# 2.加速器実験入門

### 2.加速器実験:内容

- 加速器の原理と歴史
- ・現在稼働中の加速器と実験
  - 最新の物理も織り交ぜながら

# 加速器の原理と歴史

# 加速器 = 顕微鏡 日 光学顕微鏡 電子顕微鏡 加速器



## 加速器とは

### • 荷電粒子を電力を用いて加速する装置

- -静電加速器 (~数10MeV)
  - 加速器の初段など
- サイクロトロン (~数100MeV) RCNP, RIBF, etc.
  - 比較的小型
  - 主に原子核実験
- 線形加速器 (~数100GeV) SLAC, ILC, etc.
  - 円形加速器の入射など
  - 長くして電子・陽電子コライダーなどへ (ILC=数10km)
- シンクロトロン (~数TeV) J-PARC, LHC, etc.
  - 構造上大型に(LHC=周長27km~山手線)
- エネルギー大・主に素粒子・原子核実験

### 加速器は電磁石で構成される



### 電磁場中での粒子の動き

• ローレンツカ:  $\frac{d\vec{p}}{dt} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$ 



7

### 加速の原理

• 電場で荷電粒子を加速



High voltage

(RIKEN Nishina School 2011,上垣外さんのトラペより)

### コッククロフト・ウォルトン型静電加速器

- アーネスト・ウォルトンとジョン・
  コッククロフトが確立
- 1932年、キャベンディッシュ研究所にて世界初の核変換実験
  - 600keV p+ $^{7}_{3}$ Li $\rightarrow \alpha + \alpha$
  - 最大800keV
  - 加速器を用いた原子核実験の幕
    開け!

(スイスのH. Greinacher の発明になる多段型直流 整流器(1919) を改良したもの)



(J. D. Cockcroft and E. T. S. Walton, Proc. R. Soc. London A137 (1932) 229.)

### KEK陽子シンクロトロン入射に使われた コッククロフト・ウォルトン型静電加速器



 水素原子に1個の電子のついた負水素イオンを作り、 75万電子ボルトの直流電場を流す(750keV)

### コッククロフト・ウォルトン回路

高圧電源発生回路
 – PMT電源などの中身





# バンデグラフ型静電加速器

- 1931年にロベルト・ヴァンデグ
  ラフにより実用化(750keV\*2)
- 絶縁物のベルトに電荷を乗せて電極に運び高電圧を得る
- ~10MeV程度の加速

タンデム加速器 (原研、各大学など) 高電圧を2重に利用する事が出来る 加速粒子として負イオンを用いて正電極 (1) に向けて加速 正電極内で炭素膜などで電子を剥ぎ取っ  $(\mathbf{2})$ て正イオンにする 3 接地電極に向けて再度加速



# 線形加速器 (リニアック)

- 1928年、ヴィデレー(R. Wderoe)がRF(高周波)を 用いた線形加速器の試作に成功
- 現在、実用化されている線形加速器では100-3,000MHz位の周波数を用いる



## 線形加速器の例1

#### HIMACのリニアック

#### J-PARCのリニアック





- 800 keV/u RFQ(Radio-Frequency Quadrupole)リニアック
- 6 MeV/u アルバレリニアック
  イオン源で発生した重イオンビームを
  6 MeV/uまで加速

- 3MeV RFQリニアック
- 50MeV ドリフトチューブリニアック(Drift-Tube Linac, DTL)
- 181MeV 機能分離型ドリフトチューブリニ アック(Separate-type DTL, SDTL)
- イオン源で発生した50keVの負水素イオン
- ビームを181MeV まで加速

## 線形加速器の例2

#### Stanford Linear Accelerator

- 電子線形加速器(50GeV)
- 全長2マイル(6.4km)
- 1967年運転開始
- 電子・核子深非弾性散乱での核子構造研究



(from Wikipedia) <sup>15</sup>

# サイクロトロン (Cyclotron)

 静電加速器の限界(放電)と 線形加速器の難点(長くなる)を克服する円形加速器の登場



- ローレンス(E.O.Lawrence)により開発
  - 1931年、直径4インチ(10cm) の試験機(陽子80keV)
  - 1932年、直径11インチ(28cm) の1号機(陽子1.2MeV)
  - 1932年、直径27インチ(69cm) の大型機(重水素5MeV)



### サイクロトロンの原理



### 理研のサイクロトロン

1937年、第1号サイクロトロン(仁科芳雄) 磁極直径 65 cm. わが国最初のサイクロトロン



1953年、第3号サイクロトロン 磁極直径 65 cm



1943年、第2号サイクロトロン コン 磁極直径 150 cm





### --- 史上最強のサイクロトロン ---理研 超伝導リングサイクロトロン SRC



435 MeV/u 重イオンビーム (水素~ウラン) 磁石総重量: 8,300t (東京タワー約3600トン) マグネット直径: 18.5m 磁場: 3.8T

### シンクロトロン (Synchrotron)

- サイクロトロンの限界
  - エネルギーと共に軌道半径も大きくなる
  - 相対論的エネルギーになるとサイクロトロン周波数ω<sub>c</sub>が一定で 無くなる



- 1945年、位相安定性の原理が発見され、この原理を加速 に用いるシンクロトロンが誕生 (V.Veksler, E.M.McMillan)
  - 1952年、四重極磁石などを用いた強収束の原理が発見され、 粒子を加速するエネルギーはそれまでの1万倍から10万倍と いう、飛躍的な進歩を遂げる (R.D.Courant, M.S.Livingston, H.S.Snyder)

### 高エネルギー物理学の幕開け

- 1940年代までは宇宙線を用いた実験のみ。
- 1950年代から、加速器(シンクロトロン)を用いた高エ ネルギー物理学実験(>GeV)に取って変わられる。



Cosmotron@BNL (1953~66) 3.3GeV 陽子シンクロトロン

メソン・バリオンの実験



Bevatron@LBNL (1954~93) 6.2GeV 陽子シンクロトロン →Bevalac (1971~93) 2.1GeV/u 重イオン加速器

メソン・バリオンの実験 反陽子(1955年)・反中性子(1956年)の発見

## シンクロトロンの例1

#### AGS@BNL

SPS@CERN



- 1960年-(現在はRHICの入射器)
- 33 GeV (陽子加速)
- リング直径約260m、周長約810m

CP破れ発見(1964年) J/ψ発見(1974年), etc.



- 1976年-(現在はLHCの入射器)
- 500 GeV
- リング直径約2.2km、周長約6.9km

#### 様々な素粒子・原子核実験

### シンクロトロンの例2

#### HIMAC

#### **J-PARC**





- 1994年-
- 最大約800 MeV/u
- リング直径約42m、周長約130m
- 2重リング方式

#### がん治療重イオン加速器 原子核実験

- 2007年-
- 3 GeV シンクロトロン (RCS、周長300m)
  - 取り出し最大25Hz
- 50 GeV シンクロトロン (MR、周長1.6km)
  - 現在は 30GeV

#### 素粒子·原子核実験 物質生命化学

衝突型加速器(コライダー)

- 衝突エネルギーを上げるため、衝突型加速器が活躍
  - 固定標的実験: 500 GeV p + 0 GeV p → √*s*~32 GeV
  - コライダー実験: 270 GeV p + 270 GeV p → √*s*=540 GeV

#### 1つのリング

- 陽子・反陽子や電子・陽電子など同じ重さで逆電荷
- 同じエネルギー



#### 2つのリング

- 好きな組み合わせ
- 好きなエネルギー



# レプトン・コライダーの例

AdA







- KEK B-Factory t-5GeV e+
- 1961年、イタリアで最初のビーム
- フランスオルセーに移築、1964年
  に最初のビーム衝突
- 電子・陽電子 √*s* =0.5 GeV
- 軌道半径65cm

- 前身はTRISTAN (1986-95年、電子・陽電子 √s = 30 GeV)
- 1998-2010年
- 電子8GeV、陽電子3.5GeV
- 周長3km
- Super KEKBへと準備中

#### B中間子を用いたCP破れ, etc. 25

ハドロン・コライダーの例

#### SppS

#### LHC



- 1981年、初めての陽子・反陽子衝突
- 1968年にビーム冷却方法が発明 (Simon van derMeer)
- 陽子•反陽子 √s =540 GeV
- リング直径約2.2km、周長約6.9km

#### W/Z発見(1983年), etc.

- 2008年-
- LEPの地下トンネル(100m)に建設 (1989-2000年、電子・陽電子 √s = 200 GeV)
- 陽子・陽子√*s* =14 TeV
- 周長27km

#### ヒッグスボソン発見(2012年), etc. 26

リニア・コライダー (計画中)

- 電子・陽電子コライダーの利点
  エネルギーを全部使える(陽子=クォーク3つ)
  反応がきれい
- シンクロトロンによる電子ビーム加速の限界
  - シンクロトロン放射によるビームエネルギーの損失
  - 装置・電気代の増加
  - リングの大型化で回避
  - LEPが限界 (電子100GeV+陽電子100GeV、周長27km)
- ILC (International Linear Collider)
- 長い線形加速器を2つ建設してコライダーとする
  - 全長~30km、√*s*~500 GeV
  - ビームの再利用が出来ないため、超精密コントロールが必須



### 加速器のエネルギーの歴史



リビングストン図

- 初出はM. S. Livingston &
  J. P. Blewett: "Particle Accelerators, p.6", MacGraw Hill, 1962
- コライダーでは固定標的 実験システムに換算し た等価エネルギーを表 示
  - 固定票的では√s~√2mE、
    LHC:14TeVはE~10<sup>17</sup>eV = 100PeVと換算される

# 現在稼働中の加速器と実験

### 世界の主な加速器



### CERN•LHC



### LHC (Large Hadron Collider)



- 2008年-
- LEPの地下トンネル(100m)に建設
- 陽子•陽子√*s* =14 TeV
- Pb•Pb  $\sqrt{s} = 2.76$  TeV
- 周長27km
- 主に4つの巨大実験(ATLAS/CMS/ALICE/LHCb)

2008:
$$\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$$
2010-2012: $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$ 2012: $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$ 2014 - : $\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}$ 

### ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS)



- 高さ22m、全長44m、重量7,000t
- ソレノイド磁場/トロイド磁場で粒子
  を再構成
- ヒッグスボソン、SUSY探索



- Muon Spectrometer:
  - Monitored Drift Tube
  - Thin Gap Chamber
- Magnet system:
  - Solenoid Magnet
  - End-Cap Toroid Magnet
  - <sup>ker</sup> Barrel Toroid Magnet
- Inner Detector:
  - Transition Radiation Tracker
  - Semi-Conductor Tracker
  - Pixel Detector
- Calorimeters:
  - EM Cal (LAr+Cu )
  - Hadronic Cal (Lar+W/Scinti.+Fe)



- ソレノイド磁場で粒子を再構成
- ヒッグスボソン、SUSY探索

Drift Tube (DT)

Solenoid Magnet

The muon detectors

- Cathode Strip Chamber (CSC)
- Resistive Plate Chamber (RPC)

### ALICE (A Large Ion Collider Experiment)



- 高さ16m、全長26m、重量10,000t
- ソレノイド磁場/ダイポール磁場で 粒子を再構成
- 重イオン衝突反応でのQGP探索





- Inner Tracking System (SPD/SSD/SSD)
- Time Projection Chamber (TPC)
- Transition Radiation Detector (TRD)
- TOF (MRPC)
- Photon Spectrometer (PHOS, PbWO4)
- Ring Image Cherenkov Counter (RICH)
- Muon spectrometer (RPC)
- EM Cal (Scinti.+Pb)
- Solenoid Magnet
- Dipole Magnet

### LHCb (LHC-beauty)



- 高さ10m、全長21m、重量5,600t
- ダイポール磁場で粒子を再構成
- B中間子を用いたCP破れの研究





Silicon Tracker (VELO)

- Ring Image Cherenkov Counter (RICH)
- Dipole Magnet
- Muon spectrometer (SSD, straw-tube)
- Pre-shower Cal (Scinti.+Pb)
- EM Cal (Scinti.+Pb)
- Hadronic Cal (Scinti.+Fe)
2012年7月、ヒッグスボソン<sub>らしき物</sub>発見!



Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC  $\stackrel{*}{\sim}$ 

PLB716,1(2012)

#### ATLAS Collaboration\*

This paper is dedicated to the memory of our ATLAS colleagues who did not live to see the full impact and significance of their contributions to the experiment.

Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC  $^{\bigstar}$ 

#### CMS Collaboration\*

PLB716,30(2012)

CERN, Switzerland

This paper is dedicated to the memory of our colleagues who worked on CMS but have since passed away. In recognition of their many contributions to the achievement of this observation.



- 標準模型 = 量子色力学(QCD) + 電弱統 一理論(WS理論)
- しかし、標準模型が原理として用いているゲージ場理論が成り立つには、すべての素粒子の質量が厳密にゼロでなくてはならない!





- クォーク、レプトン、ゲージボソンに質量
   を与える機構=ヒッグス機構
- その場と伝達粒子 = ヒッグス場、ヒッグ スボソン
  - 電弱相互作用の"自発対称性の破れ"に よって生ずる

# 自発的対称性の破れ

• 1961年、南部陽一郎のアイデア

- PhysRev.122.345(1961), PhysRev.124.246(1961)

自発的対称性の破れは現実の身の回りにあふれている



**鉛筆の周り**360度が同等 →対称性が保たれている

ある方向に倒れてしまう →対称性が破れた

ヒッグスポテンシャル

- スピン0の複素スカラー場(=ヒッグス場)を導入
- ヒッグスポテンシャル V(φ) =  $\mu^2 |\phi|^2 + \lambda |\phi|^4, \lambda > 0$



### ヒッグスボソン探索

- ヒッグスボソンの質量
   によって崩壊先が変わると予想されている
- 有力チャンネルはバッ クグラウンドなどを考慮 して
  - $-ZZ^{(*)} \rightarrow llll$
  - $-\gamma\gamma$
  - $-WW^{(*)} \rightarrow l\nu l\nu$



# 新粒子発見! (2012/07/04)

- ATLAS, CMSは125GeV/c<sup>2</sup>付近に新粒子を発見したと発表 (@5σ=99.99994%)
- これが"本当に"ヒッグスボソンなのかどうかは現在も 研究が進められている



### SUSY探索

- ・ 超対称性:ボソンとフェルミオンを入れ替える対称性

   重力を含む力の統一で重要な役割
- 超対称性粒子(SUSY):全ての素粒子の超対称性 パートナー、質量は1TeV以下と予想

- 暗黒物質の候補







### これからの理解が期待されている

WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe): ビッグバンの名残の熱放射である宇宙マイ クロ波背景放射 (CMB) の温度を全天にわ たってサーベイ観測した (2001~2010)



### BNL•RHIC



## RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider) ① 重イオン衝突実験 ② 偏極陽子-偏極陽子衝突実験



### PHENIX

(the Pioneering High Energy Nuclear Interaction eXperiment) レプトン(γ,e,μ)を検出することを主な目的とした検出器





### STAR (Solenodial Tracker at Rhic)

巨大なTime Projection Chamber (TPC)を用いて大立体角を覆う検出器





①クォーク・グルーオン・プラズマ(QGP)

- 宇宙は約137億年前、ビッグ バンから始まった。
- ビッグバン直後の宇宙は超高 温・高密度の状態で、クォー クやグルーオンがハドロンに 閉じ込められる前のばらばら な状態、"クォーク・グルーオ ン・プラズマ(QGP)"だったと 考えられている





どうやって、地上でQGPを生成する?



高エネルギー加速器を用いた重イオン 衝突で"高温状態"を生成する49

### 予想されるQCD相図



### QGP探索の歴史

 これまで約30年間、様々な重イオン衝突実験 が行われてきた

加速器	研究所	年	エネルギー	ビーム
Bevalac	LBNL	1984 – 93	< 2 AGeV	C, Ca, Nb, Ni, Au,
AGS	BNL	1986 – 94	11.5 <i>,</i> 15 AGeV	Si <i>,</i> Au
SPS	CERN	1986 -	158, 200 AGeV	O, S, In, Pb
RHIC	BNL	2000 -	$\sqrt{S_{NN}}$ =200 GeV	Cu, Au
LHC	CERN	2010 -	$\sqrt{S_{NN}}$ =5.5 TeV	Pb

# QGP発見?@RHIC

- 2005年、RHICでのAu-Au衝突実験で「完 全流体」である高密度物質が生成され たと発表 完全流体=粘性の無い理想の流体
  - –膨張効果(フロー)
  - -ジェット抑制(クエンチ)
  - 生成状態の温度 ← 2010年発表



2つの金原子核はたいていずれて衝突す るため、楕円形の高密度状態ができる 横方向に膨張する「楕円フロー」という 現象を起こすことが、粘性の無い証拠



# 楕円フロー(v2)測定



( Phys. Rev. Lett. 91, 182301 (2003) )

- 様々な粒子が有限のv2を示す
   → 楕円フローの存在
- (p<sub>T</sub><2GeV/c)流体力学を用いたモ デルで説明出来る
  - 衝突後初期の段階に熱平衡に達 成したと考えられる
  - → 強く相互作用する物質の存在
- (p<sub>T</sub>>2GeV/c)流体力学を用いたモ デルで説明出来ない
   クォーク数でスケールすると一致
   ラクォークレベルでのフローの示唆

# ジェット抑制(クエンチ)

- QGP等の高密度物質が生成されると、出てくるクォークやグルーオンがエネルギーを損失
- AA衝突とpp衝突の比較
   生成断面積の変化
   方位角異方性



### ジェット抑制測定

### 生成断面積の変化

AA衝突とpp衝突の断面積比較 $R_{AA} = \frac{dN_{AA}}{N_{col}dN_{pp}}$ 

### 方位角異方性

AA衝突とpp衝突でジェット の出方の比較



### 生成状態の温度

- 熱的光子(direct photon)の観測により、系の温度が直接的 に得られる
  - 衝突初期に発生する光子 = 高温物質から熱的に放射されたもの
  - その発生量とエネルギー分布は、衝突初期の温度とその後の時間発展を反映
  - $-\gamma \rightarrow e^+e^-$ 測定より、バックグラウンドを減らした測定が可能



## まだまだ探求は続く

- RHICで見つかった状態はQGP?
- RHICではエネルギーを変えながら(7.7-200GeV)、 様々な核子の衝突(p,d,Cu,Au,U)で確認している
- さらに高エネルギーへ
   RHIC: √s = 200 GeV

LHC:  $\sqrt{s} = 2.76$  TeV





# ②陽子のスピン?

- クォーク:スピン1/2 \*3 =? 陽子:スピン1/2
- 1987年、CERN/EMC実験が「陽子のスピン にはクォークのスピンはほとんど関与しな い」との実験結果を報告

### → スピンクライシス



 現在、グルーオンやクォーク・グルーオンの 角運動量が陽子のスピンを担うのか?研究 が続けられている (2+-22ピン23%)



どうやって測定する?  $-\Delta\Sigma + \Delta g + L$ 陽子スピン: 2

- 偏極レプトン-偏極陽子に おける深非弾性散乱 (EMC/SMC/COMPASS/etc.)
- 偏極陽子-偏極陽子衝突 実験(RHIC-spin)



### CERN/COMPASS実験

- 160GeV偏極µビームを偏極陽子標的に当てて深非弾性散乱 (DIS)より陽子内部のスピンを探る
- EMC→SMC→COMPASS、基本検出器は同じ、カロリメーター と飛跡検出器のお化け



### **RHIC-spin**



### 陽子スピン、現在の状況

- ・ 陽子スピンへのグルーオンの寄与は小さそうだ!
- 残るはクォークまたはグルーオンの軌道角運動量 → どう やって測定?専門家にも難しいらしい。





### KEKB



- 1998-2010年
- 電子8GeV+陽電子3.5GeV
- 世界最高のルミノシティ
   (ルミノシティ)×(断面積)=(1秒あたりの反応数)

### Belle



- e<sup>+</sup>e<sup>-</sup> → Y(4s) → B<sup>0</sup>B<sup>0</sup>を測定し、B中間子のCP対称性の破れ を測定することが主な目的 その他、いろいろなことをやっています(出来ます)
   物質と反物質の謎 → CP対称性の破れがその謎を解く鍵
- ビームも検出器も非対称
   Y(4s)をローレンツブーストさせて寿命を長くする

# 小林益川理論とCP対称性の破れ

- クォークが3世代以上あると、世代混合によりCPの対称性の 破れを導入することが可能
  - まだu/d/sの3つのクォークしか見つかっていない時代に3世代 クォークの存在を予言し、その後予想通り3世代目まで(c/b/t)見 つかる
- 世代混合はCKM行列(ユニタリー行列V<sub>CKM</sub>)により起こる
   2世代混合を提唱したCabibboの名も含め3人の名前の頭文字





(説明図はKEK後田さん、総研大高エネルギー加速器セミナー(2012)スライドより)

テトラクォーク?

- 2003年、クォーク2つ、反クォーク2つからなるテトラクォーク <sub>らしき物</sub>X(3872)が見つかる - 考えられているテトラクォークの例
  - 電荷が2の中間子







- 2008年、電荷を持ったZ(4430)が見つかり、テトラクォークらしさがいちだんとアップ
- Super KEKBでは、これらの」<sup>PC</sup>決定などが見込まれる





### SPring-8 (Super Photon ring-8 GeV)



- 世界最高性能の放射光を生み出すことができる大型放射光施設(1997~)
  - 8GeVの電子シンクロトロン
  - 放射光:電子を光とほぼ等しい速度まで加速し、磁石によって 進行方向を曲げた時に発生する電磁波(シンクロトロン放射)

### LEPS (Laser Electron Photon Experiment at SPring-8)

- 最大2.4GeVのレーザー電子光ビームを用いた実験

   「レーザー・逆コンプトン光」:レーザー光線が電子ビームによって跳ね返された結果得られる高エネルギー光ビーム
- ハドロンの光生成の研究
   η中間子、φ中間子、Λ(1405)/Σ(1385)等
- 2003年、ペンタクォーク Θ⁺の発見で一躍有名に


ペンタクオーク Θ+?

- 2003年、クォーク4つと反クォーク1つから 構成されるペンタクォーク<sub>らしい</sub>Θ<sup>+</sup>(1530)が 発見される
- ペンタクォークはクォーク閉じ込めの全く 新しい形態
- 他の様々な実験グループが追試をした(している)が、現在のところペンタクォークΘ\*が存在するという確信には至っていない







## J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex)



- 世界最高クラスの陽子強度を誇る加速器施設(2007~)
  - 3GeV陽子シンクロトロン: MLF (Materials and Life Science Experimental Facility)での物質科学/生命化学研究
  - 50GeV陽子シンクロトロン:素粒子・原子核実験



- T2K (ニュートリノ振動実験)

   vをJ-PARCからスーパーカミオカン デ@神岡(距離295km)に打ち込む
   v<sub>µ</sub> → v<sub>e</sub>振動を見つけるのが主な 目的
- E14 (KOTO実験、CP破れ実験) -  $K^0_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ (CP対称性を破る)を探 す
- g-2 / EDM
  - ミューオンの異常磁気モーメント
  - 電気双極子モーメント の精密測定実験





## 様々な、ハドロン実験が実行・予定されている → J-PARCについての詳細は2日目(4-6コマ目)