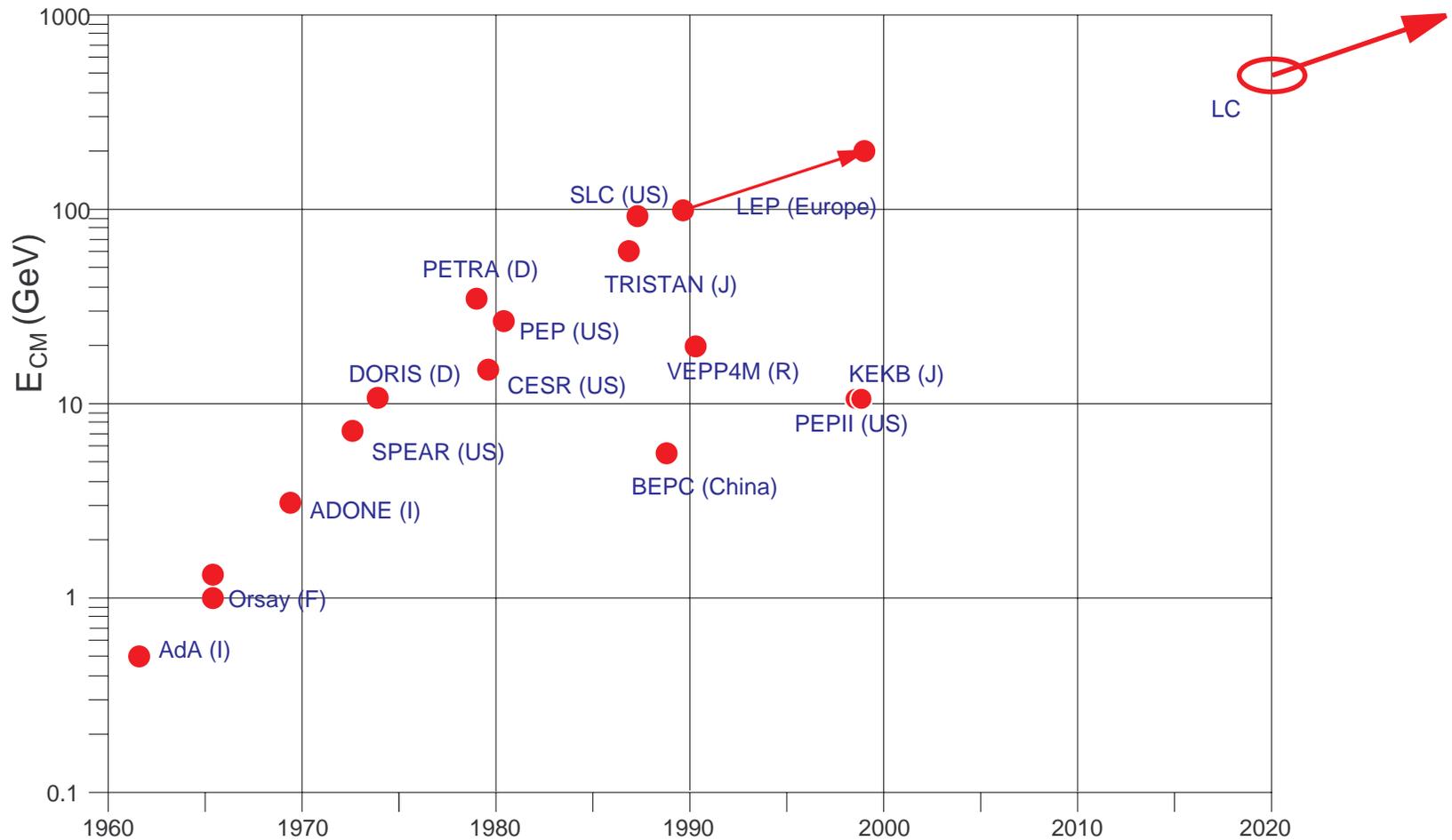
- LEP (Large Electron-Positron Collider)
 - CERN
 - 1983年建設開始、1989年運転開始
 - 1周27km
 - 最終的にビームエネルギー約100GeV
 - 2000年終了



陽子・反陽子コライダーのエネルギーの歴史

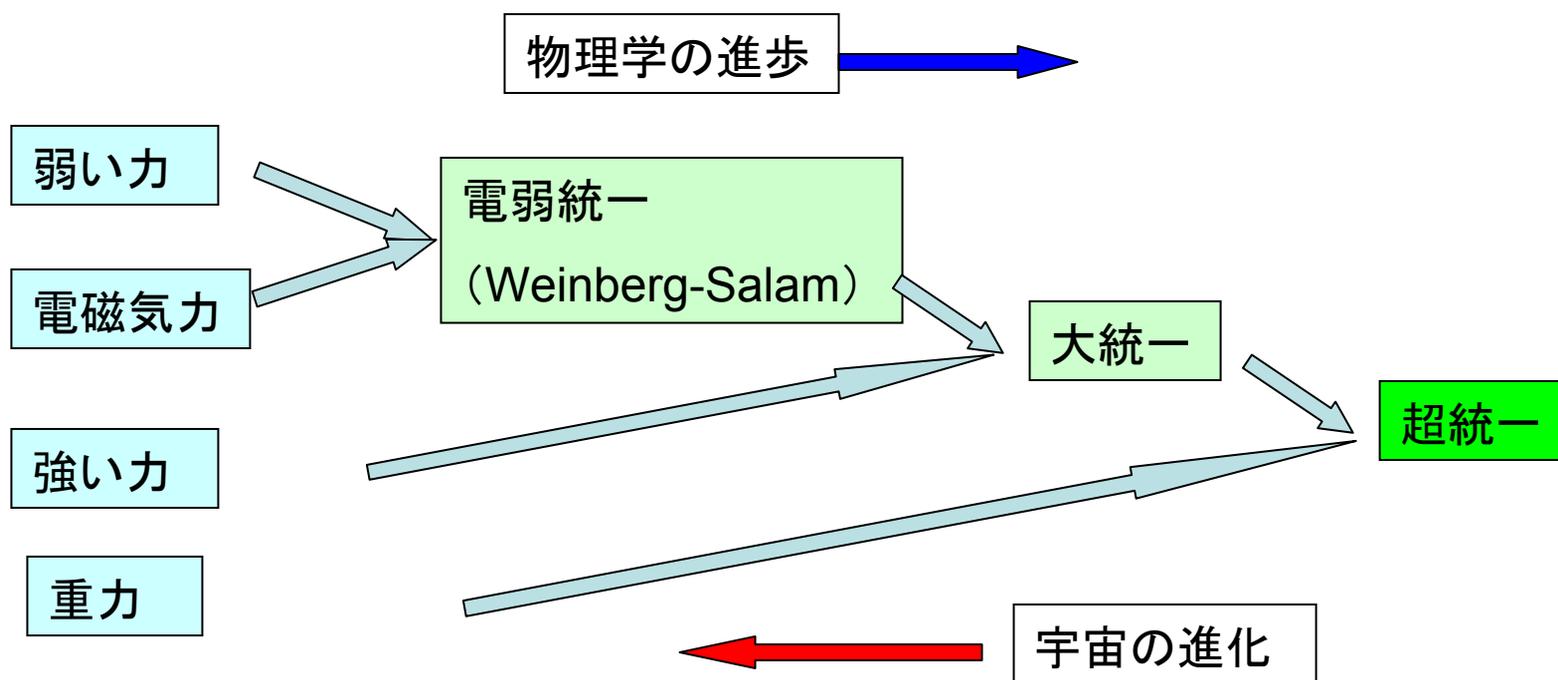


電子・陽電子コライダーのエネルギーの歴史



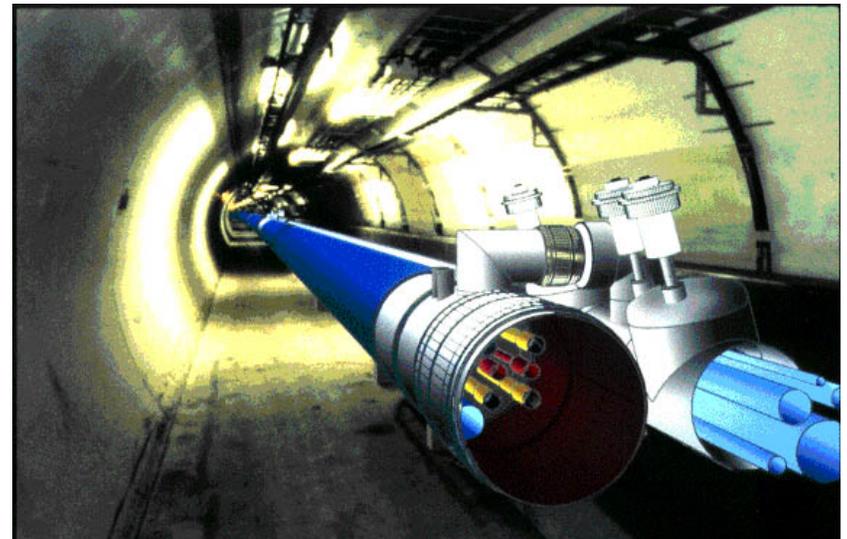
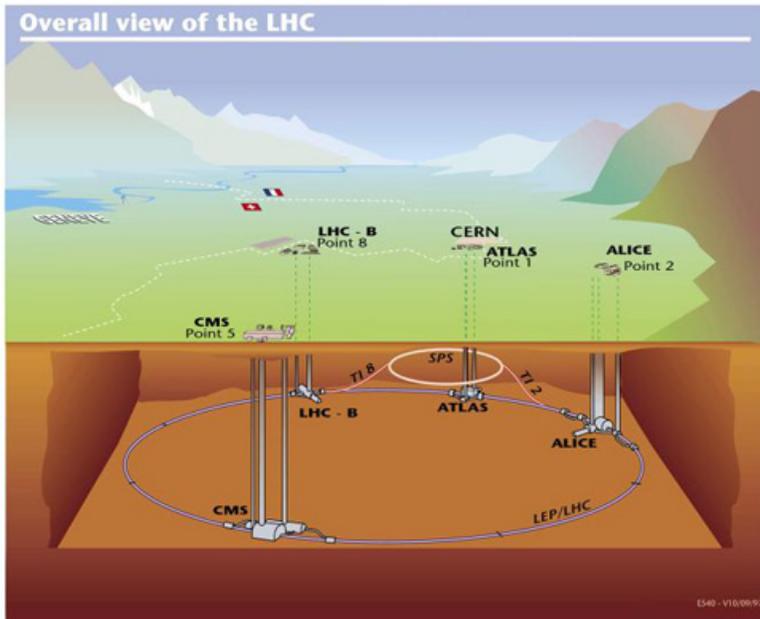
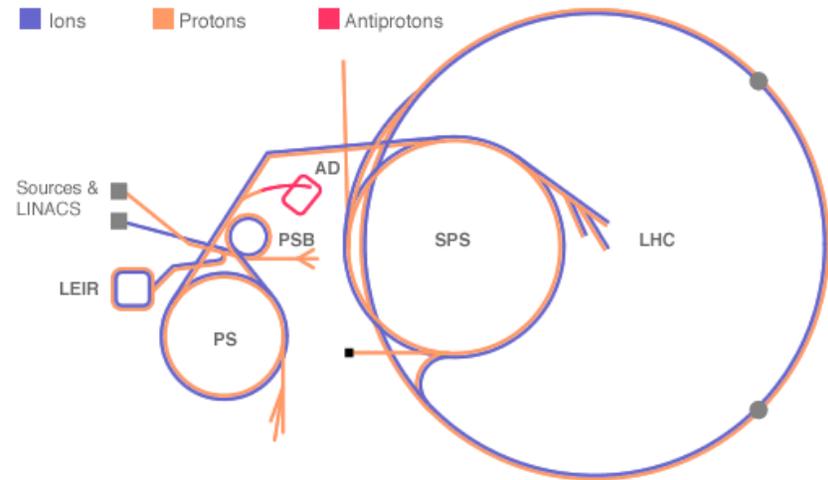
相互作用の統一理論

- 残りの2つの力も統一したい
- 高エネルギーの世界にゆくほど力が統一される
- 宇宙創成初期にはすべての力は一つであったろう



LHC

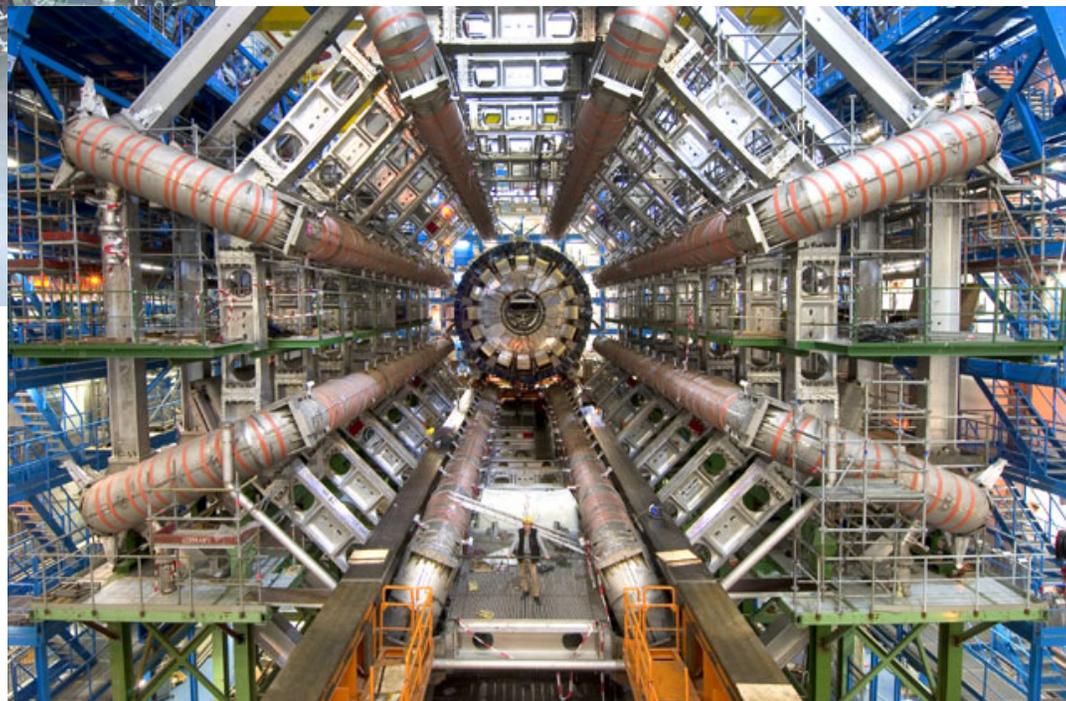
- さらなる高エネルギーへの次の一歩
- LEPのトンネルの再利用
- 14TeV 陽子・陽子衝突
- 来年、最初のビームか



- 超伝導磁石の技術



アトラス検出器

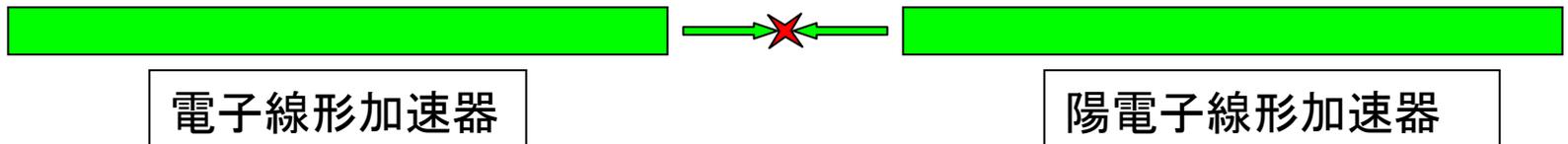


リニアークライダー

- 電子・陽電子は円型リングでは100GeV以上の高エネルギーは困難
- しかし、陽子コライダーは、陽子がクォークの組み合わせであるため、
 - 1クォークあたりのエネルギーは低くなる
 - 反応が複雑
- このため、電子・陽電子コライダーはエネルギーが低くても陽子コライダーにまけない
- → まっすぐな電子・陽電子コライダー
- 国際協力で開発・設計中

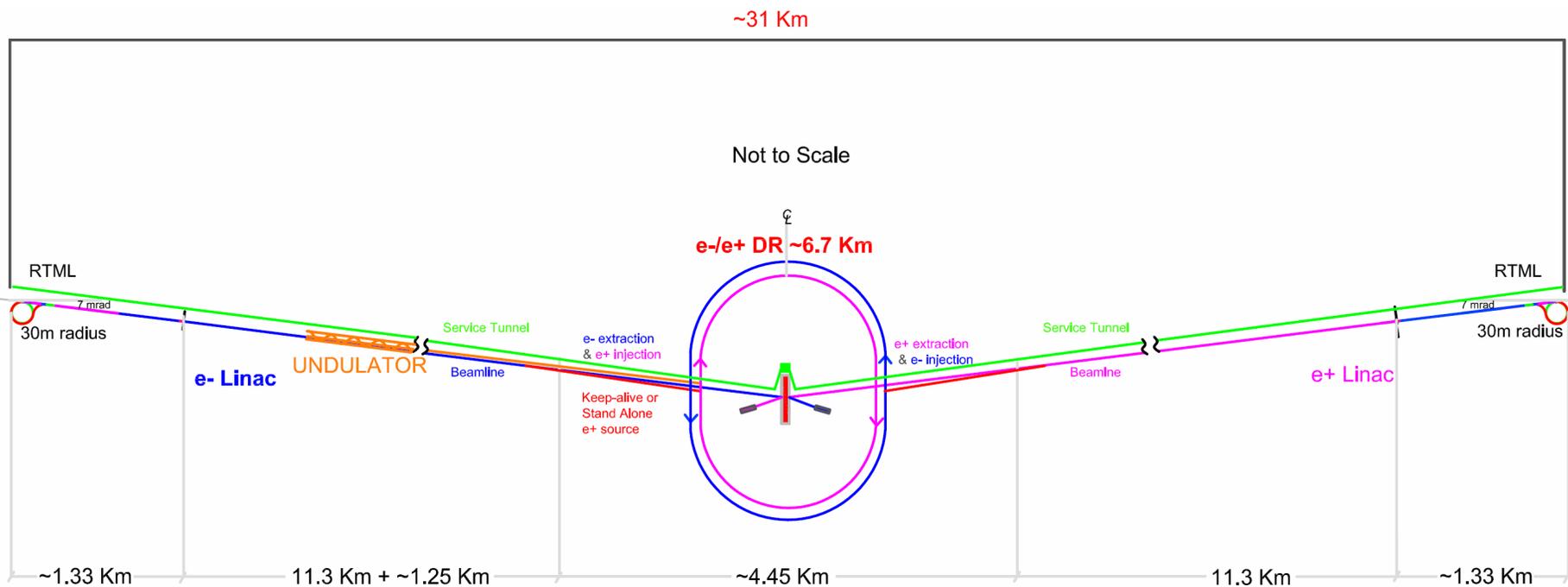
ILC : International Linear Collider

- 大統一への挑戦



全体のレイアウト

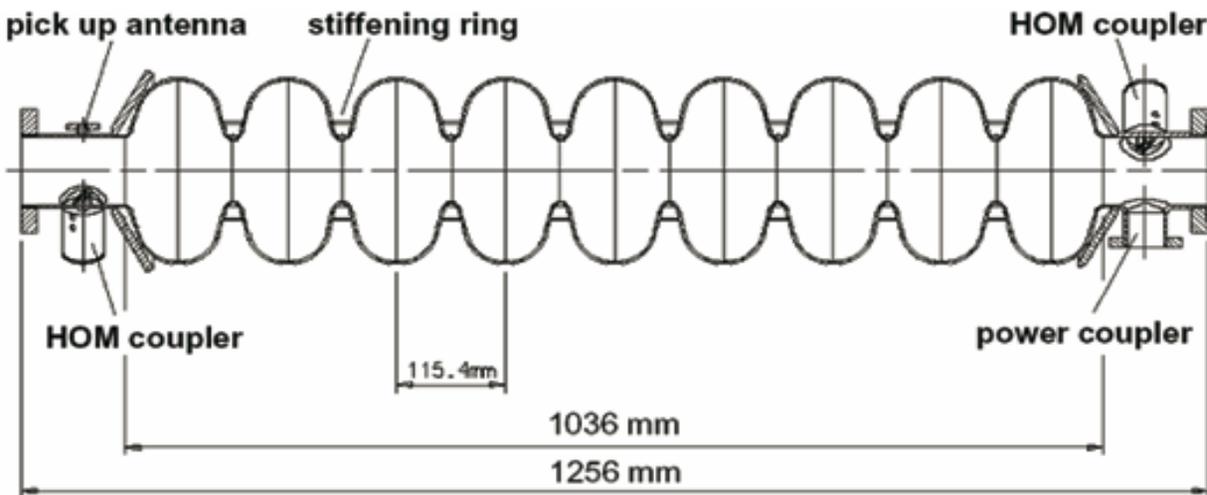
1st Stage: 500 GeV



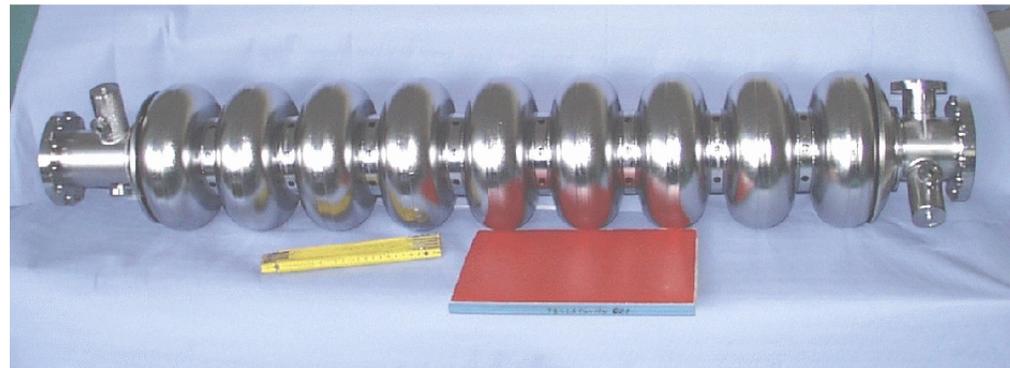
Schematic Layout of the 500 GeV Machine

超伝導加速空洞

- 空洞を超伝導材質でつくる
- 現在、もっともよいのはNb(ニオブ)

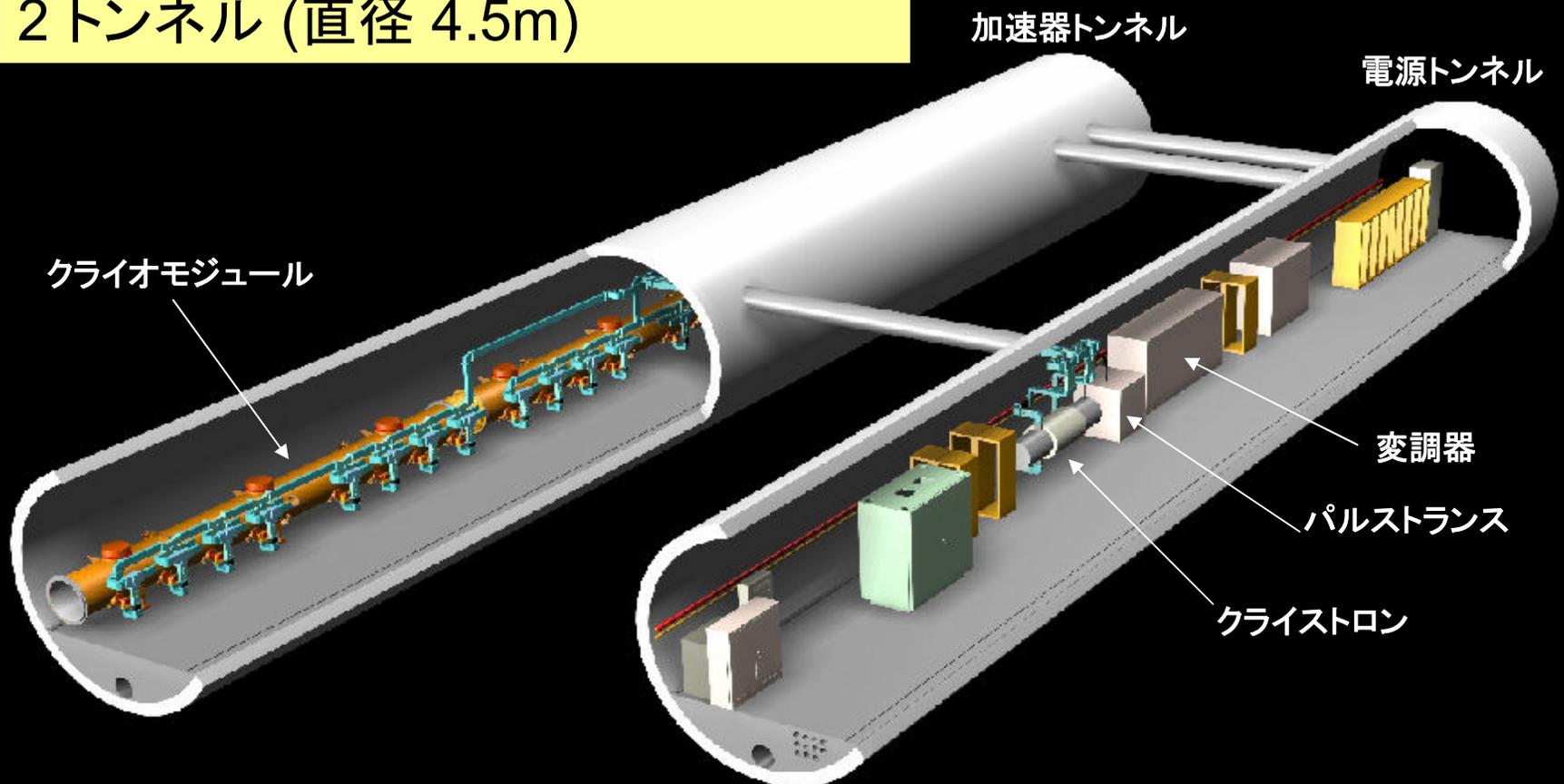


現在のILCの設計では、
平均加速勾配は、
31.5MV/m



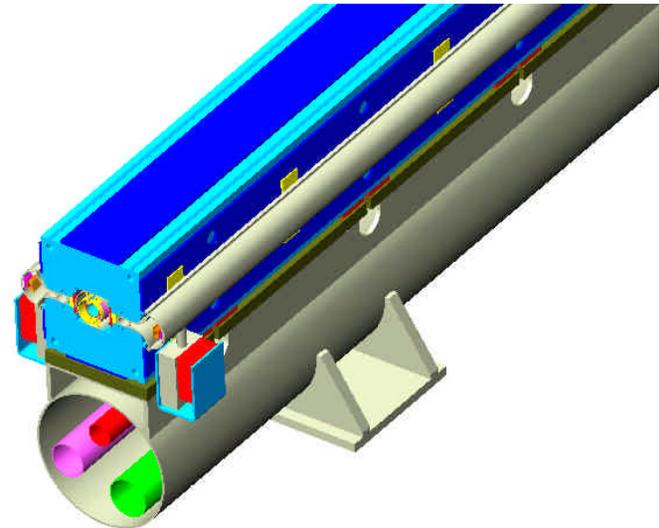
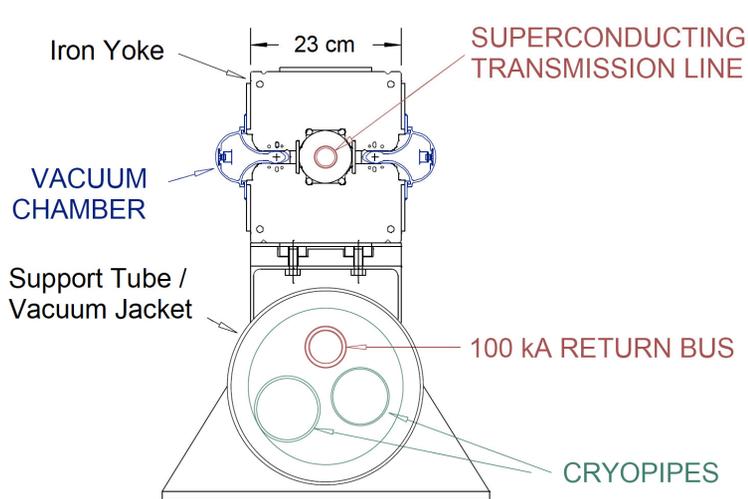
トンネル内に配置

全長 ~11km x 2 (平均加速勾配
31.5MV/m)
2トンネル (直径 4.5m)



LHC後のハドロンコライダー

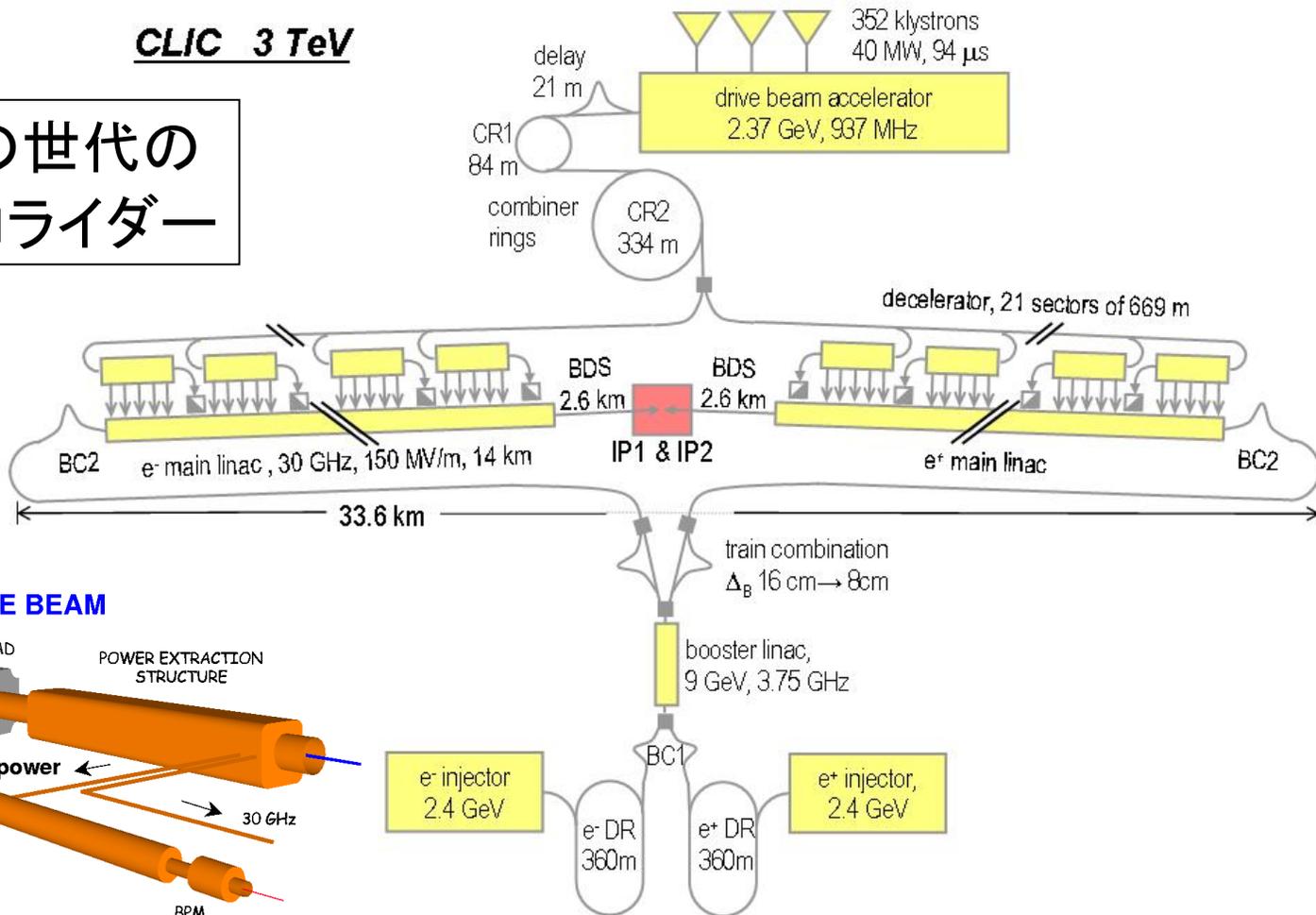
- いまのところ質的に新しい方法はない
- 高磁場、巨大化
- VLHCの数値例
周囲233km、磁場9.8Tesla、重心系エネルギー175TeV



CLIC (CERN Linear Collider)

CLIC 3 TeV

ILCの次の世代の
リニアークライダー

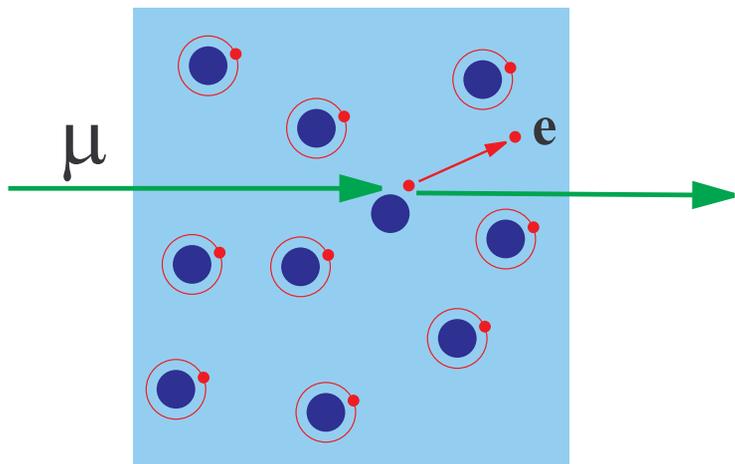


<http://clic-study.web.cern.ch/CLIC-Study/Images/CLIC-module.png>

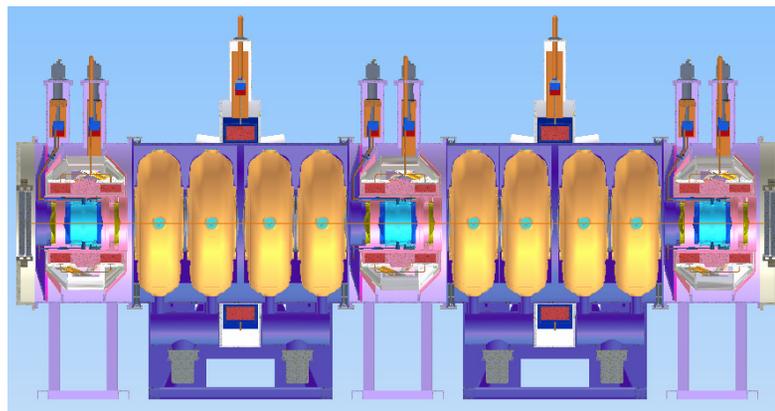
<http://clic-study.web.cern.ch/CLIC-Study/Images/CLIC-layout.jpg>

ミュー粒子コライダー

- ミュー粒子は性質が電子と似ているが、ずっと重い → 円型加速器でも高エネルギーに加速できる
- $\mu^+\mu^-$ コライダーは電子・陽電子よりクリーン
- しかし、自然界には普通存在しないので、反陽子のように「冷却」が必要
- ミュー粒子に有効な「イオン化冷却」法をSkrinsky-Parkhomchuk 1981, Neuffer 1983 が考案

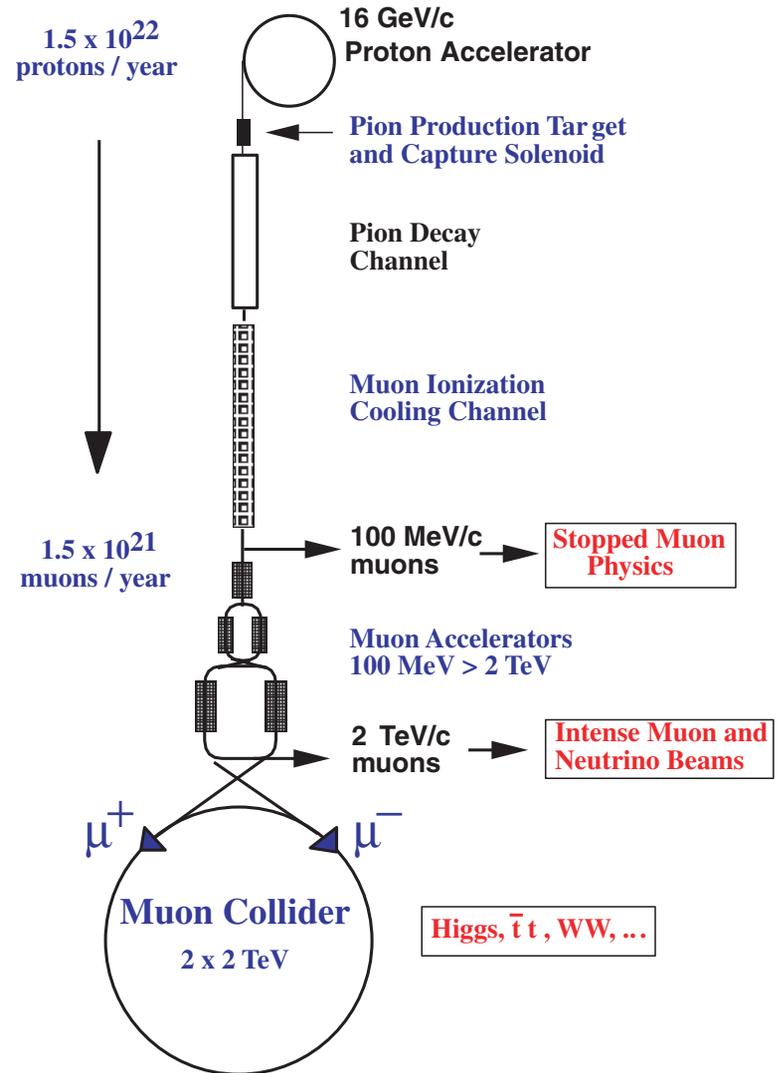


イオン化冷却試験装置MICE (イギリス)



ミュー粒子コライダー

- ミュー粒子の強いビームができれば、まずニュートリノ発生装置として建設される可能性あり
- コライダーまでは遠い道のり



高エネルギー加速器の未来

- リニアークライダーは開発開始からすでに四半世紀、完成まで今後10年以上
- それ以降の加速器はもっと挑戦的
- これまでの説明にでてきたものだけでも、今後30年以上かかるだろう
- そのあとには、プラズマ？
- 20世紀以後の物理はおおむね加速器とともに進歩してきたが、問題は、ますます高価になること