

素粒子・原子核の 実験研究

東北大学大学院理学研究科物理学専攻
助教 金田雅司

kaneta@lambda.phys.tohoku.ac.jp



素粒子・

原子核物理

素粒子物理学

物質の最小単位、第一原理の追求

“標準理論”を超えた素粒子の探索

自然界の四つの力の統合

宇宙物理とのつながり

ビッグバン

消えた反物質

等々

現代の原子核物理

原子核そのものだけでなく
クォークから出来ているものが全てが対象

第一原理の追求（＝素粒子物理）ではなく

どのようにハドロンが作られているのか？

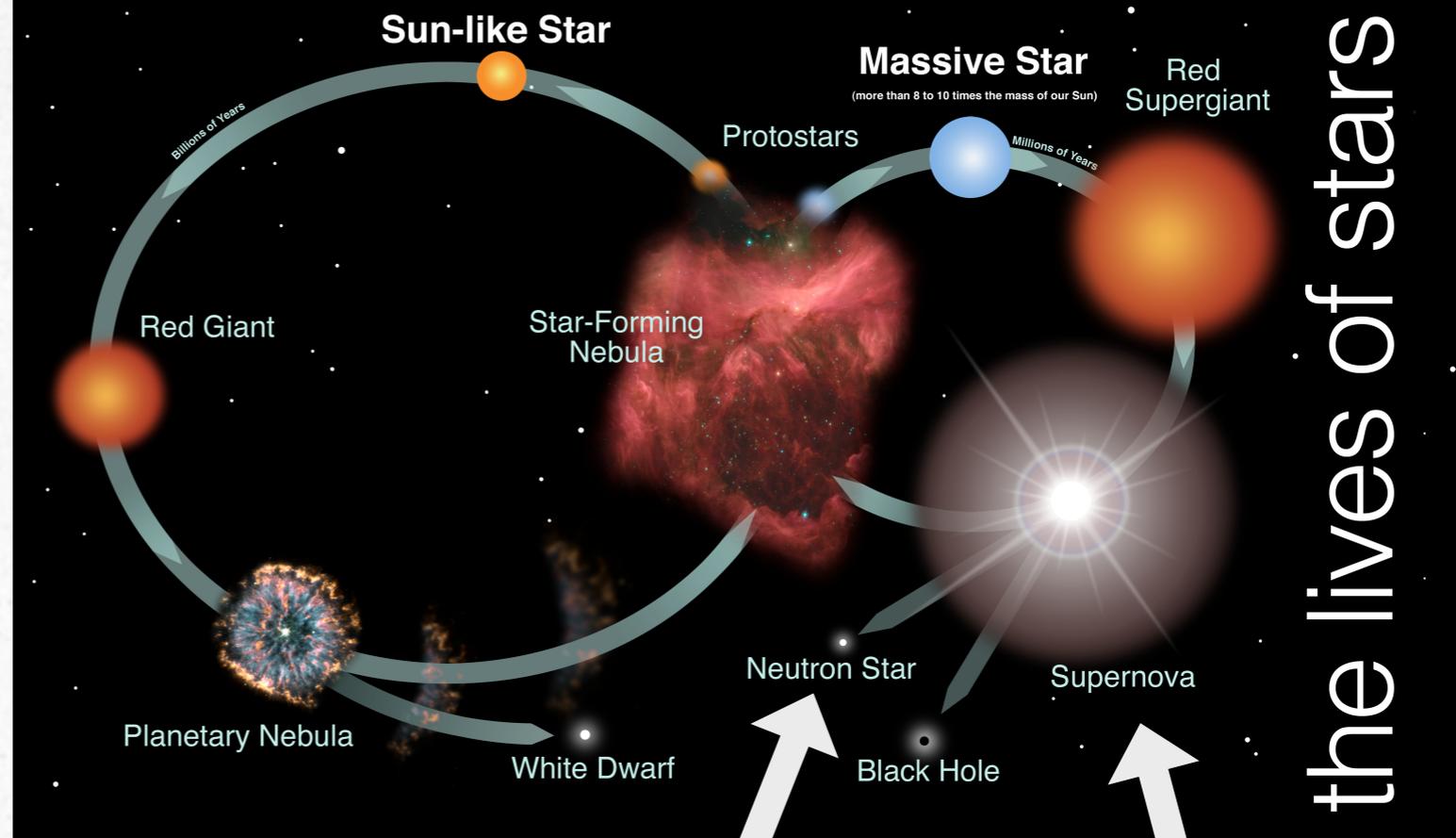
核力の性質は？

質量の起源は？

原子核を構成している陽子・中性子の
質量の源は、真空中に凝縮されているクォーク・反クォーク対による場から
ヒッグス場は、素粒子に質量を与える

宇宙における物質の進化

National Aeronautics and Space Administration



中性子星（高密度核物質）の生成および内部の状態

超新星爆発における重元素の合成

クォーク-グルーオン・プラズマからハドロンへの相転移（核子の生成）

Original: poster of CERN microcosm



極微の世界の探索



極微の世界の探索

粒子 (電子、陽子、原子核) を



極微の世界の探索

粒子 (電子、陽子、原子核) を
加速して



極微の世界の探索

粒子 (電子、陽子、原子核) を

加速して

衝突させて



極微の世界の探索

粒子 (電子、陽子、原子核) を

加速して

衝突させて

壊して



極微の世界の探索

粒子 (電子、陽子、原子核) を

加速して

衝突させて

壊して

中から出てくる物を調べる



素粒子・原子核物理での測定

何かを反応させて出てくるものを調べる

原子核

ハドロン (バリオン、メソン)

レプトン (電子、 μ 粒子、ニュートリノ)

光子

何を測定から知りたいか？

運動量、エネルギー

粒子の種類

電荷

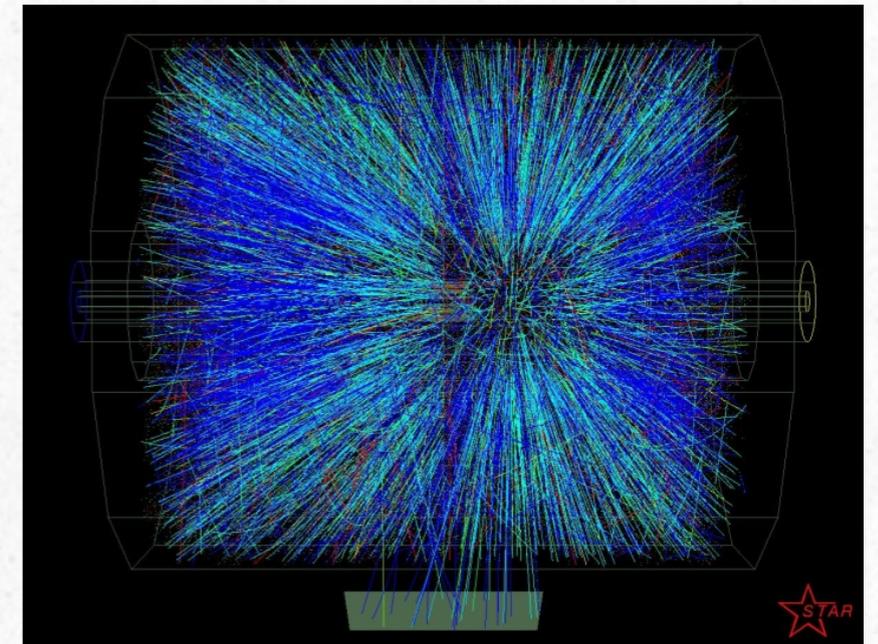
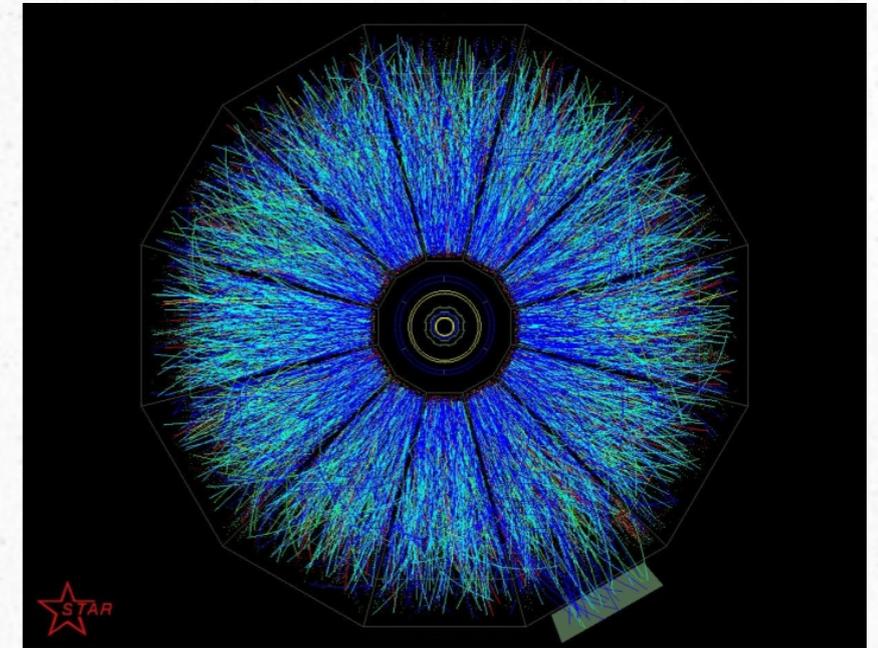
質量

基礎となる物理

電磁相互作用

エネルギー・運動量保存則

相対論的運動学



核子あたり 100GeV+100GeV の金金衝突
イベントディスプレイ (BNL-RHICでのSTAR実験)

測定方法

運動量、電荷

磁場中で荷電粒子がローレンツ力を受けて曲がる

荷電粒子が物質を通過する際に生じるシグナルから、飛跡を再構成
曲率から運動量が求められ、曲がる方向から電荷がわかる

一様磁場中なら $p = 0.3 B \rho$

p : 運動量 [GeV/c]、 B : 磁場 [T]、 ρ : 曲率半径 [m]

飛跡の検出には

荷電粒子が通過する際に生じる電離を利用したガス増幅検出器

50~300 μm の位置分解能

シンチレーション・カウンター

シンチレーター（蛍光物質）と光検出器

シンチレーターのサイズで位置分解能は決まる

半導体検出器

ピクセル型だと ~2 μm の位置分解能

ストリップ（細い筋状）型だと、幅の1/3程度



測定方法

エネルギー

ハドロン

電離等によるエネルギー損失により物質を通過する際に、少しずつエネルギーを落としていく

通過する粒子の質量・電荷数が異なれば、同じ運動量をもった粒子が同じ物質中で落とすエネルギーが異なる
粒子が止まるまでに落とした全てのエネルギーを測れば元々持っていたエネルギーが分かる

光子

光電効果

コンプトン散乱

電子・陽電子対生成

} 弾き飛ばされた電子が落とすエネルギーを測定

電子： 制動放射で光子を放出したり、電離でエネルギーを落とす

陽電子： 物質中の電子対消滅して光子を二つ以上放出

高エネルギーの光子が物質と反応すると、電子・陽電子と光子を放出するプロセスが繰り返される（電磁シャワー）

電子

~20 MeV以上では制動放射が主

光子を放出し、そのあとのプロセスは光子の場合と同じ

電磁シャワーが生成される



測定方法

粒子の質量

飛行時間と運動量を組み合わせる

検出器間を通過する時間を測定

飛跡と時間から速さ、運動量と速さから質量を求める

運動量とチェレンコフ光を組み合わせる

チェレンコフ光の有無

同じ運動量の粒子の場合、 $\beta (=v/c)$ の違いは質量の違い

$\beta > 1/n$ の条件を満たしていれば、ある質量より小さい

チェレンコフ光の放出角度

放出されたチェレンコフ光と荷電粒子とのなす角は β によって決まる

角度から β がわかり、運動量と組み合わせれば質量が分かる



線形加速器 と 円形加速器

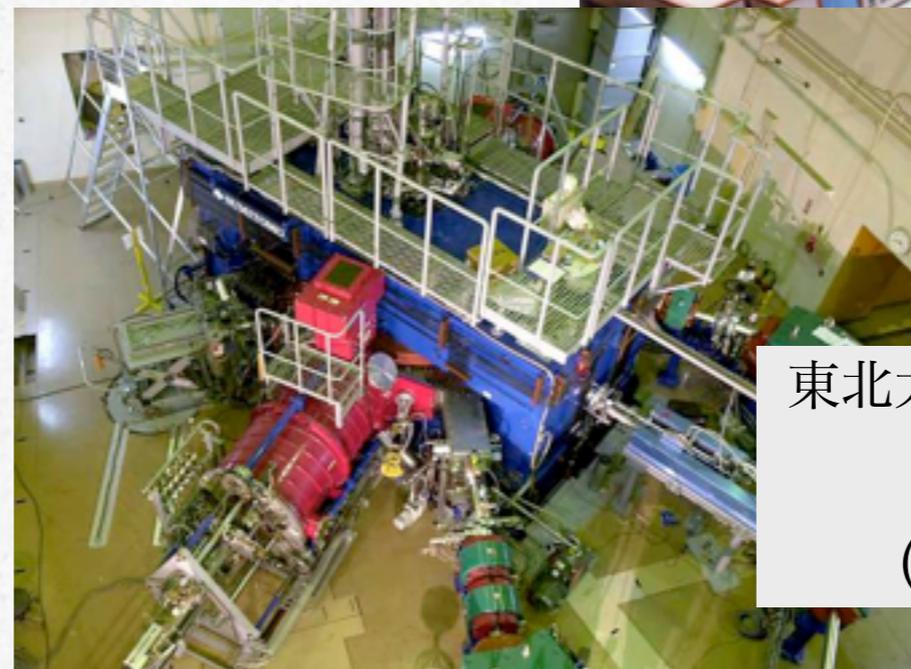
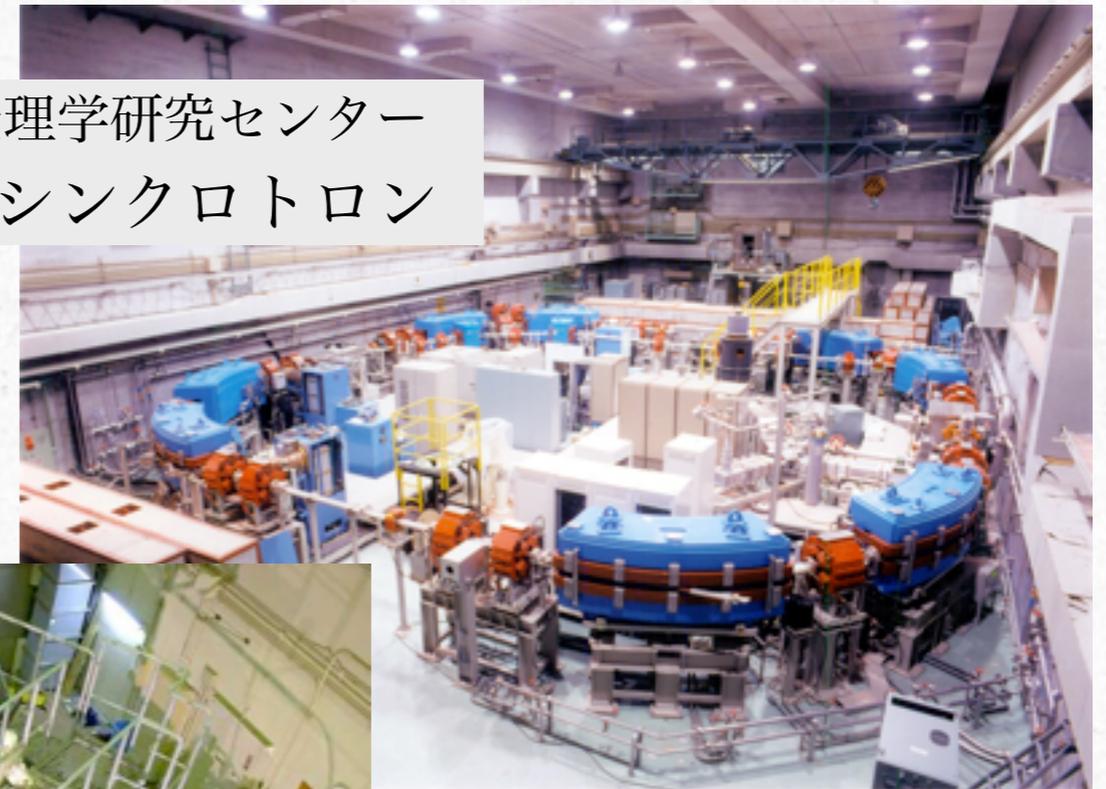
加速部分を直列にたくさん並べる



東北大学電子光物理学研究センター
300MeV 電子LINAC

加速部分は一カ所
円形にビームを回すことにより
何回も加速させる

東北大学電子光物理学研究センター
1.3GeV 電子シンクロトロン



東北大学サイクロトロンRIセンター
サイクロトロン
(陽子、原子核を加速)

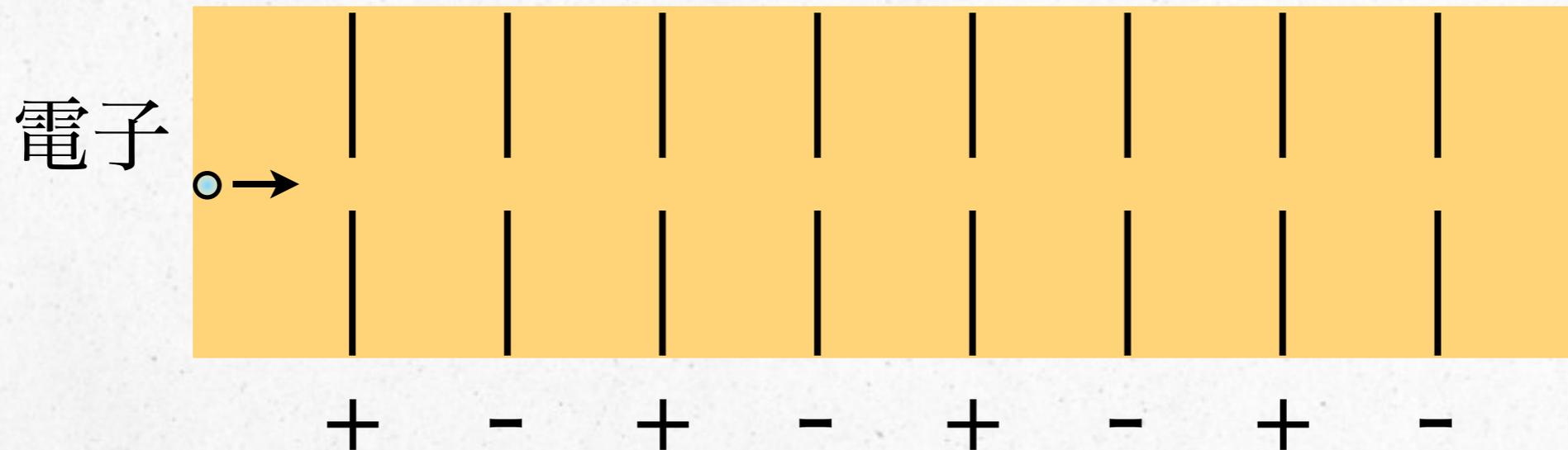
加速器

荷電粒子を加速する装置

電磁気学の応用

+と-の電荷は引き合い
+同士、-同士は反発する

線形加速器



マイナスの電荷を持った電子は
+に引き寄せられる



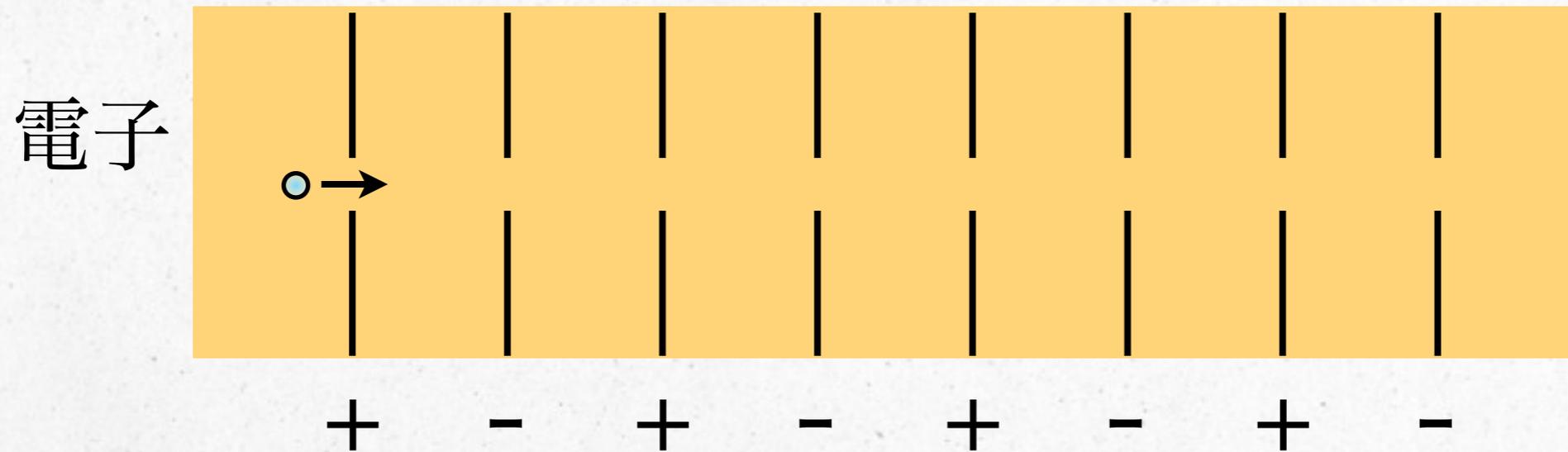
加速器

荷電粒子を加速する装置

電磁気学の応用

+と-の電荷は引き合い
+同士、-同士は反発する

線形加速器



マイナスの電荷を持った電子は
+に引き寄せられる



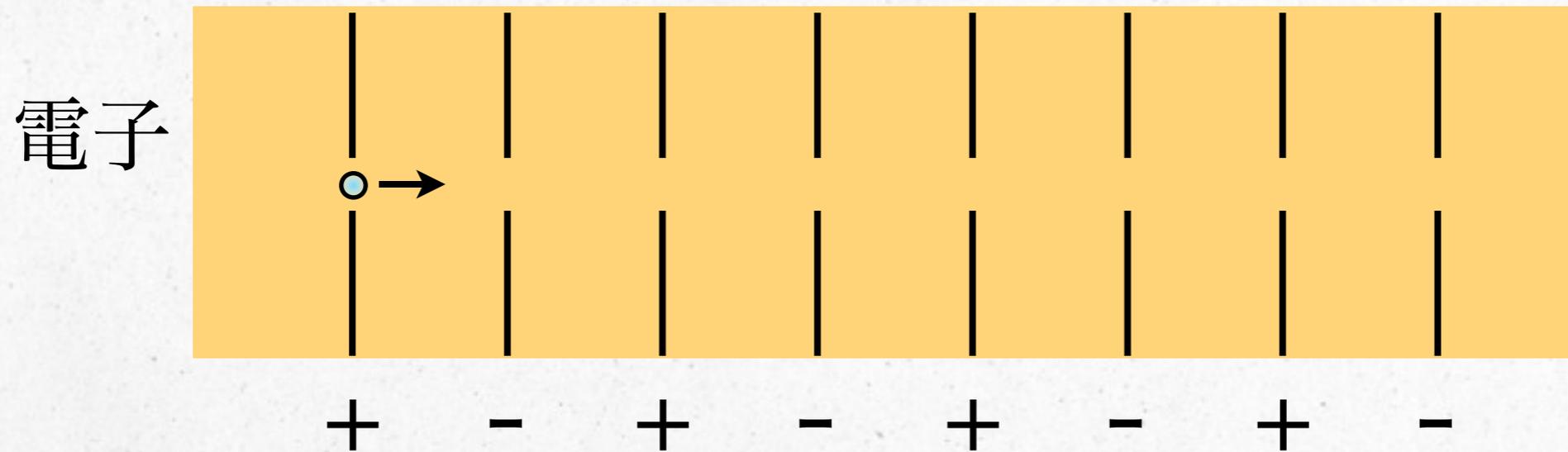
加速器

荷電粒子を加速する装置

電磁気学の応用

+と-の電荷は引き合い
+同士、-同士は反発する

線形加速器



プラスの電極を通り過ぎた瞬間に
電極のプラスとマイナスを入れ替える

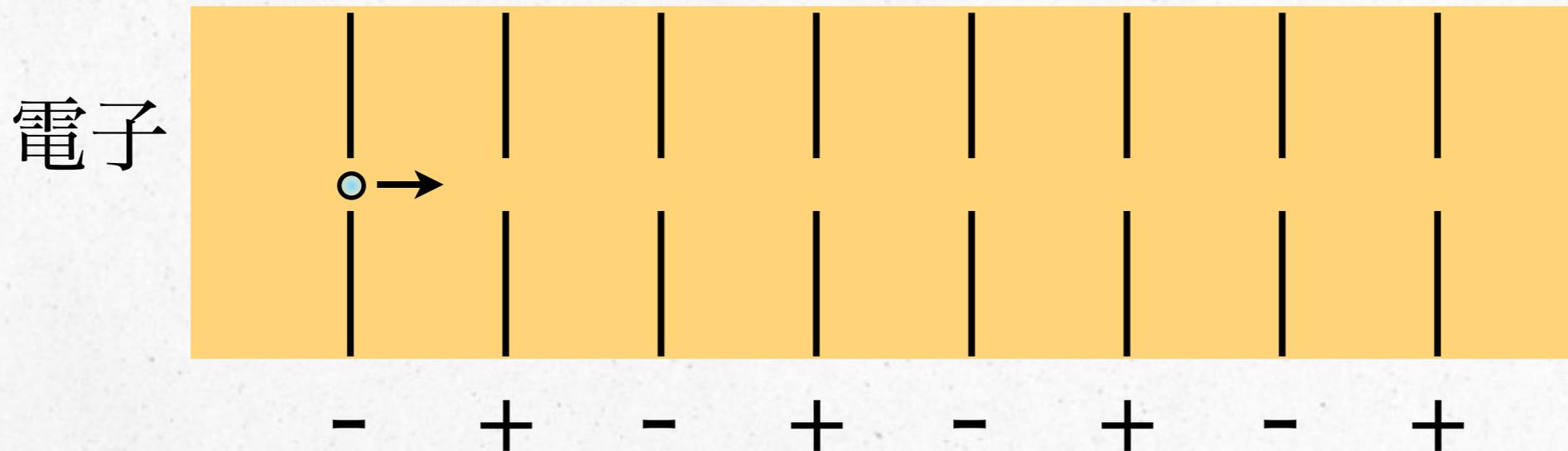
加速器

荷電粒子を加速する装置

電磁気学の応用

+と-の電荷は引き合い
+同士、-同士は反発する

線形加速器



プラスの電極を通り過ぎた瞬間に
電極のプラスとマイナスを入れ替える

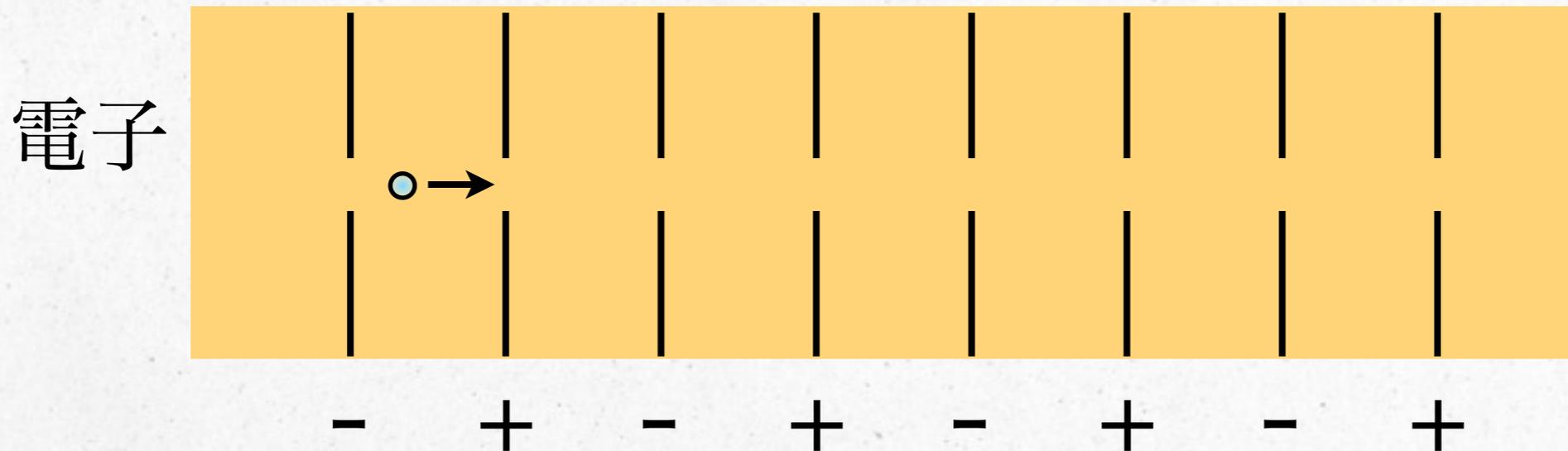
加速器

荷電粒子を加速する装置

電磁気学の応用

+と-の電荷は引き合い
+同士、-同士は反発する

線形加速器

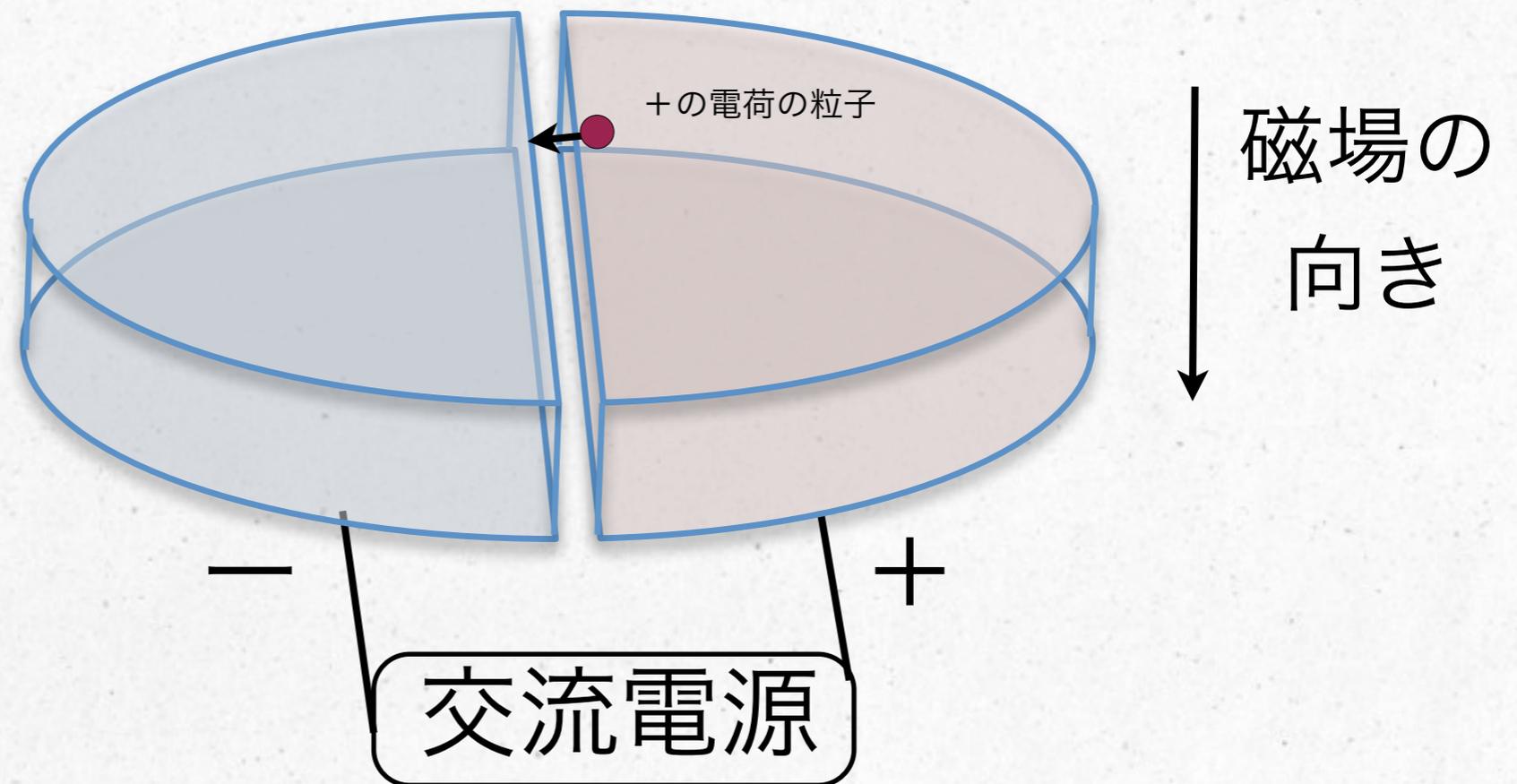


前方のプラス電極に引き寄せられ
後方のマイナス電極からは反発力を受ける



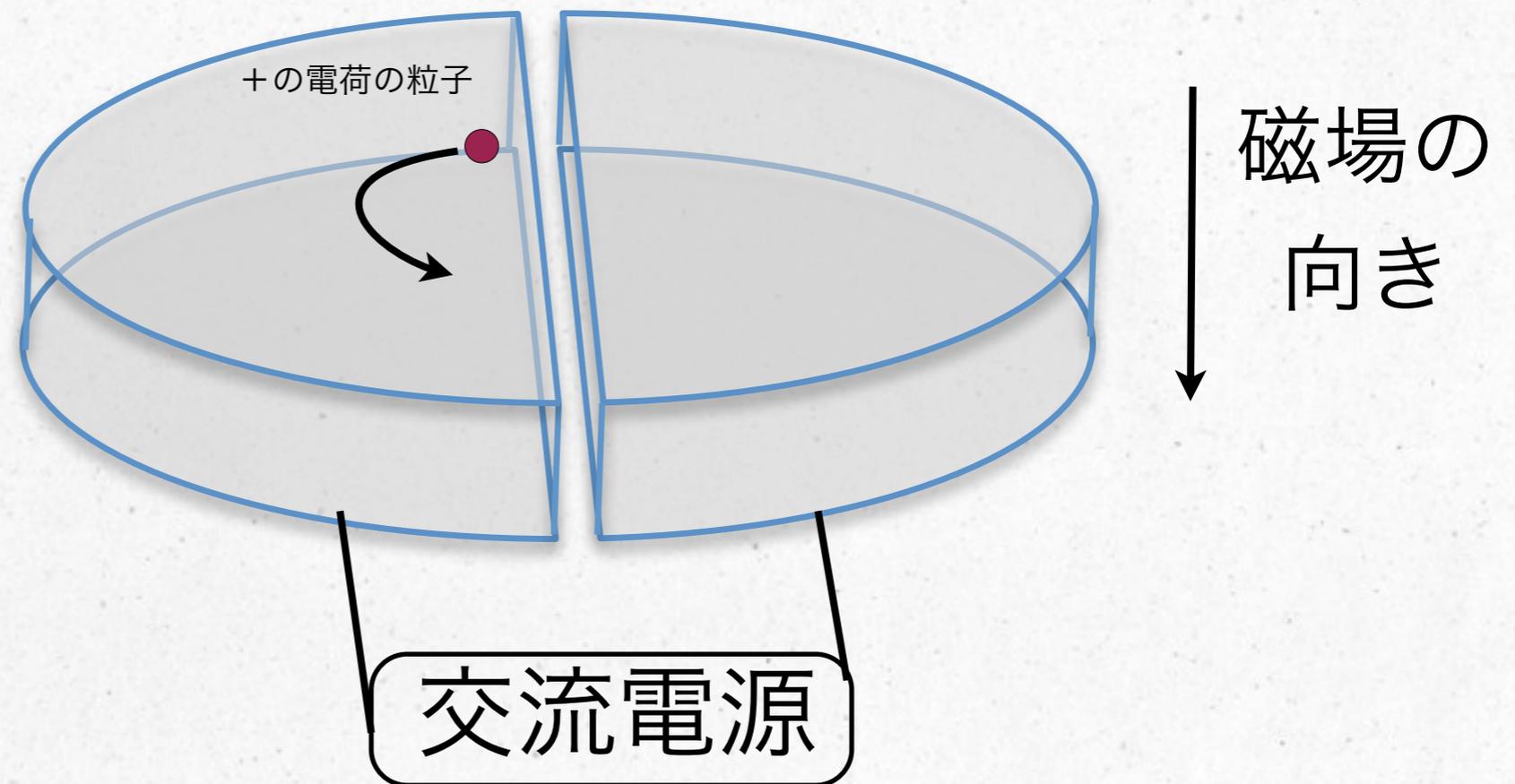
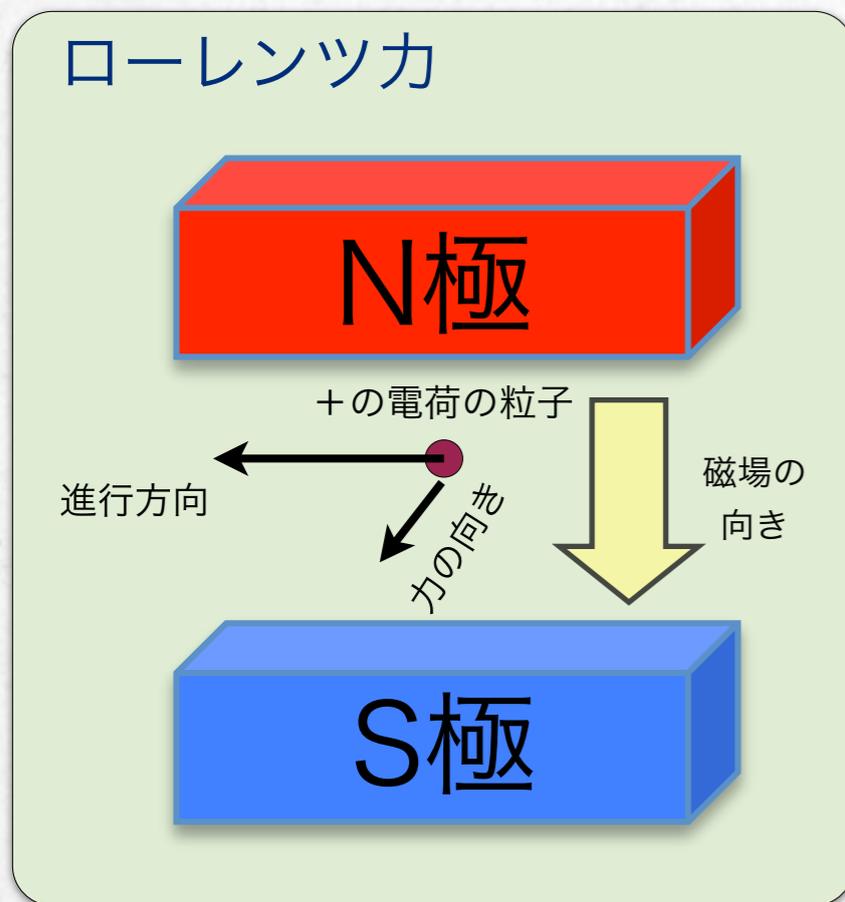
サイクロトロン

- 二つのD電極の間を通るときに加速される
- プラスの電気を帯びた粒子
 - 電極のマイナス側に引かれ
 - プラスの電極からは押される



サイクロトロン

- D電極は電磁石中にある
 - ローレンツ力により円運動



サイクロトロン

- 二つのD電極の間に来たとき再び加速される

ローレンツ力による円運動

$$qvB = \frac{mv^2}{r}$$

$$r = \frac{mv}{qB}$$

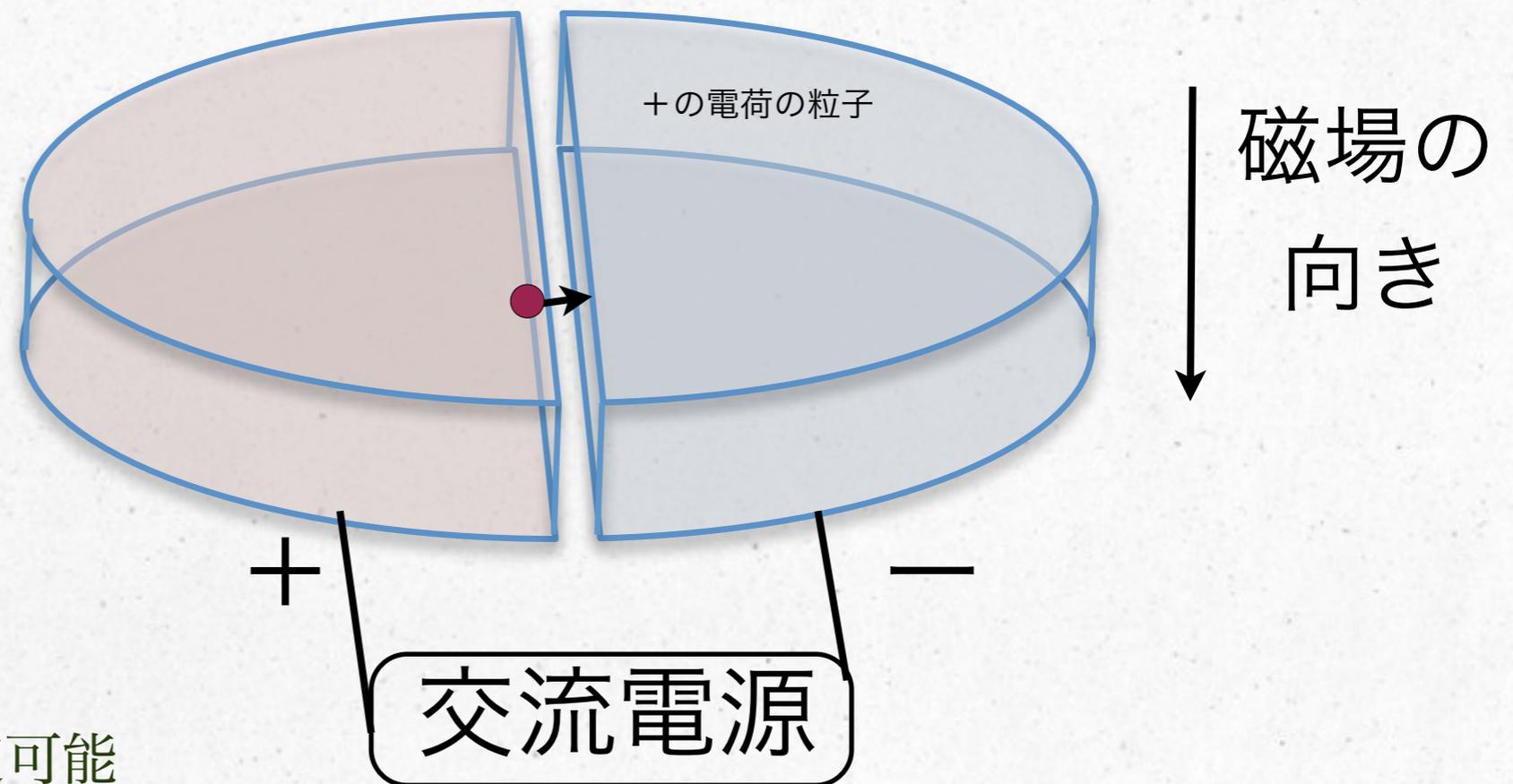
円運動の回転周期

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi m}{qB}$$

周期は速さに無関係

一定周期の交流電源で加速可能

(ただし非相対論的な運動の時)



最初のサイクロトロン

- Ernest O. Lawrence と大学院生の Livingston による

ローレンスバークレイ研究所に
展示されている実物



<http://www2.lbl.gov/Publications/75th/files/exhibit.html>



直径 4.5 inch

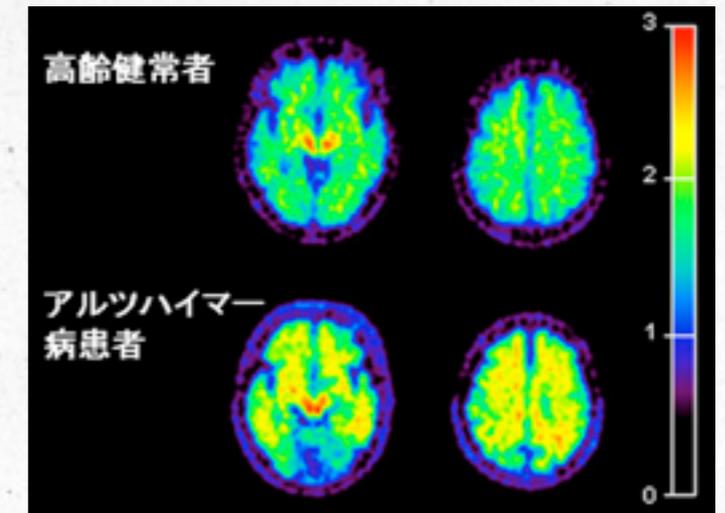
<http://www2.lbl.gov/Science-Articles/Archive/rev-idea.html>

加速器の応用

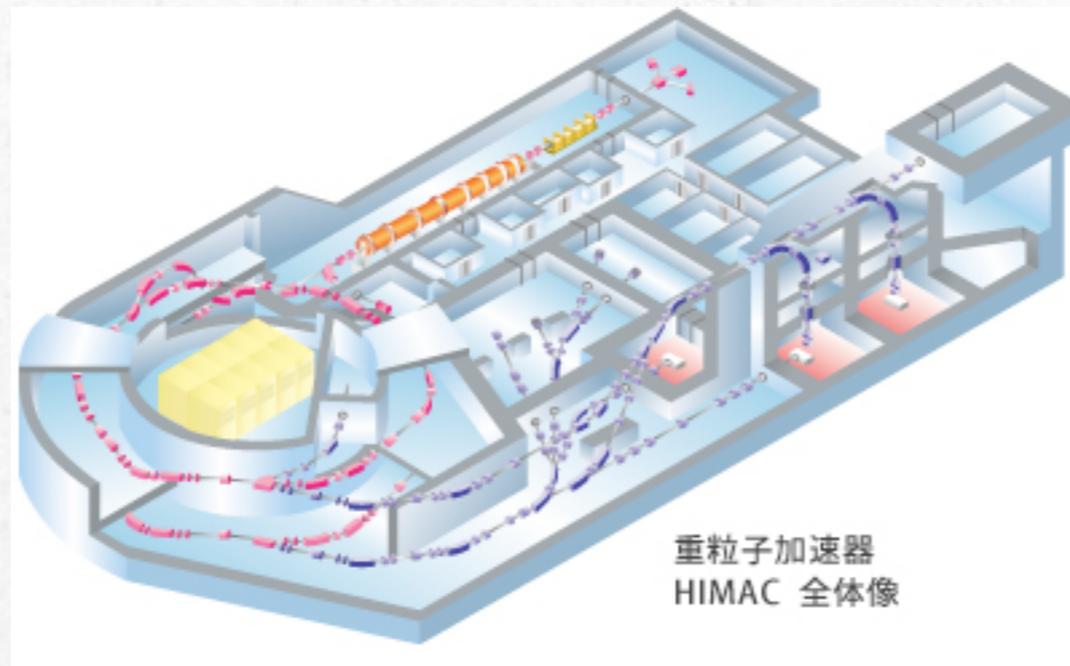
医療目的

電子線、ガンマ線、
陽子・原子核ビーム
を用いた
診断およびガン治療

PET（陽電子放出断層撮影）



<http://kakuigaku.cyric.tohoku.ac.jp/activities.html> より



重粒子線棟

<http://www.nirs.go.jp/rd/collaboration/himac/outline.shtml> より



加速器の応用

非破壊検査 物質の構造解析

放射光（赤外線からX線まで）
中性子を使用

茨城県つくば市
KEK フォトンファクトリ



http://pfwww.kek.jp/outline/pf/PF-Pamph2012_08.pdf

http://j-parc.jp/Acc/ja/img/accelerator_ja.jpg



兵庫県佐用郡佐用町
Spring-8 大型放射光施設

茨城県東海村
大強度陽子加速器施設
(J-PARC)の
物質・生命科学実験施設

http://www.spring8.or.jp/ja/news_publications/press_release/2009/090605_fig/fig4.png



これまでの
私の研究で使った
加速器施設

大学院生時代

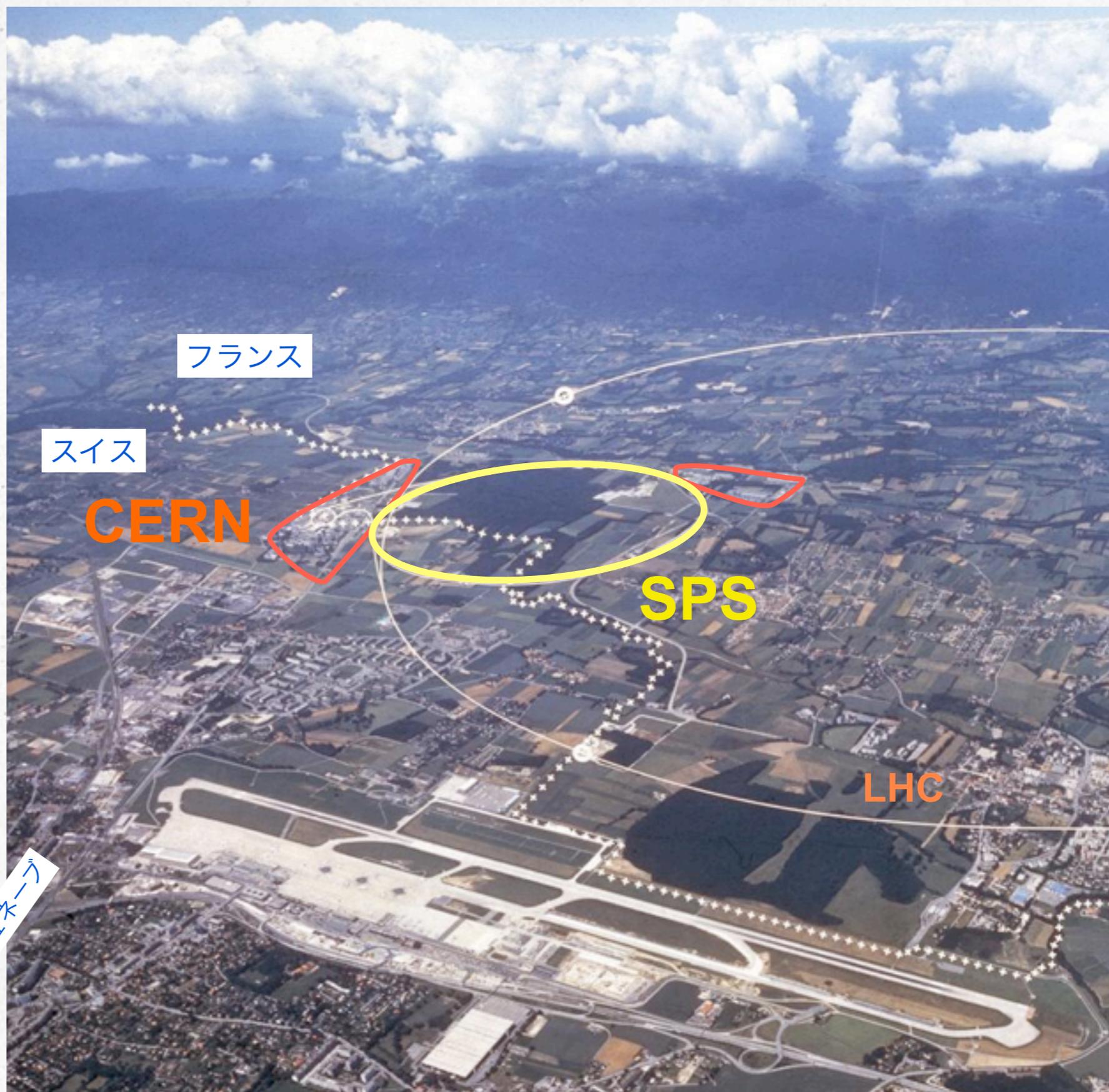
CERN

(欧州合同原子核研究所)
の加速器SPSを用いた
高エネルギー原子核衝突実験

国際共同実験

アメリカ、スウェーデン、
デンマーク、フランス、日本
から11の大学・研究所、約40名
に参加

宇宙初期にあったと考えられ
る、クォーク・グルーオン・
プラズマ探索実験



大学院生時代

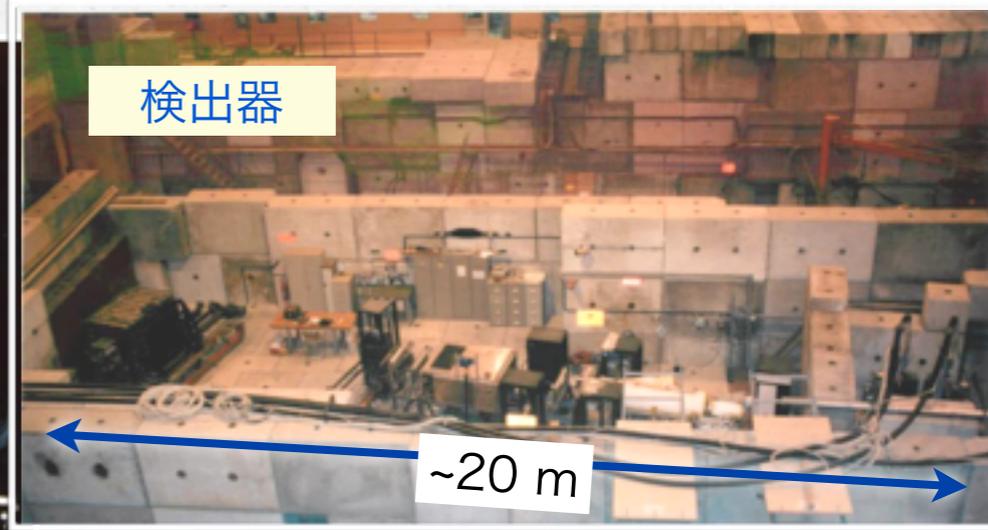
CERN

(欧州合同原子核研究所)
の加速器SPSを用いた
高エネルギー原子核衝突実験

国際共同実験

アメリカ、スウェーデン、
デンマーク、フランス、日本
から11の大学・研究所、約40名
に参加

宇宙初期にあったと考えられ
る、クォーク・グルーオン・
プラズマ探索実験



←ジュネーブ



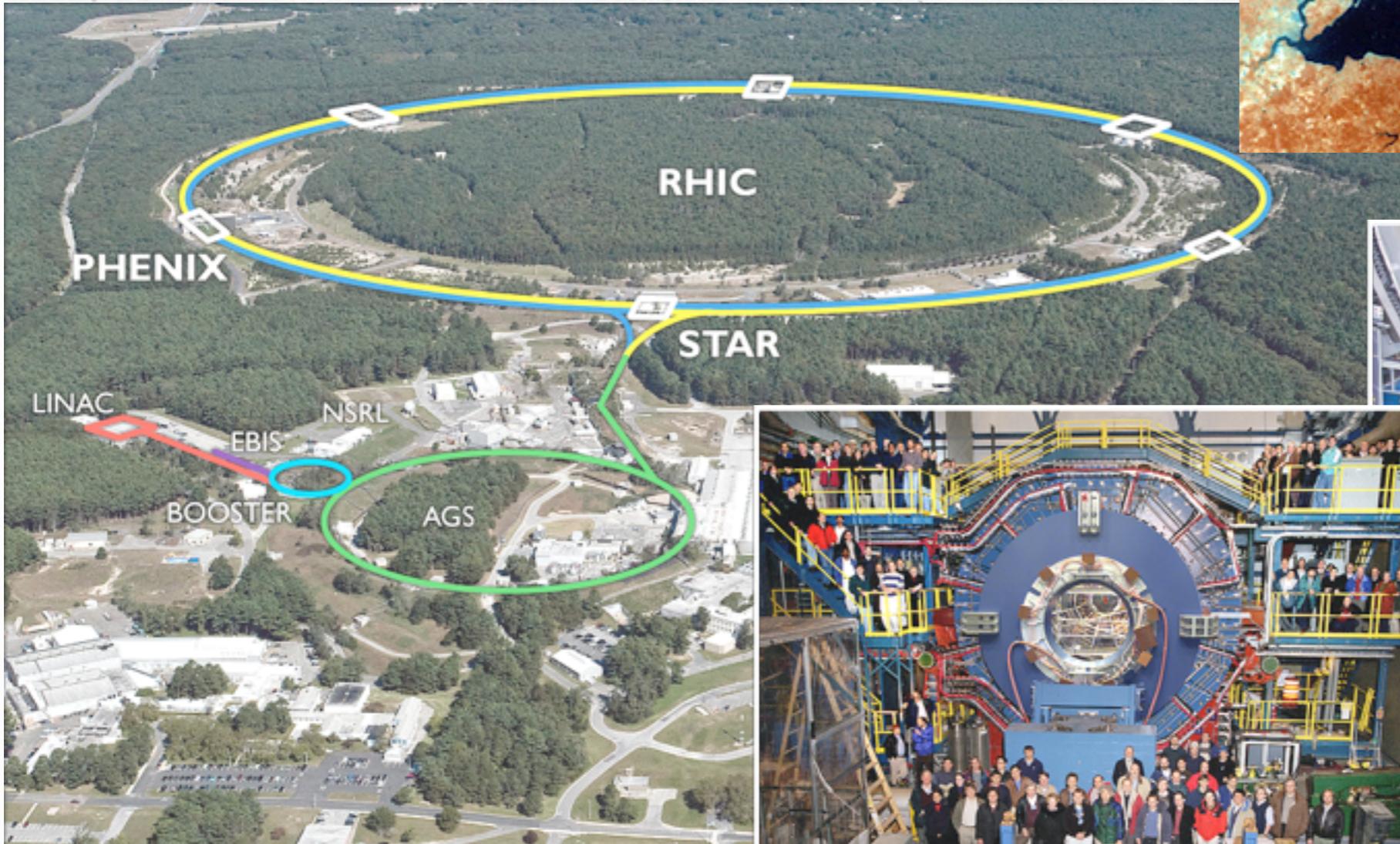
ポスドク研究員時代

ブルックヘブン国立研究所の加速器RHICを用いた
高エネルギー原子核衝突実験

STAR

PHENIX

に参加 (それぞれ400名程度)



現在

電子ビームを用いたストレンジネス核物理

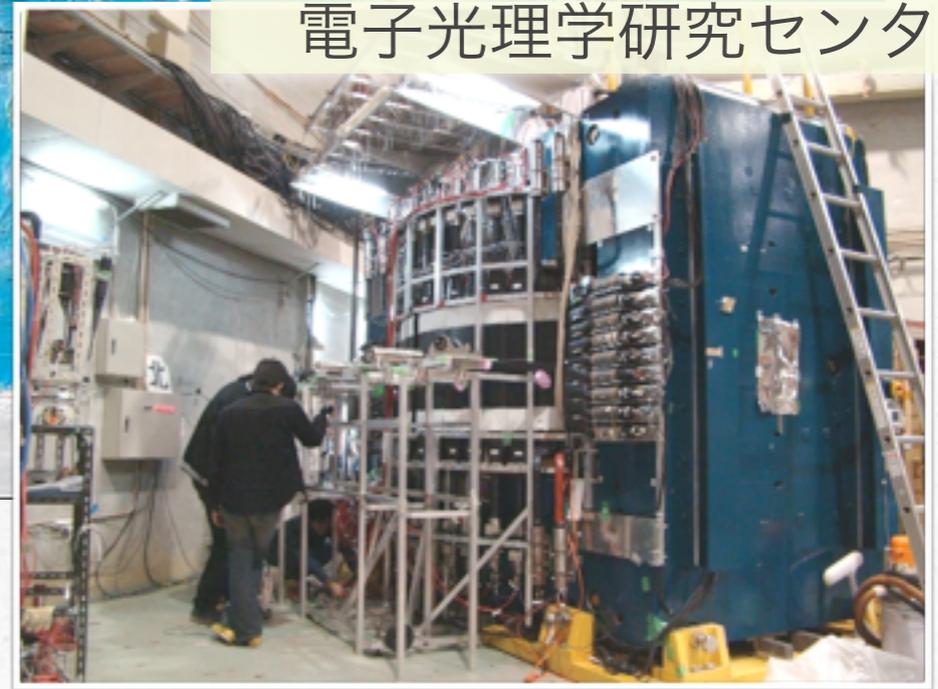
Physical Map of the World, April 2004



アメリカ合衆国
ヴァージニア州
ジェファーソン研究所

ドイツ
マインツ大学

日本、東北大学
電子光物理学研究センター



基礎科学の意義 に関する逸話を少し



基礎科学

19世紀英国の大蔵大臣 William E. Gladstone

Michael Faradayの電磁誘導の演示実験を見学した後に

「で、これは何の役に立つのかね？」

基礎科学

19世紀英国の大蔵大臣 William E. Gladstone

Michael Faradayの電磁誘導の演示実験を見学した後に

「で、これは何の役に立つのかね？」

「何の役に立つか分かりませんが、
いつの日か、閣下はこれに
税金をかけるようになるでしょう」

Michael Faraday

基礎科学

アナウンサー

「ニュートリノの研究は、
どのように役立つんでしょうか？」

基礎科学

アナウンサー

「ニュートリノの研究は、
どのように役立つんでしょうか？」

「役に立たないよ」



基礎科学

アナウンサー

「ニュートリノの研究は、
どのように役立つんでしょうか？」

「役に立たないよ」

小柴昌俊

2002年ノーベル物理学賞

「天体物理学とくに宇宙ニュートリノの検出に対するパイオニア的貢献」
により、レイモンド・デイヴィスと共に



基礎科学

1969年、アメリカ合衆国

原子力エネルギーについての両院合同委員会でJohn Pastore上院議員

「数百万ドルする粒子加速器が

我が国も守るのにどの様に役に立つんだ？」

基礎科学

1969年、アメリカ合衆国

原子力エネルギーについての両院合同委員会でJohn Pastore上院議員

「数百万ドルする粒子加速器が

我が国も守るのにどの様に役に立つんだ？」

「加速器は我が国を守るのに

直接には役に立ちませんが、

守るのに値する国にすることが出来ます」

Robert R. Wilson (米国物理学者)

マンハッタン計画グループリーダー

フェルミ国立加速器研究所の初代所長

科学 ≠ 技術



まとめ：素粒子・原子核の実験研究

- 人間・世界の起源を追い求める基礎科学
 - 知的好奇心に基づく
 - 直接、応用（“役に立つ”）を考えない

まとめ：素粒子・原子核の実験研究

- 人間・世界の起源を追い求める基礎科学
 - 知的好奇心に基づく
 - 直接、応用（“役に立つ”）を考えない
- 理学・工学の知識を集約した総合科学
 - 実験に必要な検出器・測定器
 - 研究者が自ら設計・製作を行う
 - 電磁気学の応用、粒子（素粒子・原子核等）と物質の相互作用
 - 周辺から応用が生まれてくる
 - 放射線検出器、医学分野での診断・治療、等
 - GPS（一般相対性理論）、半導体技術（量子力学）
 - World Wide Web
 - CERNの物理学者 Sir Timothy John Berners-Lee によって開発



事前に頂いた質問

- ILCについて

- 加速器の原理
- 発生する素粒子について
- 東北大学の関わり
- 高校生が見学・研修できるか

- 加速器全般

- 今後実施予定の実験・研究分野
- 世界にある主な加速器とその性能・特徴・トピックス

- 放射線・放射性物質

- 福島第一原発事故による影響

