

Incubate New Ideas

A great discovery could hatch in the future.

Incubate New Ideas A great discovery could hatch in the future.

東京大学素粒子物理国際研究センター創立50周年記念誌



研究の卵を3つか4つ温めておきなさい。
すぐに実現しなくとも、いつか可能性が出てくるかもしれない。
時々考えを巡らせておくよう。

これは、東京大学理学部小柴研究室が始まった1964年4月から、
先生が常に研究者と学生に言ってきた「教え」です。

Incubate New Ideas — A great discovery could hatch in the future.

——科学の未来をつくるアイデアの卵をより深く孵化させる情熱を持ち、
その無限の可能性をひらく。

ICEPP50年の感謝と決意を、この表紙タイトルに込めてお届けします。

CONTENTS

Incubate
New Ideas
A great discovery could
hatch in the future.

03

CHAPTER 1

ICEPP 半世紀の軌跡

04

小林富雄東京大学名誉教授インタビュー

「日本から飛び出し、先見性の高い実験を続けた50年」

06

DASP | 1972-1977

10

JADE | 1975-1986

14

OPAL | 1981-2000

18

ATLAS | 1991-

22

MEG・MEG II | 1995-

26

COLUMN ICEPP半世紀の歴史が生み出した成果の数々

27

CHAPTER 2

ICEPP の現在地

28

ICEPP 研究者座談会

「宇宙のしくみを解き明かしたい。ICEPP スピリットを胸に」

33

COLUMN ILC

34

ICEPP50周年によせて

37

CHAPTER 3

ICEPP と素粒子物理学実験の未来

38

センター長インタビュー

「より宇宙の真理に近づく新たな実験結果を得るために」

42

数字で見るICEPP

43

ICEPP の歩み

編集発行：東京大学素粒子物理国際研究センター創立50周年記念誌企画部会
取材協力：小林富雄
編集ディレクション：清水修（ACADEMIC GROOVE MOVEMENT）
取材・文：清水修、荒船良孝
撮影：貝塚純一
アートディレクション：細山田光宣
デザイン：松本歩、鈴木あづさ（細山田デザイン事務所）
印刷：株式会社ライブアートブックス

CHAPTER

1

- PAST
- PRESENT
- FUTURE

ICEPP 半世紀
の軌跡

50年前、東大の実験物理学者組織・理学部
附属高エネルギー物理学実験施設（HEPL）
はDASP実験開始とともに生まれました。以
来、一貫して海外の巨大加速器実験にコミ
ットし、素粒子物理学における国際共同研究
の雄として様々な成果を生み出してきました。
ICEPPの歴史はそのまま世界の大型科学（ビ
ッグサイエンス）の発展の軌跡でもあります。
第1章では組織設立初期から現在まで継承さ
れ続けるICEPPの研究の真髓をご紹介します。

日本から飛び出し、 先見性の高い 実験を続けた50年

Interview with Emeritus Professor
Tomio Kobayashi



PROFILE

1950年千葉県生まれ。東京工業大学卒業、東京大学大学院理学系研究科博士課程修了。理学博士。1977年東京大学理学部附属素粒子物理学国際協力施設助手、1986年理学部附属素粒子物理学国際センター助教授、1993年理学部附属素粒子物理学国際センター（翌年に素粒子物理学国際研究センター）教授となり、2015年3月定年退職。2013年度仁科記念賞などを受賞。グルーオンの発見やヒッグス粒子の発見、素粒子の世代数の決定、超対称性粒子探索などに貢献。1994年から2015年までCERN・LHC-ATLAS実験の日本共同代表者を務めた。

ICEPP誕生の秘話 日本初の 高エネルギー分野の 国際協力へ

第二次世界大戦後、日本は加速器が捨てられ、素粒子実験が禁止されていた時期がありました。ただ、1952年のサンフランシスコ講和条約が発効し、独立が回復すると、日本の大学でも加速器がつくられるようになりました。そして、日本でも高エネルギー素粒子実験を再開させようという機運が高まり、1971年に、高エネルギー物理学研

究所（現在の高エネルギー加速器研究機構：KEK）が設立されました。

KEKは陽子加速器をつくって研究をしようとしていましたが、当時、東京大学物理学教室の教授だった小柴昌俊先生は、電子・陽電子衝突実験に関心があり、海外の研究チームと連携する道を探っていました。

小柴先生はアメリカで研究していた

COLUMN

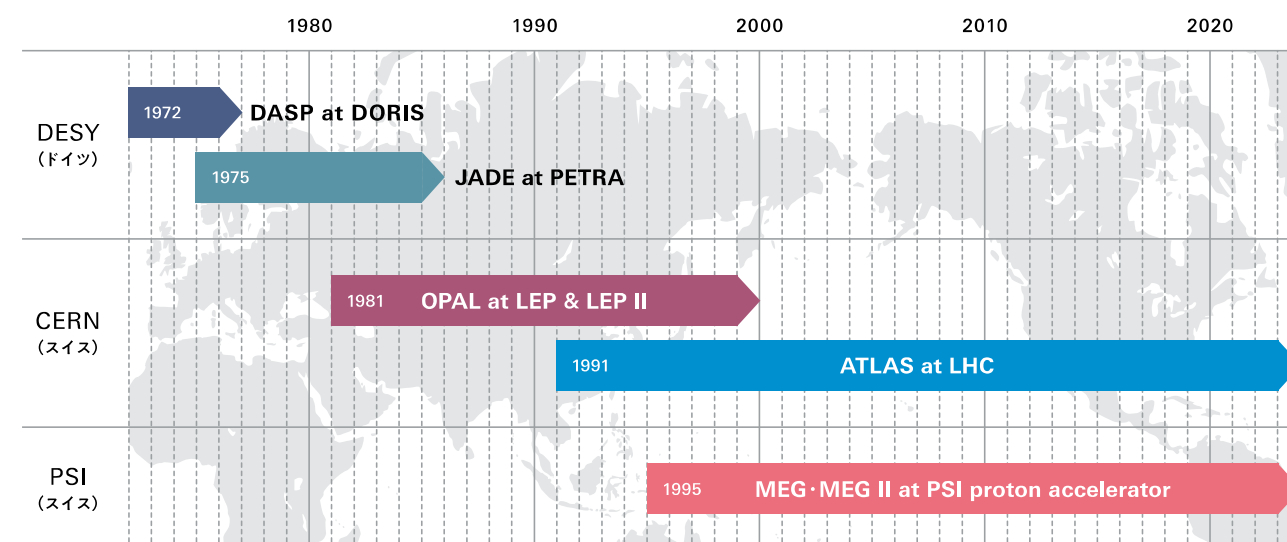
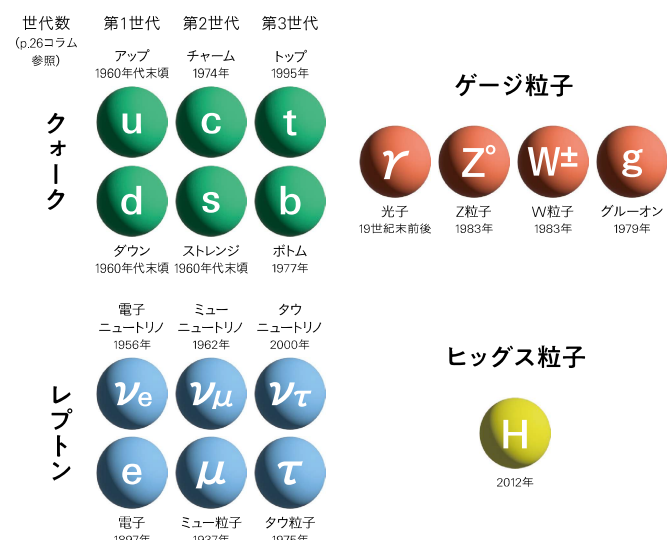
標準理論とは？

標準理論は、現代素粒子物理学を支える基本的な理論モデルです。ゲージ粒子と呼ばれる素粒子が、様々な素粒子の間に働く普遍的な力を媒介するのが特徴で、1970年代にその理論体系が形づくられました。

標準理論に登場する素粒子は、力を媒介するゲージ粒子のほか、物質をつくるのに関係するクォークとレプトン、そして、素粒子に質量を与えるヒッグス粒子に分類されます。ICEPPが発足する前は、標準理論に登場する素粒子のなかで、実際に発見されていたのは半分にも満たない状態でした。しかし、この50年間で、標準理論に登場する素粒子はすべて発見され、標準理論の正しさが裏づけられています。

同時に、標準理論の限界も見えてきました。ICEPPでは、標準理論を超えた新たな理論モデルを構築するために、ATLASやMEG IIなどの実験で、標準理論では説明できない現象や粒子を探索しています。

*それぞれの年は発見年
*ここでは、理論体系の中での広い意味の「発見」を意味しています。



Interview with
Emeritus Professor
Tomio Kobayashi

ときに知り合ったエーリヒ・ロールマンが理事を務めていたドイツ電子シンクロトロン研究所（DESY）の電子・陽電子衝突型加速器DORISで準備が進められていたDASP実験に、検出器の設計から加わることになりました。そして、その準備のために、1972年に戸塚洋二さん、山田作衛さん、須田英博さんをDESYに送り込んだのです。

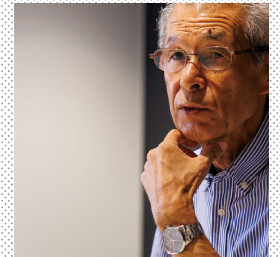
そして、DORISが完成した1974年に、東大グループがDASP実験に正式に参

加するために、理学部内に高エネルギー物理学実験施設を発足させました。日本からDASP実験に参加したのは、戸塚さん、山田さん、須田さんと、当時、DESYのスタッフとして働いていた折戸周治さんです。折戸さんは小柴研出身者で、1975年に東大理学部助教授となりました。小柴先生はドイツに常駐しませんでした。施設長としてチームの監督役をしていました。

幸運と大転換。
短期決戦の末、グルーオン大発見

実は、1974年は素粒子物理学の歴史の中でとても重要な年です。DASP実験が本格的な実験に向けて調整していた1974年11月に、先行していたアメリカのブルックヘブン国立研究所（BNL）の陽子加速器による実験と、スタンフォード線形加速器センター（SLAC）の電子・陽電子加速器の実験でJ/ψ（ジ

エイ・ブサイ）中間子が発見されました。J/ψ中間子は、当時発見されていなかった4番目のクォークであるチャームクォークと、その反粒子の反チャームクォークが結合した粒子であることがわかりました。この発見は、「素粒子物理学の11月革命」と呼ばれています。これ以降、素粒子の標準理論を形成する素粒子がいくつも発見されることになるのです。我々にとっても、この11月革命は幸運を呼び込むひとつの転換



DASP 1972-1977

DASP東大チーム

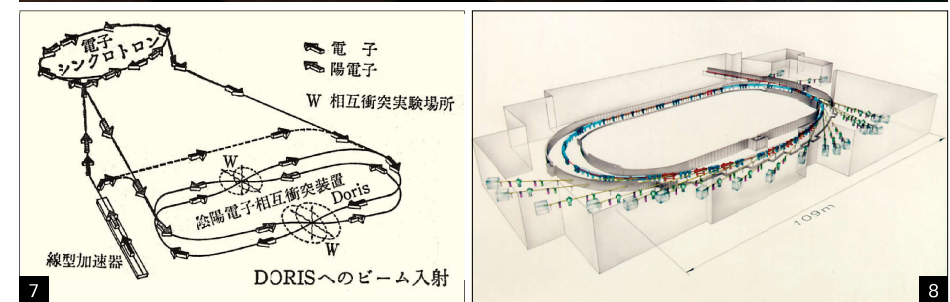
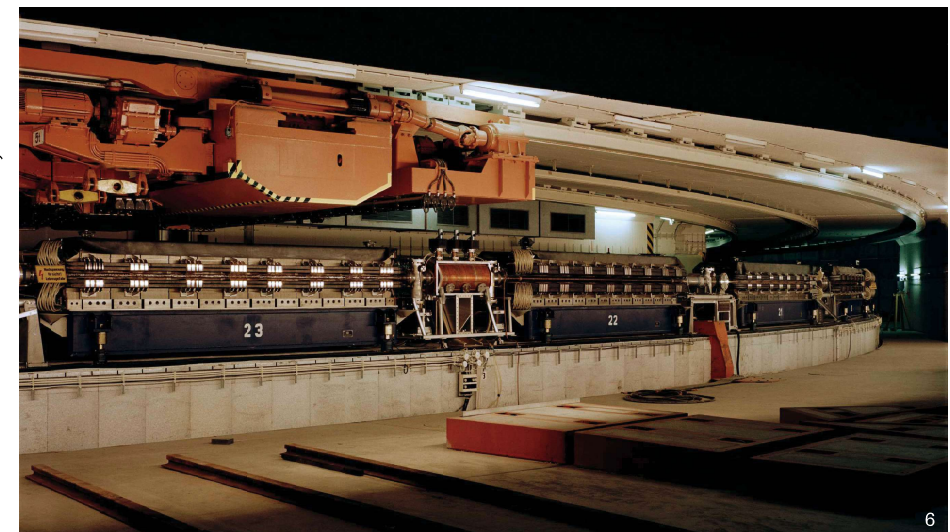
小柴昌俊、山田作衛、戸塚洋二、
須田英博、折戸周治



1. ICEPPが国際共同実験の最初の地を選んだ、ハンブルク市内にあるDESY（Deutsches Elektronen-Synchrotron）の航空写真（1963年）。加速器リング（中央）の建設は完了したが、研究者のための建物はまだ建設中であった。 2. 理学部附属高エネルギー物理学実験施設長 小柴昌俊教授（当時）。小柴施設長の国際的な人脈は日本の物理に国際化という「幸運」をもたらした。 3. 当時のDESY副所長エーリヒ・ロールマン教授、小柴施設長のシカゴ大学在職時代の友人。 4. 当時のDESY所長ヴォルフガング・バウル教授、1989年ノーベル物理学賞を受賞。 5. DASP実験代表者ビョルン・ウィーク教授、1993年よりDESY所長、HERAプロジェクトリーダーとしても有名。



6. 1964年、稼働直前のDESYシンクロトロン内部の様子。
7. 8. 1974年に建設されたDORIS概略図。その周長は289m、当時の衝突エネルギーは3.5GeV。1978年に4.45GeVに増強し、後のDORIS IIIでは放射光専用光源として稼働したが、2013年1月2日に閉鎖。



1972

小林・益川理論
クォークが6種類あると予想
DESYとの国際共同研究を提案

1974

理学部附属高エネルギー
物理学実験施設を創設
DASP実験開始

1974

J/ψ中間子発見
素粒子物理学の11月革命
(SLAC・BNL)

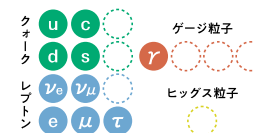


1975

Pc発見
(DASP at DORIS)

1975

タウ粒子発見
(SLAC)



Interview with
Emeritus Professor
Tomio Kobayashi

点でした。

J/ ψ 中間子が発見されたことで、DASPグループはすぐに追実験へと動き出しました。そして、1975年に発見したのがPcです。折戸さんは、この解析で大きく貢献しました。J/ ψ 中間子にエネルギーを与えて励起すると、 ψ' （サイプライム）中間子になりますがすぐに崩壊して、いくつかの中間状態を経て、J/ ψ 中間子に戻ります。Pcはその中間状態の1つです。他のものは

すべてアメリカのグループに発見されてしまいましたが、DASPグループが一矢報いた形になりました。

1977年、素粒子物理学国際協力施設に改組されました。この年に、27GeVの電子・陽電子衝突型加速器PETRAが完成し、翌年、この加速器で東大チームも参加したJADE実験がスタートしました。PETRAの主なターゲットは第3世代のクォークであるトップクォークでした。当時、東大の助手だった

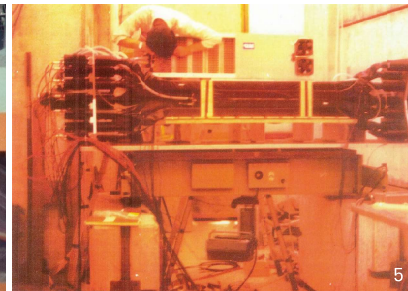
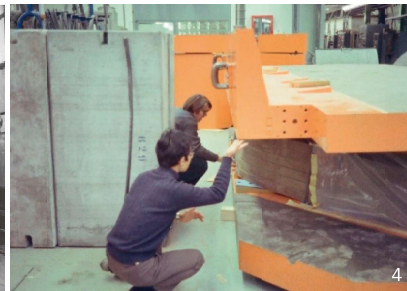
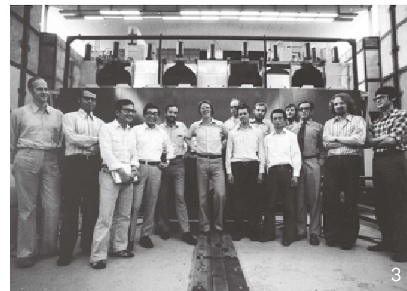
2つの電磁石スペクトロメータに挟まれ、電子・陽電子衝突領域に近い位置にある内部検出器。これは大きな立体角を覆い、荷電粒子の数を測定するとともに、特に光子の方向とエネルギーを精度良く識別する装置であった。この精度の良さは、外部検出器による運動量精密測定とともにDASP実験の大きな特徴で、これにより研究成果につながった。



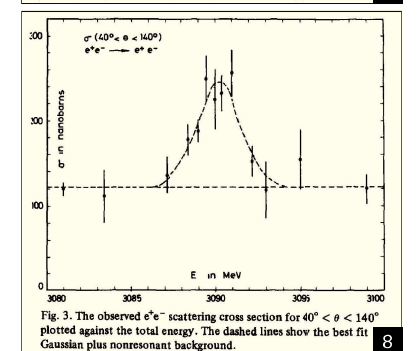
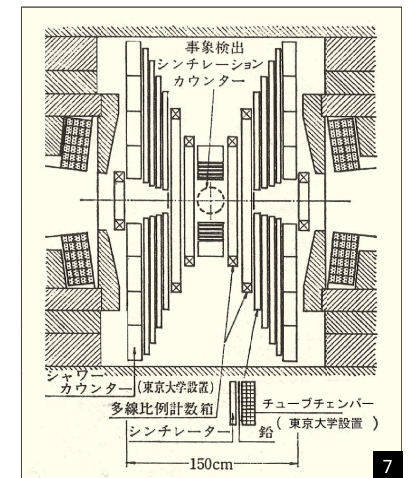
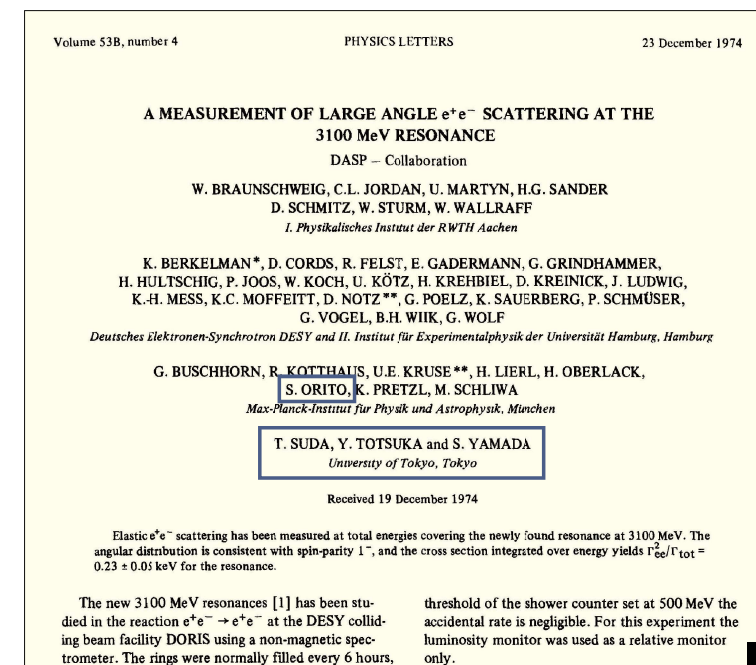
DASP 1972-1977



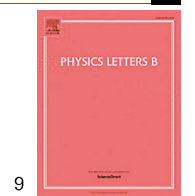
1. 4. 無名であった東大グループが高い研究力で国際貢献を果たしていく。助教授1名、助手2名、物理学教室の助手1名がDESYに常駐。 2. 光子放出角測定の精度をあげた比例係数管箱 (tube chamber) は、東大グループがDESYで開発製作。約8,000本の比例計数管からなる。 3. DASPコラボレーション。 5. DESY-F35グループとともに内部検出器の建設を担当。特に、シャワーカウンター32台は東大の予算で建設された。



11月革命がもたらした変転。
それは巨大な可能性を示す兆しだった。



米国SLACとBNLでのJ/ ψ 中間子（11月革命）発見後に、DORISのエネルギーを変えて行ったDASPグループの追実験などにより、チャームクォークでできた粒子であることが確定した。 6. DASPグループの最初の論文として発表。当時マックスプランク研究所にいた折戸、東大の須田、戸塚、山田がオーサーとして名を連ねた。 7. 実験装置の概要図。 8. DASPでも3090MeV付近に共鳴状態J/ ψ を確認し、そのスピン・パリティと崩壊幅を測定して、チャーム粒子である確証を高めた。 9. ジャーナル表紙（Physics Letter B, Volume 53, Issue 4 (1974) 393-396)



Interview with
Emeritus Professor
Tomio Kobayashi

私もJADE実験に参加し、3,000本の鉛
ガラスシャワーカウンターを製作しま
した。

JADE実験では、狙っていたトップ
クォークを観測することはできません
でした。でも、ゲージ粒子の1つであ
るグルーオンの発見に成功したのです。
観測した信号の中に、3本のジェット
が広がるものがありました。

グルーオンはクォークを結合する強
い力を媒介する粒子です。量子色力学

(QCD) によると、エネルギーの高い
クォークはグルーオンを放出します。
3本のジェットが発生したのは、電子
と陽電子の衝突によってクォークと反
クォークが対生成されたときに、クォ
ークまたは反クォークからグルーオン
が放出されたためです。このような信
号をいくつも解析し、この現象がQCD
と一致することがわかりました。1979
年の国際会議で、JADEグループを含め、
PETRAで実験をおこなっていた4つの

グループがそれぞれ独立にグルーオン
発見を報告したことで、グルーオンの
存在は確定的となりました (p.26コラム
参照)。

鉛ガラスシャワーカウンター
1万本でOPAL実験に挑む

1980年になると、電子・陽電子衝突
実験はとても強力な研究手法であるこ
とを世界中の研究者が理解してきまし
た。DESYでもよりエネルギーの高い

加速器の建設を検討していましたが、
規模が大きくなるために舞台を欧州原
子核研究機構 (CERN) に移すことと
なり、電子・陽電子衝突型加速器LEP
が建設されることが決まりました。

それに伴い、東大グループもCERN
に行き、OPAL実験の提案をしました。
東大グループは、既にDASP実験、
JADE実験で実績を挙げていたので、
提案は受け入れられ、LEPの建設が始
まると、OPAL検出器の建設に取りか



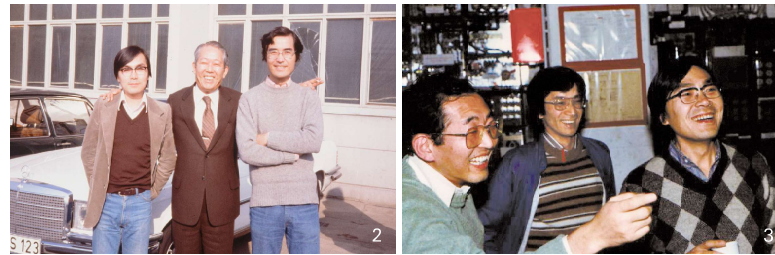
JADE 1975-1986

JADE東大チーム

小柴昌俊、山田作衛、戸塚洋二、須田英博、折戸周治、小林富雄、
駒宮幸男、武田廣、井森正敏、蓑輪眞、佐藤朝男、渡邊靖志、柳沢千明

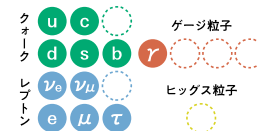


1. PETRA (Positronen ElektronenTandem Ring Anlage) は、DESYの敷地面積のほぼ全体を占める周長
2.3kmの加速器で、当初のビームエネルギーは19GeV
で計画された。 2. 3. 東大グループは、DESY、ハン
ブルク大学、ハイデルベルク大学、マンチェスター大学、
ランカスター大学、ラザフォード研究所とJADE (Japan,
Deutschland, and England) コラボレーションを結成。
4. 中心的な指導者として実験全体を牽引した折戸教授
(当時)。5. 2009年のJADEミーティング。山田名誉教授、
武田教授、小林教授、駒宮教授、川本准教授 (いずれも
当時)、ロルフ・ホイヤー博士、アルブレヒト・ワグナ
ー博士など、錚々たる顔ぶれが集う。

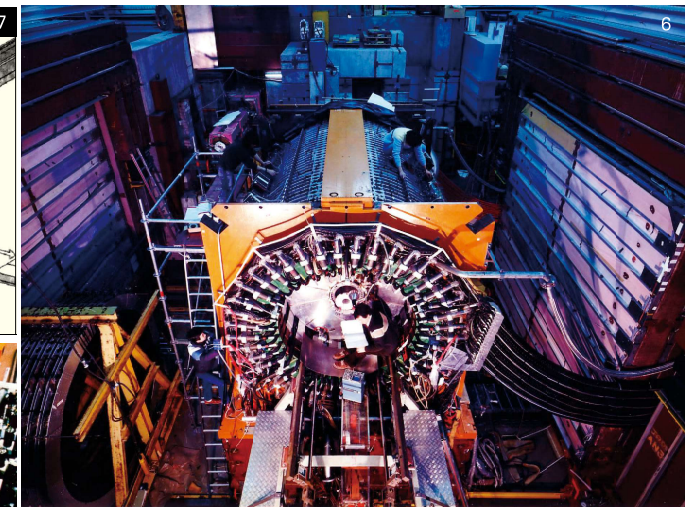
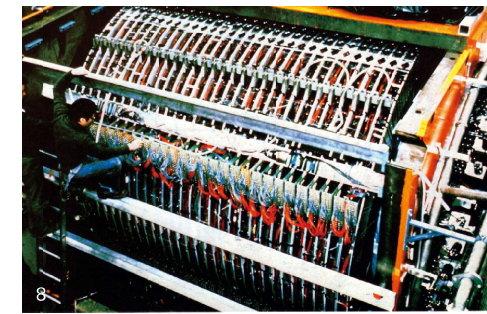
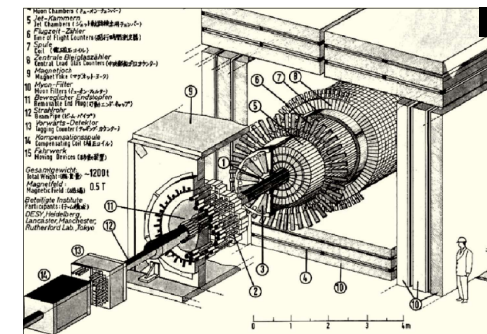


1977

ボトムクォーク発見
(Fermilab)



その日、私たちは3本のジェットを見た。
紛れもなくグルーオンの存在を示す証だった。



6. 7. JADE検出器とその概要図。ソレノイドコイルを用いた大立体角汎用測定器で、
あらゆる興味深い物理現象を逃さずとらえるように設計された。また、DESY 計算セ
ンターと互換性のある大型計算機を東大に設置した。 8. 東大グループが主として
担当した、鉛ガラス電磁シャワー測定器。この鉛ガラスカウンターは高性能で長期間
安定して動作し、中央飛跡検出器とともに物理解析の中心的役割を果たした。

1977

理学部附属素粒子物理学
国際協力施設に改組
JADE検出器建設

1978

PETRA加速器完成

1979

JADE実験開始

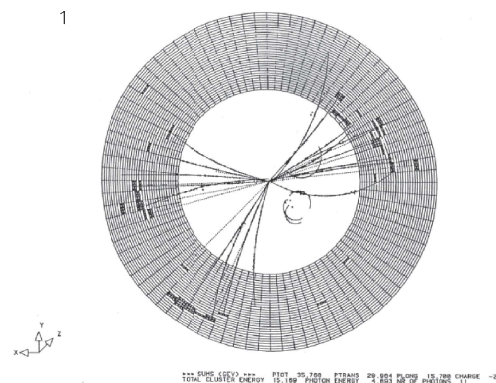
Interview with
Emeritus Professor
Tomio Kobayashi

かりました。OPAL実験では折戸さんがリーダーシップを取り、実験をリードしていきました。

OPAL検出器では、鉛ガラスシャワーカウンターの1万本に増やし、より精度の高い観測をしています。また、CERNに東大チーム専用のコンピュータを持ちこんで、解析の質も高めました。その結果、CERNの陽子・反陽子衝突加速器で発見され、米国SLACの線形衝突加速器SLCでも生成が確認さ

れたばかりのZ粒子を大量につくり、精密に測定することができました。Z粒子は、LEPで加速された電子と陽電子が衝突することで行われ、すぐに崩壊します。OPAL検出器では、Z粒子が崩壊した後にできた粒子と反粒子のペアをすべて観測しました。Z粒子が崩壊するとすべての種類のクォークとレプトン、そしてそれぞれの粒子の反粒子が発生します。その中にはニュートリノと反ニュートリノも含まれます。

JADE 1975-1986



Special EPS High Energy & Particle Physics Prize
The Executive Committee of EPS, in agreement with the Chairman of the EPS High Energy and Particle Physics (HEPP) Division, has awarded a special complementary Prize to:
The JADE Collaboration, Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY), Hamburg
The MARK J Collaboration, DESY
The PLUTO Collaboration, DESY
The TASSO Collaboration, DESY
each responsible for one of the four detectors initially installed at DESY's PETRA storage ring.
While the 1995 HEPP Prize is in recognition of the observation of three-jet events representing a first indication of the existence of the gluon, confirmation of the existence of this important fundamental particle emerged gradually in several independent ways from data obtained by the four Collaborations, all of which presented results for gluon bremsstrahlung in August 1979 at the Lepton-Photon Conference (Batavia, IL, USA). Confirming the existence of the gluon, the carrier particle for the strong interaction, was of fundamental importance for the Standard Model of particle physics. In view of this, and because the HEPP Prize can only be awarded to nominated individuals, the special Prize supplements the 1995 HEPP Prize by recognizing the Collaborations' achievements.
The Prize was announced by the Chairman of the HEPP Division at the 1995 International European Conference on High Energy Physics (Brussels, 27 July - 2 August 1995) and has been communicated to the Spokesperson for each of the Collaborations (U. Timm for JADE, S.C. Ting for MARK-J, R. Felst for PLUTO, and G. Wolf for TASSO) and to those who presented the Collaborations' findings at the 1979 Lepton-Photon Conference (S. Orto for JADE, H.B. Newman for MARK-J, Ch. Berger for PLUTO, and G. Wolf for TASSO).

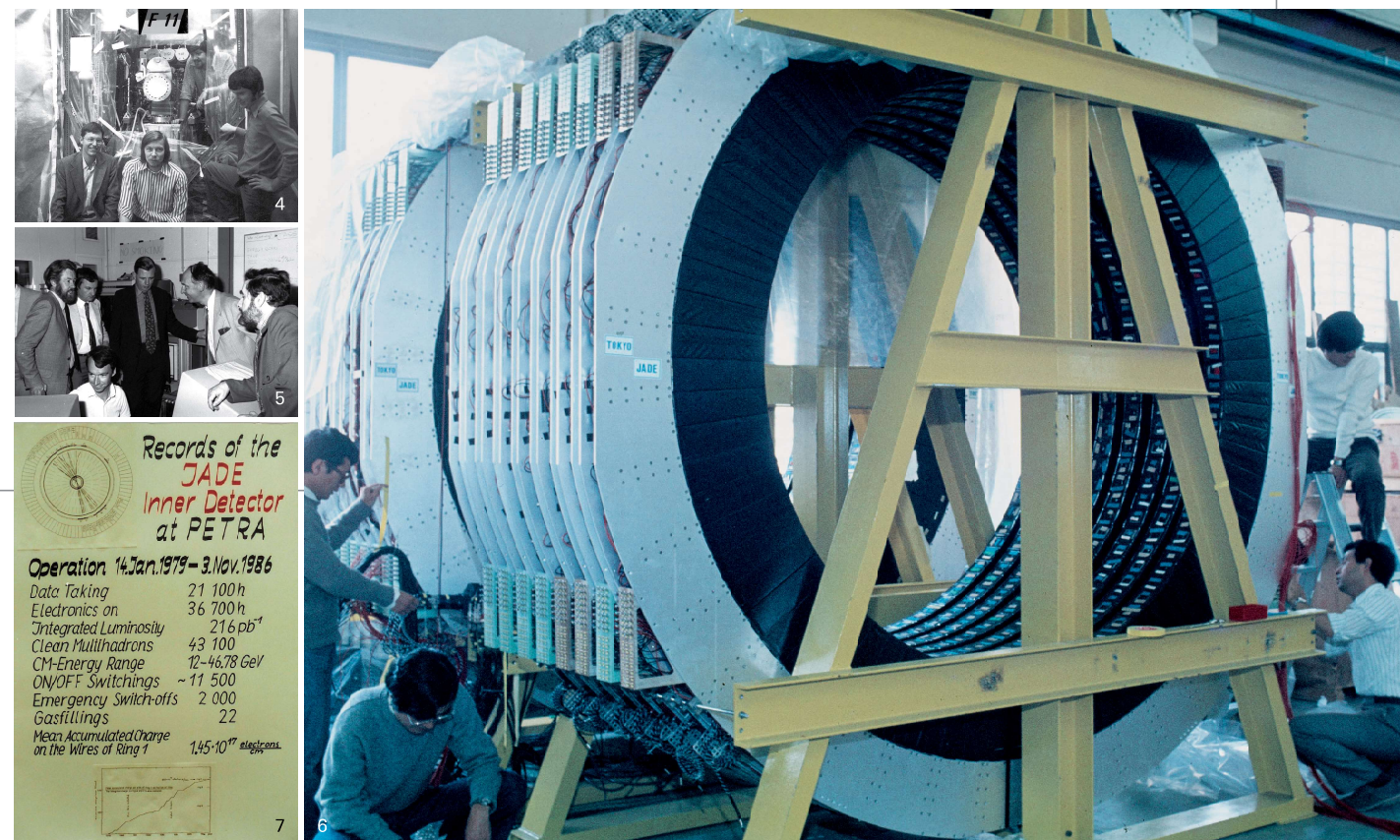
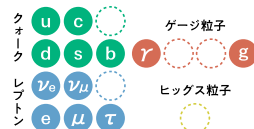
1. JADEが観測した事象の例。円の中心で起こった電子・陽電子衝突から、3本の粒子の束(ジェット)が飛び出している。 2. 1979年8月に開催された International Symposium on Lepton and Photon Interactions at High Energiesで、JADEを代表して折戸元センター長がグルーオンの発見を発表した。その後、1995年7月に欧州物理学会執行委員会より、JADE、MARK-J、PLUTO、TASSOの各国際共同実験グループに特別賞が贈られた。この4グループはそれぞれ独立にグルーオンの存在を証明した。写真は受賞特集したEPS学会誌。 3. 発見を祝うシャンパンパーティ。

1976

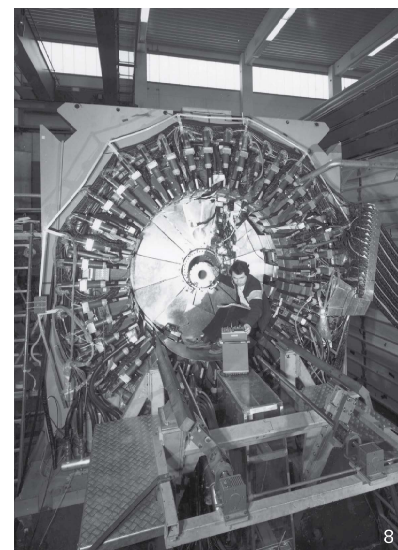
JADEコラボレーションを結成

1979

グルーオン発見
(JADE at PETRA)



JADE実験は東大グループが初めて体験する規模の国際共同研究となり、国籍に関係なく研究者・大学院生が一体となって、実験に向き合った。「大学院修士課程の学生に本格的実験のトレーニングをする機会を与えたい」という小柴施設長の教育方針がついに実現した。 4-6. 次代の国際共同実験に続く、研究者間の強い協力関係を構築。後にCERN所長となるロルフ・ホイヤー博士も参加(写真4の中央)。 7 研究者らが集う場所には内部検出器の運転レコードが掲げられた。



8. 「日本の税金から研究資金が出ている以上は日本の製品を使いたい。」という小柴施設長の思いがあり、浜松テレビ(現在の浜松ホトニクス)に白羽の矢が立った。試作のうえ要求レベルに達した3,000本の光電子増倍管は性能と信頼性の両面で優れ、各国の物理学者に同社の名が知れ渡った。 9. 当時の実験ノート(ログブック)。

The program should be modified.
19th Made current strip.
19th NSD giving 'busy' ck. - Reloaded - OK.
2nd 32ms error (44 infer 704). Olson alters DES - 32ms error 46. The 1's are 0's and vice versa. ~~Olson corrects error~~
22nd Try to start run. It gets automatically terminated after 2 events. Call Eschler. Run is successfully started again at 22nd. (microprocessor program had to be reloaded)
23rd Look at DETC histogram shows a whole crate missing. Wagner phones (luckily) and says that this happened 2 days ago - he suggests it is the cable to the computer (and contact). We stop the run to try this. Crate controller's 502 exchanged.
23rd We start taking data again - still hot in wave map - Wagner comes.
02/08/81
02/08/81 Meier and Konami on shift
01st Search for CHA: over still gets on, equals ratios
20th After 12th hours of ghost chasing (or wild goose chasing) we finally, thanks to an enlightening remark by read out expert Dr. RAE, trace the problem to, no response in plot 208 of crate 3, channel 5. (JE.O + AW)
New fill requested
25th New filling is ready.
DL8 unit 10-108 Missing. Knocked the front panel by screwdriver.
→ seems to be OK.
800 Eschler + Bill (yes again) on shift - Beams demand.
828 New fill.
833 Again error 44 subunit 703. 3x in a row followed by jet light current part 45
837 jet light current. 1D off. 3P - current fluctuating
838 adjust (lower) LG - thresholds
839 Mean chamber 44 singles rate 100 x higher than average. Call A. Bill. We will come in later.
1100

Interview with
Emeritus Professor
Tomio Kobayashi

電荷を持たず、強い力とも反応しないニュートリノは検出器をすり抜けてしまい、観測することができません。しかし、OPAL検出器では、ニュートリノ以外のすべてのクォーク、レプトンのペアを観測できます。そこで、観測結果から足りない部分を求めることで、観測できないニュートリノが何種類あるのかを割り出すことができます。その結果、ニュートリノが3種類あると結論づけました。

OPAL実験では、合計400万個のZ粒子をつくり、その崩壊過程をとらえることで、素粒子の標準理論の精密な検証ができました。OPAL実験での測定結果はすべて標準理論で説明がつき、その正しさを補強していったのです。この実験の目的の1つであったトップクォークの発見はできませんでしたが、Z粒子の精密測定からトップクォークの質量を予測しました (p.17図3、p.26コラム参照)。

トップクォークは、結局、1994年にアメリカのフェルミ国立研究所の研究グループが発見したと発表がありました。当時、彼らはトップクォークを1～2回観測しただけで発表と言いましたが、それは質量がOPAL実験での予測の範囲内に入っていたからです。

当然、その段階では疑う人も多かったのですが、実験を重ねた結果、最初の発表が正しかったことが証明されました。これで、標準理論に登場する素

粒子の中で発見されていないのはヒッグス粒子だけになりました。

現在の物理学では、宇宙には、重力、電磁気力、強い力(核力)、弱い力の4つの力が働いていると考えています。素粒子の標準理論は、この4つの力のうち、重力以外の3つの力を扱っています。しかし、標準理論だけではこの3つの力を統一的に扱うことができません。

でも、新たな対称性(超対称性)を



鉛ガラスにはOPALのロゴが刻まれており、かなりの重量がある。

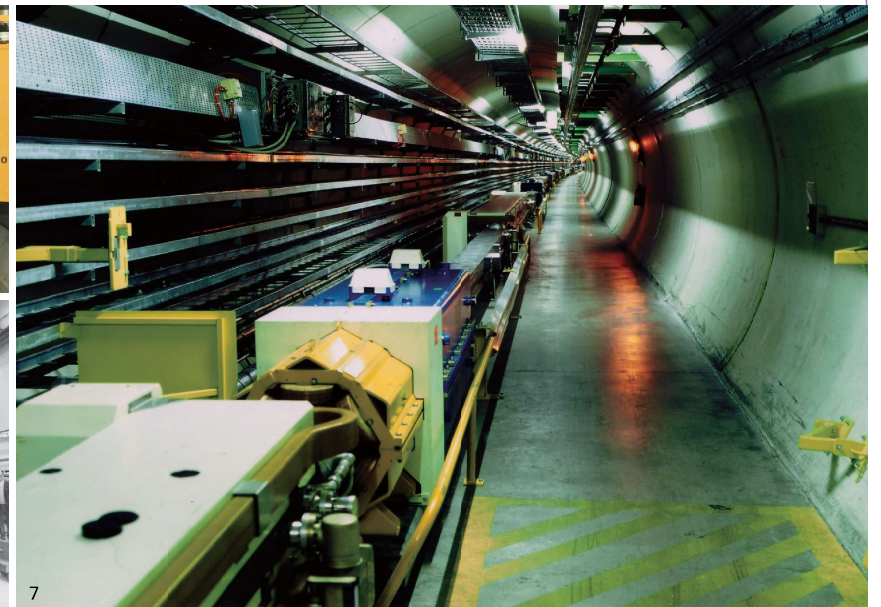
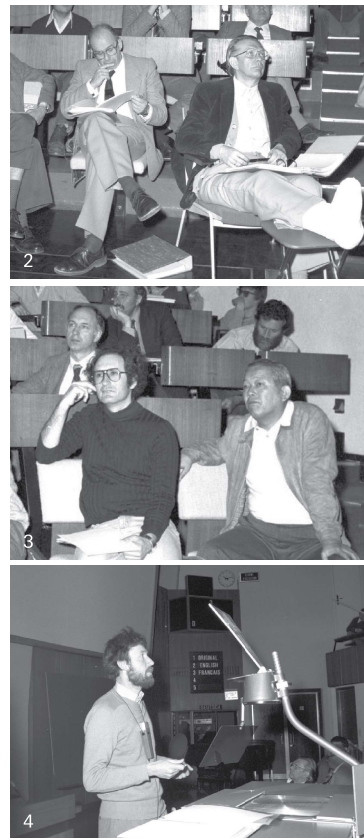
OPAL 1981-2000

OPAL東大チーム

小柴昌俊、折戸周治、小林富雄、駒宮幸男、浅井祥仁、森俊則、川越清以、川本辰男、武田廣、養輪眞、野崎光昭、竹下徹、真下哲郎、井森正敏、福永力、佐々木真人、森井政宏、三原智、中村勇、佐伯学行、桑野満博、山下了、塚本敏夫、山下博



1. スイスとフランスの国境に位置するCERN。世界最高エネルギーの電子・陽電子コライダー実験に挑むため、研究の舞台を移す。1982年3月24～25日、LEP加速器の実験候補に関する最初のプレゼンテーションが行われ、CERN講堂は満席となった。候補となった4実験は、ALEPH、DELPHI、L3、OPAL。
2. 当時のCERN所長 ヘルヴィッヒ・ショッパー博士(写真右)。 3. 理学部附属素粒子物理学国際協力施設長 小柴昌俊教授(当時、写真右) 4. 共同研究者アルブレヒト・ワグナー博士。



5. OPAL (Omni-Purpose Apparatus at LEP) を指揮した折戸教授(当時)は1971年にCERNへ渡航。政府の理解促進にも尽力した。6. OPALの共同研究には、世界9カ国34の機関から300人以上の物理学者が参加した。東京大学はその中心的研究機関。後に神戸大学も加わった。 7. LEPの地下トンネル。LEPはZ⁰粒子を、加速器のエネルギーを約2倍に増強したLEP IIはW粒子を直接生成した。 8. カルロ・ルビア教授(1984年ノーベル物理学賞、後にCERN所長)。折戸教授はCERNのISR実験で、彼から高い評価を得ていた。 9. LEP IIから導入された超伝導加速空洞。



1982

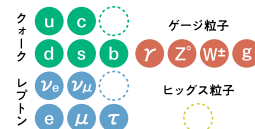
OPALコラボレーションを結成

1982

LEP加速器建設

1983

W粒子・Z粒子発見
(CERN)



1984

OPAL検出器建設

1984

理学部附属素粒子物理学
国際センターに改組

1989

OPAL実験開始

1989

素粒子は3世代と決定
(OPAL at LEP)

Interview with
Emeritus Professor
Tomio Kobayashi

導入して、標準理論に登場する素粒子のそれぞれに新たなパートナーがいると仮定すると、3つの力を統一することができるとわかりました。OPAL実験では超対称粒子の探索も重要な目的の1つとしておこないました。

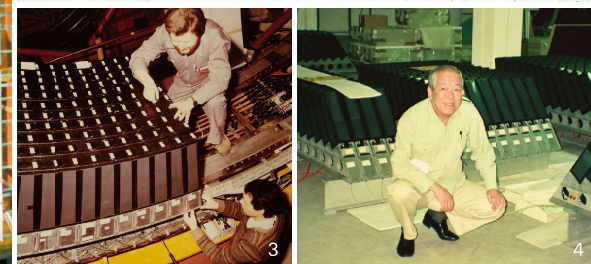
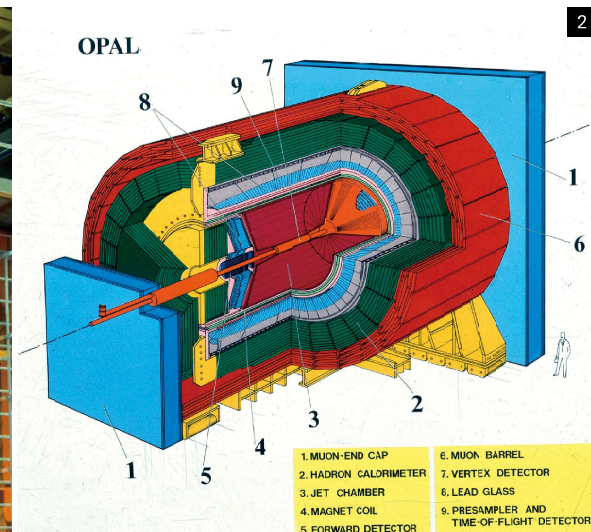
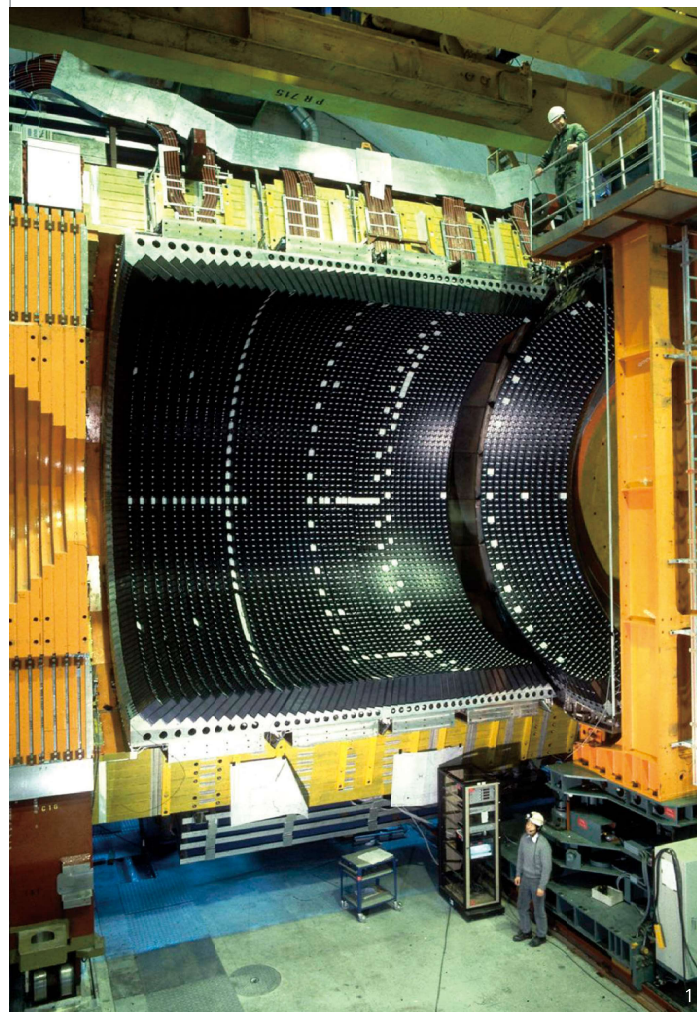
さらに、1995年からは加速器のエネルギーを増強したLEP IIの運転が始まり、LEP II-OPAL実験に変わりました。この実験では、弱い力を媒介する粒子の1つであるW粒子をつくり、精密に

測定しました。その結果、W粒子の生成過程が標準理論とよく一致することが確認できたのです。また、新たに測定されたWとトップクォークの質量から、ヒッグス粒子の質量を計算し、129GeVという予想を出しました。実際にLHCで発見されたヒッグス粒子の質量は126GeVだったので、もし、LEP IIのエネルギーを1割ほど高く設計していたら、ヒッグス粒子はLEP IIのOPAL実験で発見していたかもしれません。

LEP加速器に設置された直径約12m、長さ約12mの円筒形のOPAL検出器。電子・陽電子衝突反応で生成された粒子を検出し、その種類、エネルギー、方向などを精度良く測定した。

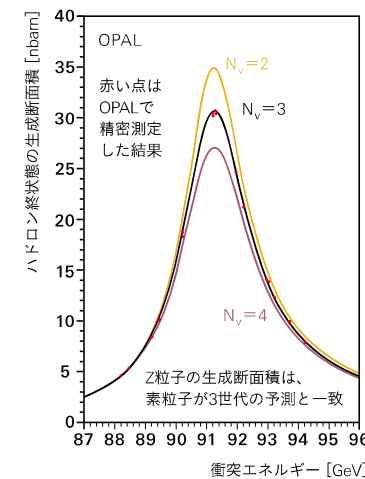


OPAL 1981-2000



1. OPAL検出器のうち最重要部分の1つである、電磁シャワーカロリメーター。東大グループが担当した。約1万本の鉛ガラスカウンターからなり、その設計・製作・調整・設置には5年を要し、1989年7月に実験準備が整った。JADE実験の経験を十分に活かして改良を加え、全数の鉛ガラスカウンターは2000年末の運転終了に至るまで高性能を保ち続けた。
2. 概略図。
3. 共同研究者と鉛ガラスカウンターを設置する小林助教授（当時）。
4. 鉛ガラスカウンターの作製を監督する小柴センター長（当時）。

図1：素粒子の世代数を3と決定



OPALロゴ
宝石のオパールに似た斬新な配色とレタリングが特徴的。数多くの研究成果にもロゴが掲載されている（図1,3,4はp26コラム参照）。

図2：ヒッグス粒子の質量領域の限定

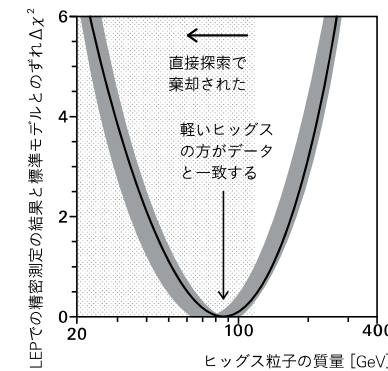


図3：トップクォークの質量

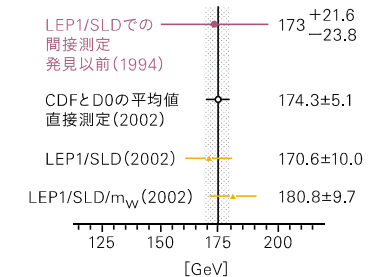
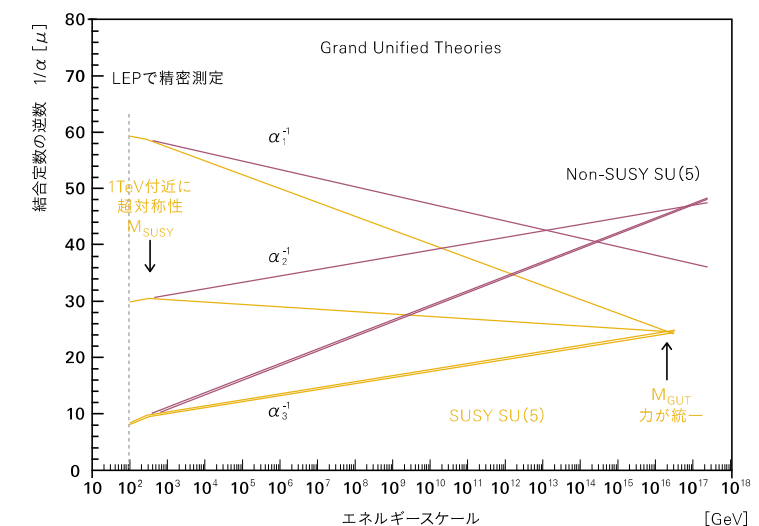


図4：力の大統一の可能性(超対称性を示唆)



写真・概要図すべて ©CERN

Interview with
Emeritus Professor
Tomio Kobayashi

ATLAS実験で
ヒッグス粒子を発見

高エネルギー加速器による素粒子の実験は、時代が進むごとに規模が大きくなっています。そのため、1990年代あたりから、1つの計画が始まったらその次の計画を考えるようになってきました。CERNでは、LEPが動き出したら、陽子同士を衝突させるハドロン衝突型加速器をつくる予定が決まって

いました。

そのため、1991年にCERN理事会で大型ハドロン衝突型加速器（LHC）計画が承認されました。私は、1992年にLHCを使って実験をするATLASグループが結成されるときに誘いを受けて、実験内容を検討する段階から参加しました。

ICEPPは小柴先生の時代から、電子・陽電子衝突実験にずっと取り組んできました。そのため、陽子を衝突さ

せるLHCの実験には、ほとんどの人が懐疑的でした。ICEPPとしては、日本で電子と陽電子を衝突させる日本リニアコライダー（JLC）計画を立ち上げていたので、その方向で進んでいました。

私は、LHCに誘われたときはとても悩みましたが、CERNがLHCに舵を切ったことの重要性を感じ、ATLAS実験に参加することを決めました。ICEPPからは私がメインに関わり、井森正敏

さんも手伝ってくれ、神戸大学のグループも参加してくれました。

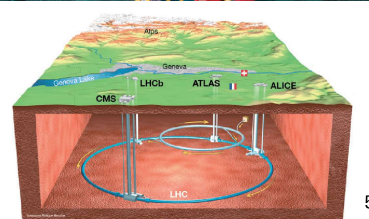
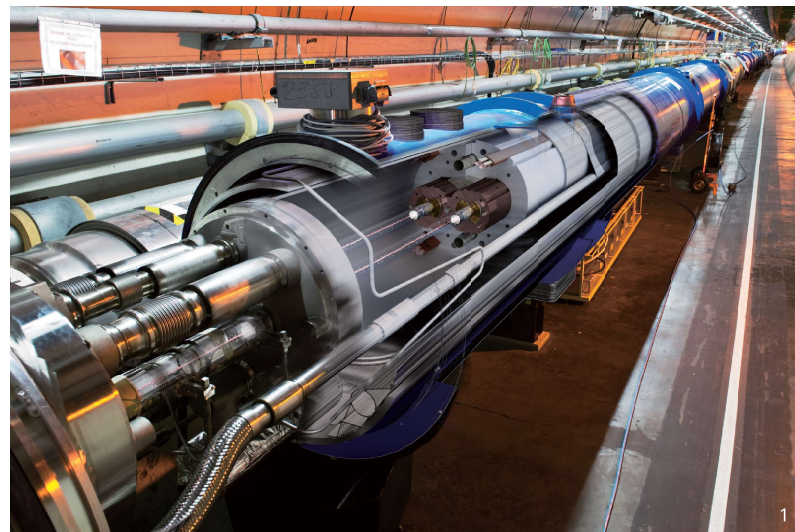
1993年にアメリカの超伝導超大型衝突型加速器（SSC）計画の中止が決まると、そこに関わっていた日本人研究者の一部がATLAS実験に合流し、1994年にATLAS日本グループが発足しました。さらに、1995年には日本はLHC建設に協力することを発表しました。ヨーロッパのメンバー国以外でCERNのプロジェクトに貢献するのは日本が初



ATLAS 1991-

ATLAS東大チーム

小林富雄、浅井祥仁、坂本宏、川本辰男、井森正敏、石野雅也、田中純一、寺師弘二、奥村恭幸、澤田龍、真下哲郎、上田郁夫、金谷奈央子、増淵達也、江成祐二、中村浩二、齋藤智之、齋藤真彦、野辺拓也、飯山悠太郎、陳詩遠、山本真平、津野総司、松永浩之、磯部忠昭、中村智昭、岸本巴、森永真央、片岡洋介、兼田充、山村大樹、織田勤、山中隆志、塙慶太、Sanmay Ganguly、加地俊瑛、松井長隆、森下可奈子



1. LEPの巨大なトンネルを利用し、陽子と陽子を衝突させる革新的なLHC加速器。 2. 非加盟国のなかでは日本が最も早くLHCへの参加協力を表明。1995年6月に文部大臣がCERN理事会に出席し、建設協力を発表した。 3. 2008年10月21日にCERNで開かれたLHC完成式典。 4. 地下100mのATLAS実験ホールを建設するためのエンジニアによる測定。 5. 周長27kmのLHCには、ATLAS, CMS, LHCb, ALICEの4実験の検出器を衝突点に設置している。

1992

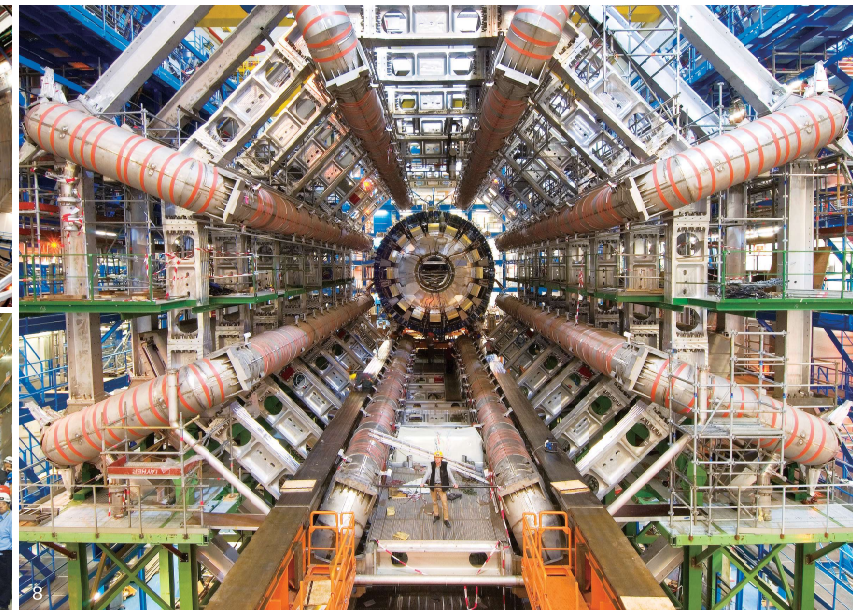
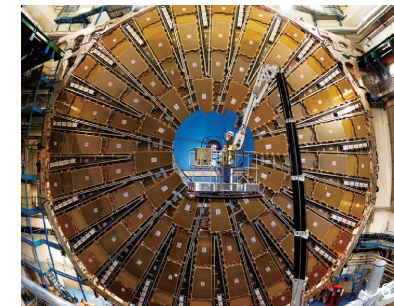
ATLASコラボレーションを結成

1994

素粒子物理国際研究センターに改組
文部省の全国共同利用施設に認定

1994

ATLAS日本グループを結成

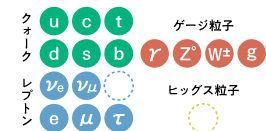


6. 7. ATLASの最外層に設置されているミュオン検出器は、川本准教授と石野助教（当時）が、イスラエルとパキスタンの共同研究者を主導し、TGC、エレクトロニクス、サービス一式を組み上げた。 8. 全長46m、直径25m、重さ約7000t、1億チャンネルのセンサーが組み込まれたATLAS検出器。
【ATLAS日本グループ共同代表者（歴代）】 9. 小林富雄（1994-2015） 10. 浅井祥仁（2015-2021） 11. 石野雅也（2021-2024） 12. 田中純一（2024-）



1995

トップクォーク発見
(Fermilab)



1996

ATLAS検出器建設

2000

LHC加速器建設

Interview with
Emeritus Professor
Tomio Kobayashi

めでで、とても異例なことです。CERNからすれば、それだけ日本の技術が欲しかったともいえます。

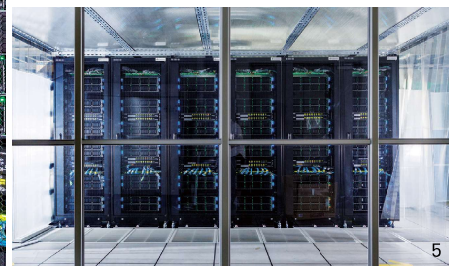
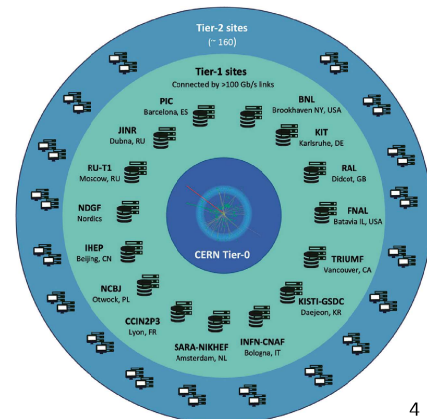
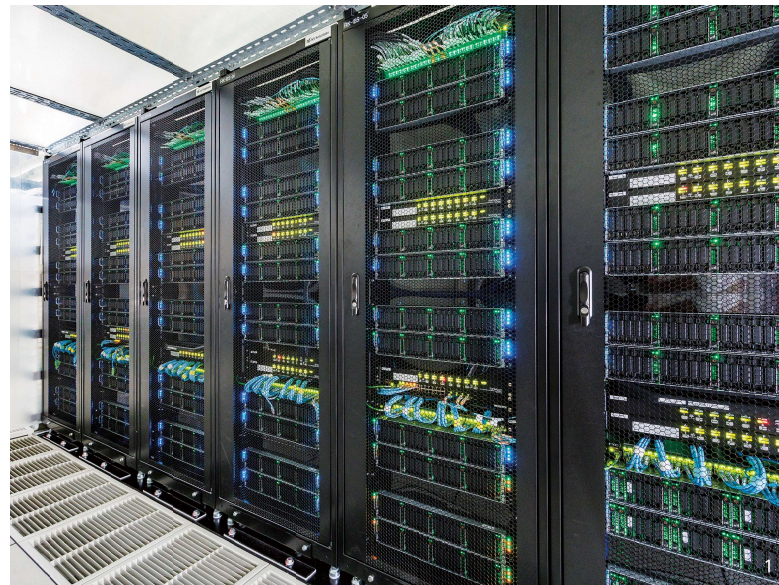
ATLAS実験は世界中から3,000人もの研究者が集まって取り組む大型の共同研究で、日本グループだけでも100人以上参加しました。そのため、私たちの研究スタイルも変化していきました。

それまでのDASP、JADE、OPALではICEPPチームが検出器の主要部分を

担当してきました。日本から十数人の研究者を現地に派遣し、DESYやCERNの技術スタッフと人間関係を構築しながら、一緒にいろいろな機器をつくることで、たくさんの成果をあげることができました。

しかし、ATLASはCERNにとっても手に余るほど大きな計画なので、日本グループを助ける余裕はありません。日本グループの担当分は、基本的にグループ内でつくることになりました。

ATLAS 1991-

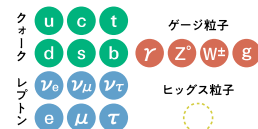


1. 5. ATLAS実験で取得した大量のデータを解析するための日本の拠点「ATLAS地域解析センター」。 2. 1990年代に提唱された最新のグリッド技術を世界規模で実用化したCERNのWLCG (Worldwide LHC Computer Grid)。その中核にあるCERN Control Center。 3. 2006年8月16日、小宮山宏東大総長(当時)はCERNでWLCG覚書を締結。 4. WLCGの階層システムの概要図。CERNのTier-0サイト(図の中心部)からTier-1、Tier-2の階層構造を持ち、それぞれ異なる役割を果たす。ICEPPはTier-2サイトを分担し、世界屈指の実績をあげている。



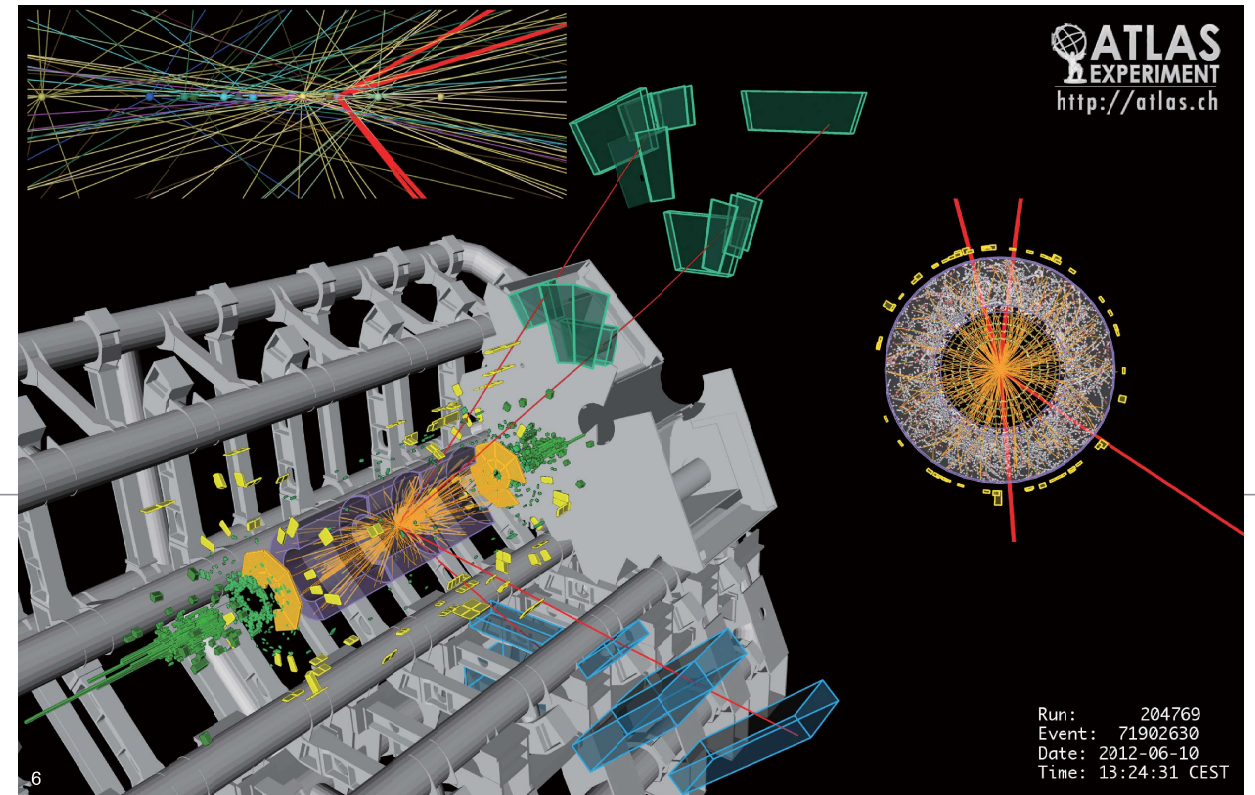
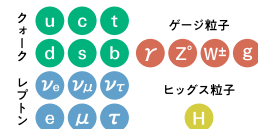
2000

タウニュートリノ発見
(Fermilab)

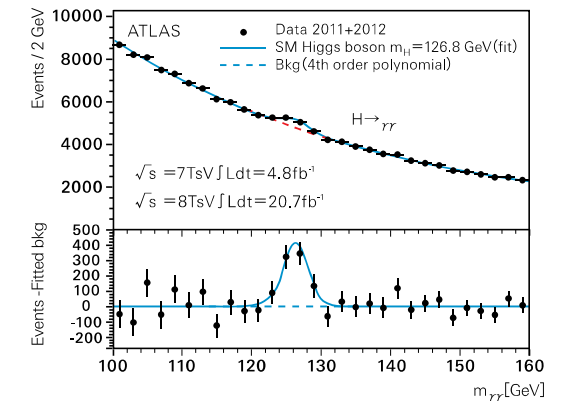


2012

ヒッグス粒子発見
(CERN)



2012年7月4日、CERNはヒッグス粒子発見の成果を全世界に発表し、物理学の新時代が幕を開けた。世界中がヒッグス・フィーバーに溢れ、翌日の新聞各紙一面を飾った。 6. ATLAS実験で観測されたヒッグス粒子が生成されたと考えられる事象。 7. CERN講堂にて、ATLASとCMSによるヒッグス粒子会見時のヒッグス博士(右)とアングレール博士(左)。 8. ATLASコラボレーションで開いたシャンパンパーティ。解析で最も貢献した研究者が会場中央でシャンパンを開けることになり、東大チームの田中助教と中村特任研究員(いずれも当時)がその役に。



9.10. ヒッグスの兆候が見え始めた頃より、ATLASコラボレーション内の競争が激化。周囲がビリビリするなか、研究者と大学院生はCERNにある東大独自の計算機資源を最大限に活用し、連日、不眠不休で解析を行った。 11. CERN講堂と東大小柴ホールをつないで、ヒッグス粒子のプレス会見を行った。

Interview with
Emeritus Professor
Tomio Kobayashi

SSCが中止になったため、KEKもATLAS実験に合流したので、測定機器の開発にはKEKの技術スタッフに協力してもらうことができました。

実験の規模が巨大になっても、実験物理学者としては検出器の主要な部分を担当したいものです。日本グループでは、端部ミュオントリガー検出器やシリコン飛跡検出器などを担当し、存在感を示しました。

また、実験を具体的に検討していく

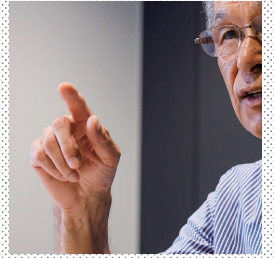
なかで、CERNにあるコンピュータをすべて使っても処理できないほど膨大なデータが出てくることがわかりました。そこで、世界中のコンピュータをつないで1つの大きなコンピュータのように動かすグリッドコンピューティングを構築しました。日本のデータ解析の拠点として、ICEPPにATLAS地域解析センターを設置し、ATLASグループのデータ解析の拠点の1つとなっています。

2010年3月から2012年にかけてLHCの第1期運転が実施され、実験は順調に進みました。そして、2012年7月4日、LHCでヒッグス粒子を探索していたATLASとCMSの2つの実験グループが共同で、ヒッグス粒子の発見を発表したのです。ヒッグス粒子が予測されてから半世紀かけて発見されたことで、素粒子の標準理論の正しさが完全に証明され盤石なものとなりました (p.26 コラム参照)。そのため、ヒッグス粒子

の発見は、素粒子物理学の7月革命とも呼ばれています。この解析には浅井祥仁さんが大きな貢献をしました。

ヒッグス粒子の発見は嬉しい出来事でしたが、標準理論の限界も見えています。この50年で、素粒子の標準理論では説明できないこともいろいろと発見されています。素粒子物理学は、標準理論を超える理論を構築する段階に入りました。

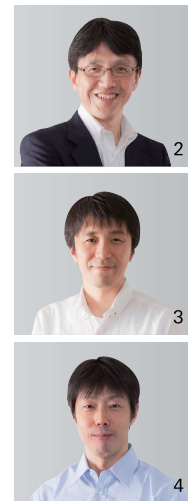
ICEPPでは、ATLAS実験の他にも、



MEG・MEG II 1995-

MEG・MEG II東大チーム

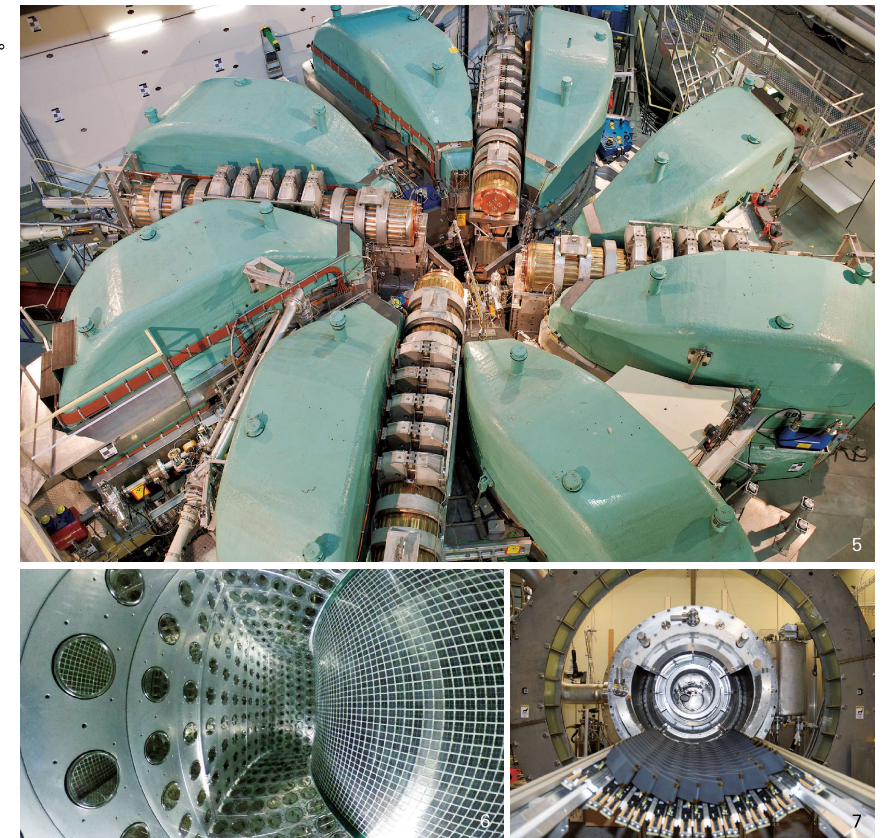
森俊則、三原智、大谷航、岩本敏幸、西口創、澤田龍、内山雄祐、家城佳、潘晟、大矢敦史、Elisabetta Baracchini、Lukas Gerritzen



1. スイス・チューリッヒ郊外にあるポールシェラー研究所 (PSI) の航空写真。スイス連邦工科大学 (ETH) のドメインの一部で、スイス最大かつ最先端の研究機関。 2. 森俊則教授。スパークスパーソンを務める。 3. 大谷航准教授。物理解析責任者として国際グループを牽引。 4. 岩本敏幸助教。ランコーディネータとして現地に常駐。

LEPでの解析結果から、宇宙の誕生直後には素粒子の3つの相互作用が統一されていた可能性が判明しました。この「超対称による大統一」を解明するため、 μ 粒子の崩壊に着眼して、スイスPSI研究所を拠点とする国際共同研究を開始しました。

5. 世界最大強度の μ 粒子ビームを生み出すPSIの陽子サイクロトロン。世界で唯一、1秒間に約1億個もの μ 粒子をつくり出すことができる。 6. 日本チームが発案・開発した液体キセノン γ 線検出器。新開発した光センサーMPPC (右部分) とMEG実験で用いた光センサーPMT (左部分) の組み合わせ。 7. 陽電子の発生時間を測定するタイミングカウンター。MEG II実験ではドリフトチェンバーとともに完全に新調し、陽電子検出精度を2倍に改善。日本で発案してイタリアと共同開発した。



1995

PSIでの新実験構想開始

1999

PSIに世界最高感度の $\mu \rightarrow e \gamma$ 実験を提案、承認

2004

液体キセノン γ 線測定器建設開始

2008

MEG実験開始

2012

アップグレード計画
MEG II 実験を提案

2013

MEG実験のデータ
収集終了

2016

MEG実験の最終結果を発表。
 $\mu \rightarrow e \gamma$ 崩壊は2.4 兆回に1回未満

Interview with
Emeritus Professor
Tomio Kobayashi

標準理論では起こりえないミューオンがガンマ線と電子に崩壊する現象を探すMEG実験にも取り組んでいます。日本を離れて、海外に何人もの研究者を送り出し、活躍している研究グループは世界的にも珍しい存在です。

今は、素粒子実験そのものが大型化し、国際共同実験の規模も大きくなっています。優秀な研究者が集まっているICEPPでは、それぞれの時代ごとに先見性の高い実験をおこなってきまし

た。電子・陽電子衝突型加速器については、1990年頃先駆的に日本のリニアコライダーJLCを提案し、その後、アメリカ、ドイツのグループなどと協力して国際リニアコライダー（ILC）へと発展させ、現在も準備研究を進めています。それぞれの研究者が協力し、研究を進めることで、次の時代の素粒子物理学が切り開かれていくと信じています。

MEG・MEG II 1995-

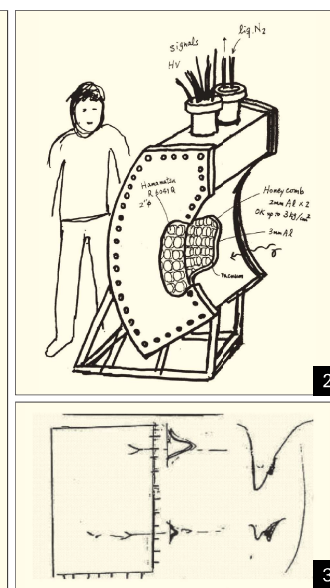
May 1999

Search for $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ down to 10^{-14} branching ratio

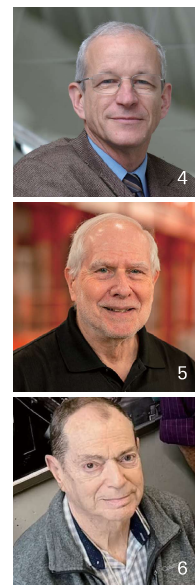
Research Proposal to Paul Scherrer Institut

Institution	Participant
Budker Institute of Nuclear Physics Novosibirsk, Russia	Lev M. Barkov Andrey A. Grebenuk Boris I. Khazin Vladimir P. Smakhtin
International Center for Elementary Particle Physics, University of Tokyo Tokyo, Japan	Shoji Asai Tetsuro Mashimo Satoshi Mihara Toshinori Mori * Shuji Orito Takayuki Saeaki Ikio Ueda Satoru Yamashita Jun Yashima Koji Yoshimura
Institute of Particle and Nuclear Studies, KEK Tsukuba, Japan	Yoshitaka Kuno Akihiro Maki Yasuhiro Sugimoto Akira Yamamoto Kimiaki Masuda
Nagoya University Nagoya, Japan Waseda University Tokyo, Japan	Tadayoshi Doko Jun Kikuchi Hiroyuki Okada Satoshi Suzuki

* spokesperson



1. 1999年にPSIに提出した実験プロポーザル。KEK、早稲田大、名古屋大、BINPのグループが加わった。 2. 森教授が1998年頃に描いた液体キセノン検出器のボンチ絵。 3. 折戸教授がPSIで提案した液体キセノン検出器の原理図。 4. ラルフ・アイヒラー博士。1999年のプロポーザル提出時はPSI副所長。2002年に所長に就任。 5. PSI国際研究委員会のダグラス・ブライマン教授（カナダ・ブリティッシュコロンビア大学）。現在準備中のPIONEER実験の共同提案者でもある。 6. MEG提案当初より長年レビュー委員長を務めたロス・アラモス研究所（当時）のサイラス・ホフマン博士。 $\mu \rightarrow e \gamma$ 探索実験の経験がありMEGを強くサポート。

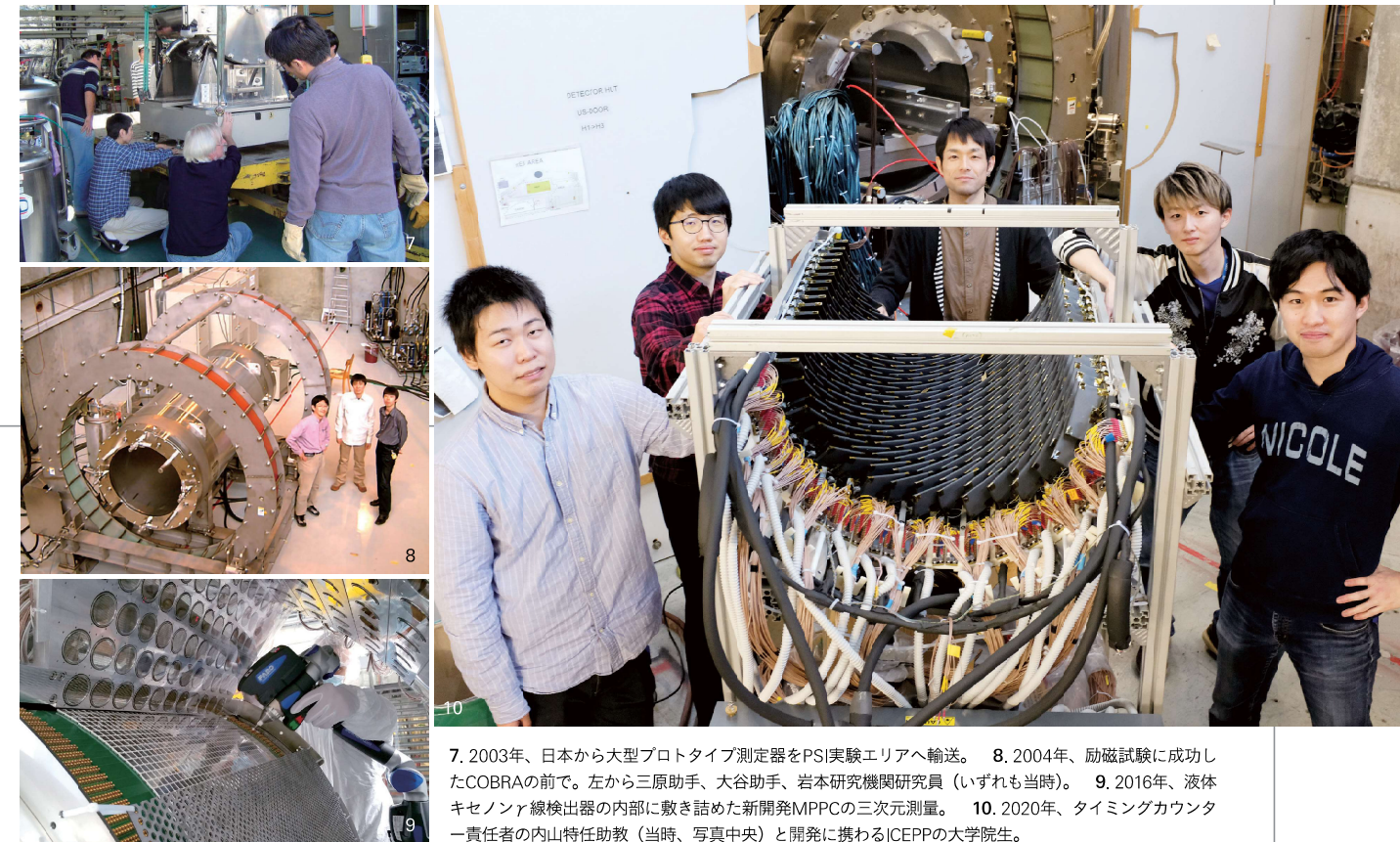


2022

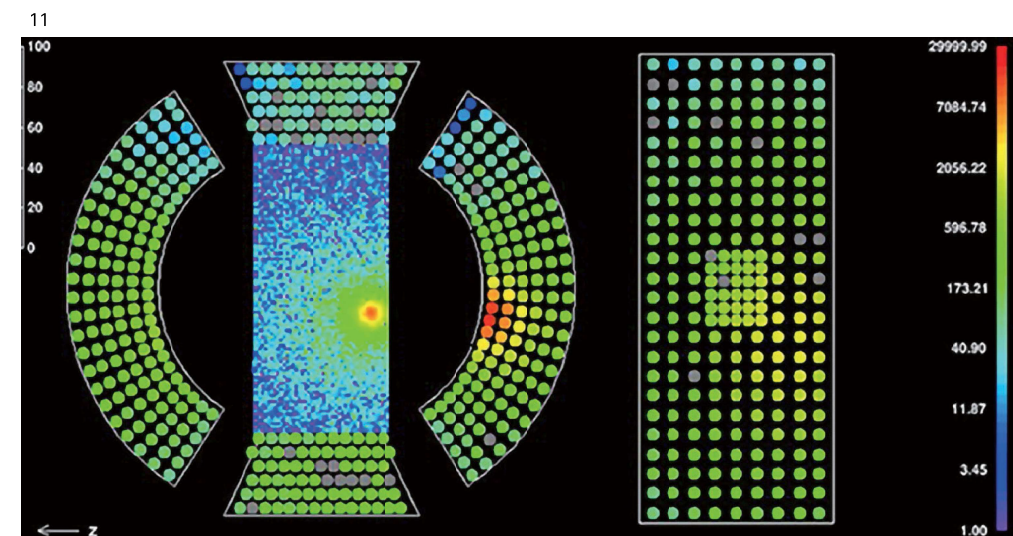
MEG II 実験開始

2023

MEG II 実験の最初の成果を発表。
 $\mu \rightarrow e \gamma$ 崩壊は3兆回に1回未満の頻度



7. 2003年、日本から大型プロトタイプ測定器をPSI実験エリアへ輸送。 8. 2004年、励磁試験に成功したCOBRAの前で。左から三原助手、大谷助手、岩本研究機関研究員（いずれも当時）。 9. 2016年、液体キセノン線検出器の内部に敷き詰めた新開発MPPCの三次元測量。 10. 2020年、タイミングカウンタ一責任者の内山特任助教（当時、写真中央）と開発に携わるICEPPの大学院生。



11. 2021年に取得した最初のデータを用いて行った $\mu \rightarrow e \gamma$ 崩壊の探索で、液体キセノンガンマ線検出器で実際に観測された崩壊の候補事象（ $\mu \rightarrow e \gamma$ 崩壊ではない）。 12. 2023年、PSIでのミューオン・中性子技術交流研究会「BRIDGE2023」でMEG II実験の最新研究成果を発表し、投稿論文はEuropean Physical Journal C 84巻2号の表紙に採用された。 MEG II Collaboration. Operation and performance of the MEG II detector. Eur. Phys. J. C 84, 190 (2024) .



ICEPP半世紀の歴史が生み出した成果の数々

JADE

グルーオン発見の経緯

ICEPPのチームも参加したJADE実験では、当初、トップクォークの発見を目指して観測を続けていました。しかし、実験をするなかで3本のジェットが発生する事象がいくつも観測されたのです。その事象を詳しく観測すると、電子と陽電子の衝突によってクォークと反クォークだけでなく、グルーオンも発生したことによって起こるものであることがわかりました。陽子と陽電子が衝突して高いエネルギーができた後に、対生成によってクォークと反クォークが生まれます。クォークや反クォークのエネルギーが高いときは、それらからグルーオンが放出されるのです。この事象は量子色力学(QCD)の予言とも一致し、3本のジェットの出現がグルーオンの存在を示す証拠となりました。1979年の国際会議では、JADEをはじめ、4つの研究グループがそれぞれ独立してグルーオンの発見を報告し、グルーオンの存在が認められました。

(p.10-13)

OPAL

素粒子の世代数を決定

物質を構成する素粒子はすべてフェルミオンであり、強い相互作用をする/しないによってクォークとレプトンに分けられます。身の回りにあるものは2つのクォークと2つのレプトンで説明できますが、高いエネルギーまで調べると、同じような組がさらに2つあり、全部で3つの組があることがわかりました。これを「世代」と呼びます。3つの世代は、質量以外同一の性質を持ちます。1980年代の時点では、ニュートリノが何世代まであるのかが不明でした。しかし、LEPのOPAL実験でZ粒子を精密に観測することで、ニュートリノの世代数を3と決定したのです。Z粒子は様々なパターンで崩壊します。その崩壊を詳しく測定することで、Z粒子の崩壊から生まれるすべてのクォーク、レプトンと、それぞれの反粒子のペアを観測できます。その観測結果と理論予想との比較から、ニュートリノの種類は3種類、つまり、ニュートリノ世代数が3であると決定しました。

(p.17図1)

OPAL

トップクォークの質量を予言

OPAL実験では、目的の1つに掲げていたトップクォークの発見は実現できませんでした。しかし、OPAL実験を含めたLEPの4つの実験で、Z粒子の生成や崩壊の過程を極めて精密に測定することで、標準理論が、その量子補正も含めて正しいことを実証しました。逆に標準理論が正しいとすると、精密測定から量子補正を通して、標準理論の中で実験で測定できていないパラメータを決めることができます。その1つがトップクォークの質量で、トップクォークの発見以前にLEPではZ粒子の精密測定からその質量は173GeV付近であることを予言しました。アメリカ・FermilabのTevatron実験で1995年にトップクォークが発見されましたが、その質量はLEPが予想した通りでした。この事実がLEP実験と標準理論の正しさをさらに実証しました。

(p.17図3)

ATLAS

ヒッグス粒子発見の経緯

2010年から第1期の運用を始めたLHCでは、ATLASとCMSの2つの検出器によってヒッグス粒子が発見されました。ヒッグス粒子の探索は、光速近くまで加速された陽子と陽子を衝突させ、そこで生まれた様々な粒子の観測によっておこなわれます。高精細な検出器によって取得した膨大なデータを解析して、稀にしか生成されないヒッグス粒子を探っていました。発見には、ヒッグス粒子の質量を精度よく測定できる「2つの光の崩壊するモード」と「2つのZ粒子を介して4つのレプトンに崩壊するモード」が活躍しました。ATLAS実験では、約1000兆回衝突させることで、126GeV付近に99.9999983%の確率でヒッグス粒子の存在を示唆しました。ライバルのCMSでも同様の結果となり、2012年7月4日にATLASとCMSが共同で、ヒッグス粒子発見を発表したのです。

(p.18-21)

OPAL

超対称性大統一理論を示唆

LEP実験でのZ粒子の詳細研究を通して、3つのゲージ相互作用（電磁・弱・強）の強さが高い精度で決定されました。これを理論に従って、温度が高かった宇宙初期の時期に外挿して行くと、宇宙が生まれた直後に3つの相互作用が統一されていたことがわかりました（オレンジ色の線）。ただし、新しい対称性である「超対称性」が必要で、超対称大統一理論への期待が高まりました。1980年代に小柴昌俊先生がカミオカンデによって研究したのは超対称性のない古い大統一理論（ピンク色の線）で、実際には統一が起きていませんでした。

(p.17図4)

CHAPTER

2

PAST

PRESENT

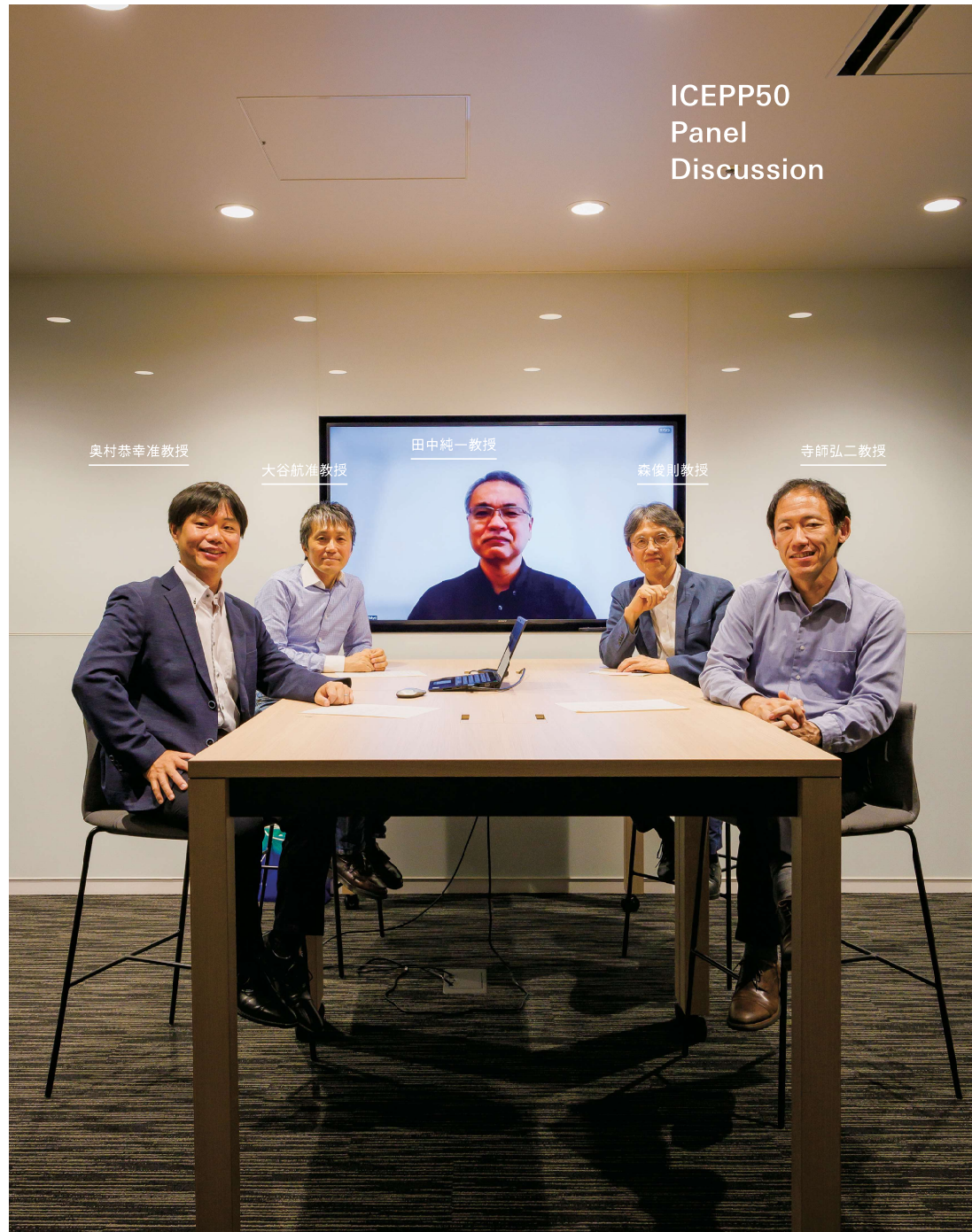
FUTURE

ICEPPの現在地

現在、素粒子物理学では超対称性大統一理論など、20世紀の物理学の到達点である「標準理論」を超える新たな枠組みが求められています。半世紀前から様々な実験で標準理論を検証し続けてきたICEPPも、新たな枠組みの検証実験に向けて模索を始めています。また、量子コンピューティングなどの強力なデータ解析手法の導入を探り、新たな物理の実現に挑んでいます。第2章では、過去の成果を継承しながらも、常に新局面に挑戦し続けるICEPPの現在の姿をご紹介します。

宇宙のしくみを解き明かしたい。

ICEPPスピリットを胸に



□ Okumura Yasuyuki / □ Ootani Wataru / □ Tanaka Junichi / □ Mori Toshinori / □ Terashi Koji

日々進みゆくATLAS実験の現在

—— ICEPPの中核を担う先生に集まって頂きました。なぜ、素粒子の研究に取り組んでいるのか、その魅力を教えてください。

大谷 私が素粒子物理学に興味を持ったのは、中学生くらいの頃です。南部陽一郎先生の著書『クォーク』を読んだのがきっかけです。そのときは研究者になろうとまでは思っていませんでした。

田中 素粒子物理学はシンプルなのに究極を目指すところがあって、そういう部分に大きな魅力がありますね。

森 私たちは素粒子を研究していますが、その目的は宇宙を知ることです。この宇宙には、不思議なことがたくさんあります。どうして、このような宇宙ができたのかを知るためには、素粒子について知る必要があります。

大谷 大学で勉強するなかで、たくさんの研究者が宇宙の解明をしようと、いろいろな工夫や努力を重ねていることがわかりました。私もそれをやっていきたいと思ったのが研究者を志すきっかけでしたね。

田中 でも、現状は私が学生のときから何も変わっていません。2012年にヒッグス粒子が発見されましたが、それも教科書には書かれていたことが、誤解を恐れずに言うと、本当にあったということにすぎません。研究者としては、素粒子の標準理論を超える次の理論の方向性を決めるような発見ができればと考えています。LHCのATLAS実験で壁を打ち破りたいですね。

奥村 ヒッグス粒子は今のところ、LHCでしかつかれません。ヒッグス粒子を高精度に測定して、宇宙のしくみや歴史を調べていくことが、現在のATLAS実験のメインテーマになっています。それには実験機器などの開発、運用、データ解析など、総合して取り組む必要があります。

3,000人ほどの研究者が関わるATLAS実

験グループの中でも、ICEPPは様々な立場の研究者が協力し、1つのチームとして存在感を発揮していました。そういう戦略で大規模な国際共同研究に臨む風土が培われているのを感じています。私が若手研究員のときに、寺師さんはグループ全体をオーガナイズするレイヤーで活躍されていました。寺師さんと密にいろいろとやり取りしていたことを思い出します。

寺師 2015年から16年にかけて、750GeV周辺で新粒子があるかもしれない信号が見られたときですね。この信号は新粒子のものではないと最終的に判断されたのですが、ATLASのような高エネルギーの素粒子を衝突させる実験では、新しい粒子を発見できるかもしれないというワクワク感やドキドキ感がありますよね。

——LHCのATLAS実験は、今、どんなことをしているのですか。

奥村 実験グループの外の人は、2012年のヒッグス粒子の発見以降は、あまり発見がないように思うかもしれません。でも、実験グループの中の人間は、知の地平を切り開くためにデータ解析の新しいアイデアを出したり、実験データ収集と並行して測定システムを日々現場で改良していたり、エキサイティングな状態が続いています。

田中 そうですね。2022年からLHCの第3期運用（Run3）が始まり、ATLAS検出器

では、衝突実験のデータを日々、取得しています。さらに、2015～2018年に実施された第2期運用（Run2）で取得したデータの解析も進めています。

奥村 Run3では、磁石の性能を向上させ、衝突エネルギーを13.6TeVに高めました。さらに、ビーム中の陽子の数を増やし、輝度が高い状態を維持した長時間運転を可能にすることで、従来と比べ、同じ実験時間でも、よりたくさんの衝突データの収集を可能にしています。

田中 もちろん、ハードウェアのアップグレードと平行して、データを処理するために必要なコンピュータシステムのインフラ環境を整えたり、解析ソフトの改良等も行っています。陽子同士の衝突実験をしても、このようなコンピュータシステムがなければデータ解析することはできません。検出器に取り付けられた1つ1つのセンサーがとらえた信号をそのまま見ても、何が起きたのかを理解することはとても難しいです。コンピュータを使って、膨大な信号を処理、再構成することで、衝突時にどんな粒子が発生したのかを識別し、理解することができます。

奥村 さらには、ここからどう切り開いていくのかが大切ですね。今、Run3のデータを蓄積していて、より高い統計量を駆使して初めて取り組むことができる課題や、技術向上に伴ってはじめて可能になる全く





©CERN

新しい研究課題を見出して取り組むという発想が必要になります。ハードや解析ソフトの技術開発などを、いろいろと融合させながら、様々なチャレンジをして、発見のチャンスを最大化させていくことがとても重要だと思います。

田中 データ解析ではある意味で考えられるアイデアは出し尽くしていて、いろいろと研究を重ねても、感度を1%上げられるかどうかといった状態です。でも、その状態を何とか打破しようとがんばっています。その一環として人工知能（AI）をうまく取り入れて、感度を一気に5%、10%上げられるような研究開発に取り組んでいます。難しいところはたくさんありますが、ブレイクスルーを起こせるように取り組んでいます。

もうひとつのアプローチ。 MEG実験への思い

——ICEPPでは、2008年からMEG実験が始まっていますが、なぜ、この実験に取り組むようになったのですか。

森 実は、MEG実験には長い歴史があり、構想したのは1995年のことです。私は、LHCの前の加速器であるLEPを使ったOPAL実験に取り組んでいました。OPAL実験ではZ粒子を精密測定することで、電磁気力、弱い力、強い力のそれぞれの力の強さを示す結合定数を高い精度で測定することができました。

その結果、超対称性というのがあると仮定すると、この3つの力を統一する超対称性大統一理論が成り立つことがわかったのです。この頃、トップクォークが発見され、当初の予想より質量が重いことが明らかになりました。トップクォークの質量が重いことで、ミューオンの崩壊から大統一理論を探れる可能性が出てきたのです。

——もう少し詳しく教えてください。

森 誕生直後の宇宙は超高温・超高压で、それが膨張し、温度が低くなることで現在の宇宙になっています。大統一理論では、宇宙が超高温・超高压状態だった頃に3つの力が統一されていたと考えられています。標準理論の範囲では陽子は半永久的に安定していますが、大統一理論が正しいと、寿命を持ち、陽子崩壊を起こします。

通常、ミューオンは電子とニュートリノに崩壊します。しかし、超対称性大統一理論が正しい場合は、数十兆回に1回くらいの割合で電子とガンマ線に崩壊する現象が起こります。MEG実験はミューオンの稀な崩壊現象を探す実験で、スーパーカミオカンデで実施している陽子崩壊探索を補完するものになります。

この実験にはたくさんのミューオンが必要です。調べてみると、このような実験ができるのは世界でスイスのポールシェラー研究所（PSI）の陽子サイクロトロンしかありませんでした。PSIはCERNから車で3時間くらいの場所にあります。早速、PSIに行

き、研究会を立ち上げることを合意しました。勉強会を重ねるなかで、一緒に研究しようという仲間が集まり、1999年に実験計画を提出し、PSIから承認されました。

大谷 私がICEPPに着任したのはその頃ですね。MEG実験の検出器を開発、建設するために、2003年からPSIに行き、その近郊に長期滞在しました。結局、スイスに10年ほど滞在し、MEG実験を開始し、データ収集を終了するところまで最前線で実験に取り組むことができました。これは私の研究人生の中でとても大きな経験になっています。国内の大学教員では10年間も海外に長期滞在するのは難しいです。それができるのはICEPPの大きな特徴の1つですね。

—— MEG実験は、どういうことをするのですか。

森 PSIの陽子サイクロトロンは1秒間に1億個ほどのミューオンをつくることができます。MEG実験では毎秒数千万個のミューオンが崩壊する様子を観測します。そのほとんどが電子とニュートリノに崩壊するなかで、電子とガンマ線に崩壊するととても稀な現象を探します。数年観測を続けると、数十兆個のミューオンの崩壊を観測することになるので、私たちが期待する特殊な崩壊現象はそのうちの1～2回観測できるかどうかですね。

大谷 2008年から2013年までの第1期目の実験では、ミューオンから電子とガンマ線への崩壊は2.4兆回に1回未満の確率でしか起こらないことを明らかにしました。

森 すごく稀な現象を発見するためには、検出器を工夫して実験の感度を上げる必要があります。大谷さんをはじめ、たくさんの研究者の力で感度を上げてきましたが、もっと感度を上げたいと思っています。

—— ICEPPは設立から高エネルギー加速器実験に取り組んできました。でも、MEG実験はミューオンの崩壊の観測実験で、方向性が大きく変化しているように感じます。

森 MEG実験は、ミューオンを使って超対称性大統一理論の検証ができそうだという発想から生まれました。小柴先生は電子・陽電子衝突実験に関わりながらも、陽子崩壊を観測するためにカミオカンデ実験を立ち上げました。

私たちもATLAS実験だけでなく、MEG実験で宇宙のしぐみに迫っていきたいという想いからでした。どこに行っても、どんな装置を使ってでも、宇宙のしぐみを解き明かしたいという気持ちは、小柴先生から私たちが受け継いだICEPPのスピリットだと思います。ATLAS実験も、MEG実験も目指すところは同じです。

奥村 そうですね。ATLAS実験では、ヒッグス粒子を精密に調べることを軸にして、宇宙の謎の解明に取り組んでいます。ヒッグス粒子は、私たちが日常生活を送るような「低いエネルギーの環境」では、真空の中にびっしりと詰まったヒッグス場として存在します。そのような環境では、私たちにはヒッグス粒子は見えずに、「なぜか素粒子が質量をもっているという現象」のみを観測するに留まります。

一方で、高エネルギーをかけて真空中に潜んでいるヒッグス場を励起させ、ヒッグス粒子をつくると、生成や崩壊の過程を通じて、真空中に詰まったヒッグス場の質量や相互作用などの特性が見えてきます。ヒッグス粒子は、真空の性質などを素粒子物理学の粹組みで知るための大切な窓のようなモノです。これまでの研究で真空との相互作用で素粒子が質量を持っているようにみえる仕組みが明らかになりました。これから、LHCでヒッグス粒子をよりたくさんつくっ

ていき、詳しく調べることは、宇宙の仕組みを理解するための重要な手段となります。

森 今まで、ゲージ対称性というきれいな対称性があることで、宇宙には様々な素粒子ができて、この宇宙をつくっていると思われていました。しかし、研究を重ねてわかったことは、ゲージ対称性が壊れているから、この宇宙が形づくられたということです。私たちは、その謎に挑むことができるところにきたのでしょうか。

MEG実験は検出器をアップグレードして、2022年からMEG II実験を開始しています。既にデータはかなり蓄積されていて、2024年度中には新しい実験結果を発表できると思います。そこでミューオンが電子とガンマ線に変化する崩壊を発見して、超対称性大統一理論が正しいことを示せばいいですね。

大谷 MEG II実験では、ミューオンの特殊な崩壊現象を発見できるくらいの感度まで来ています。私が退職するまでには発見したいです。あと、PSIの陽子サイクロトロンは、数年以内にビーム強度が100倍にアップグレードされます。観測できるミューオンの数が100倍になるので、そのメリットも活用し、特殊な崩壊現象を発見するだけでなく、より詳細なメカニズムを明らかにするところまで持っていきたいです。

今後のATLAS。 そして、ILCへの展望

—— ATLAS実験はこれからどのように進む予定ですか。

田中 現在稼働しているLHCのRun3は2026年前半で終わる予定です。そして、LHCの性能を大幅に改善する大規模工事が行われ、2030年には高輝度LHC-ATLAS実験が動き出す予定です。高輝度LHCでは、陽子の衝突頻度を現在の約3倍に高めます。

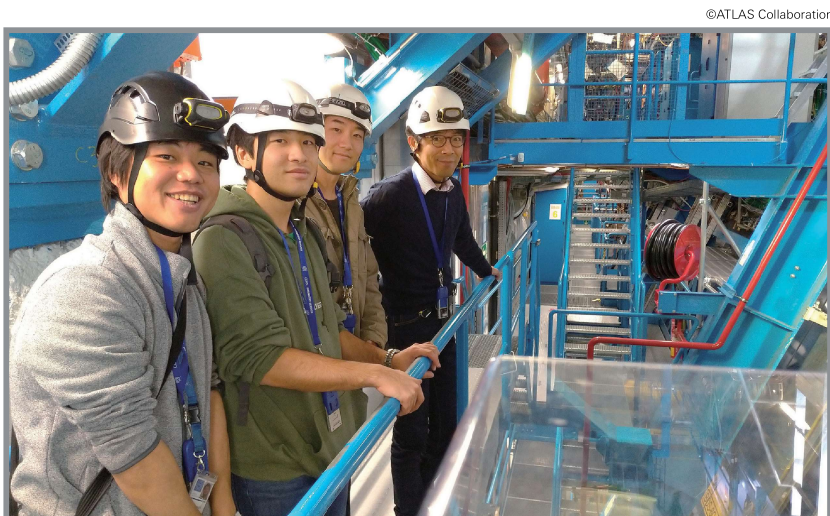
奥村 それだけでなく、ATLAS検出器の改修工事も進めます。装置の設計は終盤に入っています。私たちが担当している部分では、センサーは変えずに、信号を処理するエレクトロニクスシステムを最新のものに置き換えます。このシステムは20年以上前に設計されたものなので、新しいものに置き換えるだけでもたくさんのデータを処理系のシステムに送ることができます。

田中 加速器と検出器のグレードアップで得られるデータ量は、これまでより一桁以上増えます。大量のデータをしっかりと処理できるだけのコンピュータシステムと再構成・解析ソフトの開発も同時に進めています。

寺師 素粒子実験の実験データは今後急速に増えていきます。このままいくと、現在の古典コンピュータでは対応できなくなる恐れもあります。量子コンピュータは、組み合わせ問題などの特定の問題に対しては、古典コンピュータよりも速い速度で解くことができると考えられています。そのような量子コンピュータを実験データの処理に応用できるかどうかは興味深い問題で、私が量子コンピュータの研究に取り組んでいる目的の1つです。

現在の量子コンピュータは、多くの人が通常のコンピュータに対してイメージするものとは違い、計算が可能な実験装置としての要素が強いものです。素粒子は量子的な振る舞いをするので、素粒子の問題にうまく使えるような計算技術を実現できるように、量子計算のアルゴリズムを主に研究しています。

この研究がうまくいく保証はありませんが、おもしろそうだから挑戦してみようという段階です。新しいアイデアをいろいろと試していけるという意味では大規模実験とは違うおもしろさがあります。



©ATLAS Collaboration



©MEG Collaboration

ICEPPには、素粒子物理学の研究というコアにある目的がありますが、それだけに留まらず、応用に近い領域まで幅広く研究することができます。自由度のある恵まれた研究環境にと思っています。

森 そこは私も同感です。ICEPPでは1人1人の研究者がお互いに信頼し合っています。だから、研究などに対してあまり厳しいルールは設けていません。それぞれの人が、物理学にとって何が重要なのかをわかっています。CERNやPSIへの出張なども、個々人が自由に計画し、必要なときに行っています。研究者として、お互いに信頼し合い、自由度が確保されているというところも、ICEPPの大きな特徴ですね。

寺師 ICEPPでの量子コンピュータの研究は、素粒子物理学実験のビッグデータ化に対応するために始まりました。実験への応用という意味ではまだ基礎的な研究が多いですが、近年素粒子など基礎物理への応用研究が進んできました。素粒子物理学の領域だけでなく、物性物理や量子化学の分野では、さらに精力的にアルゴリズムの開発や応用研究が進んでいます。それぞれの国がリソースをつぎ込んで研究を進めているので、システムが急速に大型化していく可能性があります。私は、量子コンピュータの進展を見据えて、基礎固めをしている段階です。将来の可能性を探ると同時に、今の段階の量子コンピュータの活用法も発見

できればいいなと考えています。

—— ICEPPでは、将来に向けて国際リニアコライダー（ILC）の研究も進めていますよね。どんな研究をしているのですか。

大谷 ILCは次世代の大型素粒子衝突型加速器で、電子と陽電子を世界最高エネルギーで衝突させて未知の現象を探します。現在、日本に建設することを目標に活動していて、もし、実現すれば、今後10年に渡って世界の素粒子実験をリードする国際研究施設になるでしょう。

現時点でのILCのターゲットは、やはりヒッグス粒子です。宇宙の根源的な謎を解明するためにも、ヒッグス粒子の詳細な研究は不可欠です。ILC以外に、ヒッグス粒子を研究するための次世代の大型衝突型加



速器は、中国やヨーロッパで提案されています。

ILCは直線型の加速器で、電子と陽電子を両端から加速させ、真ん中あたりで衝突させます。円型加速器とは違い、加速したら衝突するチャンスは1回だけなので、限られた距離で一気に加速させ、効率よく衝突させる技術力が求められます。

しかし、国際共同研究で長年、開発を進めた結果、実現可能であることを実証していて、許可が下りれば、すぐにでも建設に着手できます。そのような状態にあるのは、世界の中でもILCだけです。

森 LHCや高輝度LHCでもヒッグス粒子の精密測定をしますが、より厳密に測定するためにはILCが必要です。私たちは水蒸気が水になって、氷になるしくみを理解しています。しかし、超高温状態のときに、空中を飛びまわっていたであろうヒッグス粒子が、なぜ、低温状態の現在の宇宙空間の中でヒッグス場として詰まっているのかは、何もわかっていません。

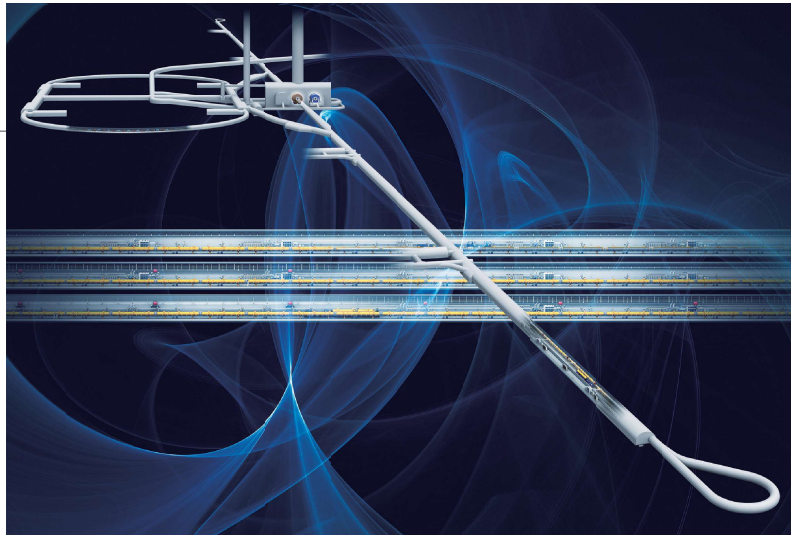
そこをしっかりと理解しないと、今まで何のために研究してきたのか、という気持ちになります。もしかしたら、何もないように見える空間の中に、私たちが取り出すことのできないものすごいエネルギーがあるのかもしれない。

人間は、100年前までは太陽がどうして光り、発熱しているのかわかりませんでした。しかし、先人が研究した結果、核融合

反応で莫大なエネルギーを放出していることがわかりました。この宇宙の法則やしくみをしっかりと理解したいですね。

大谷 ILCはぜひ、日本に建設したいです。素粒子物理学の大型実験は実験の構想から、建設し、結果を出すまでの期間がとても長くなっています。特に、2～3年で一定の成果をまとめなければいけない学生や若手研究者が、参加しにくくなっているという問題があります。

これを解決するためには、小規模の実験も同時に取り組み、その結果を出していきながら将来の大型実験に備える体制をつく



©Rey Hori

ILC 素粒子物理学の将来を担う線形加速器。電子・陽電子の衝突は何を生み出すのか



ることが重要だと思います。ICEPPは国際的な大型実験であるATLAS実験をやりつつも、MEG実験、量子コンピュータ、Tabletop実験など、様々な規模の研究に取り組んでいて、さらに将来の大型実験であるILCにも関わっています。そのときどきで、物理学の中で何が重要なのかを見極めつつ、様々な規模の研究に取り組める機動性や柔軟性を持っていると感じています。

寺師 ヒッグス粒子については、加速器実験で精密に測定するだけでなく、量子コンピュータによるシミュレーションもできるのではないかと考えています。すぐに実現するのは難しいですが、原理的には量子コンピュータでヒッグス場を表現できます。エネルギーを与えてヒッグス場を励起することでヒッグス粒子が出現する様子をシミュレーションできれば、実験では測定するのが難しいダイナミカルな性質や真空の相

転移のしくみなどにもアプローチできるでしょう。将来的には実験と相補的なアプローチを活用することで、様々な素粒子現象のしくみを明らかにできればいいですね。

田中 ヒッグス粒子の精密測定はLHCやILCでの大きな課題だと思いますが、私個人としては、それとは違う軸を探せればと考えています。高輝度LHCが始まると、それまでの10倍のデータが手に入ります。そのデータをしっかりと解析することで新たな現象が見つかれば、新しい実験へとつながります。

例えば、ダークマターの正体となる超対称性粒子の兆候が見えてくれば、新しい実験のアイデアなども出てくるでしょう。そのためには検出器や解析ソフトなどで、いろいろな工夫をして、感度を上げていくことが大切です。LHCにもまだまだ可能性がたくさんあるので、性能を最大限まで引き

出して、これからの物理学を進めるうえでのヒントを見つけれればと思います。

奥村 LHCのデータを「使い倒す」のはとても重要ですね。LHCのみならず何らかの実験で何かを発見したり、兆候を見つけたりすれば、きっと新しいアイデアが浮かんで、次から次に調べたいことが出てくるでしょう。それがどこから出てくるのかは、いろいろとアンテナを張っておく必要がありますね。LHCのデータをとことん使って、エネルギーフロンティアから新しい知見を得て、次につなげていくことがこれからの10年間で実現したいと強く思っています。エネルギーフロンティアを追求することや、世界中でベストな装置を使っておもしろい素粒子物理学実験をおこなうことが、ICEPPの哲学だと感じています。10年後、20年後、もっとその先もそういうことに常に取り組んでいけたらと思っています。

国際リニアコライダー（International Linear Collider：ILC）は、高エネルギー物理学分野の次世代エネルギーフロンティア実験を担う電子・陽電子直線型加速器です。2030年代後半の稼働を目指し、世界中の研究者が準備・検討を進めています。LHCでは複合粒子である陽子どうしの衝突ですが、ILCは素粒子である電子と陽電子を衝突させるため、よりクリアに事象をとらえることができます。このようなヒッグス・ファクトリーは、ヒッグス粒子の詳細な性質を調べるのに必要不可欠であり、将来の拡張性に優れ、ビーム偏極を利用できる可能性も秘めています。素粒子の質量や宇宙の物質の起源の解明に向け、ILCによる新物理の幕開けが期待されます。日本の北上山地はILCの有力な建設候補地です。実現すれば、日本の素粒子物理学研究の発展だけでなく、関連する科学技術産業や周辺自治体の発展にも大きな波及効果をもたらします。

1. 2024年7月に東大で2度目のLCWSを開催。世界各国から約270名が参加。2. 2004年8月に北京で開催したICHEP2004。ICFAが超伝導技術の採択を決定し会見。3. 長年の国際共同研究を経て、2013年にTDR（技術設計書）が完成。LCCを監督する新組織LCB委員長の駒宮教授からLCCディレクターのリン・エバンス博士へ手渡された。

ICEPP50周年によせて

このたび、素粒子物理学の歴史を築き上げてこられた先輩方からICEPPへメッセージをいただきました。いつの時代もICEPPは研究者の情熱に満ちた組織として歩んできたのです。

MESSAGE ____ 01

物理実験はやってみないと何が出てくるかわからない



武田 廣

神戸市公立大学法人理事長

私は、1978年1月1日に理学部附属素粒子物理学国際協力施設の助手に採用されました。施設の英語名の略称は、LICEPPでした。当時は、日本学術振興会奨励研究員として藤井忠男先生の指導のもと博士論文の仕上げの最終段階でした。学位取得後は、米国でポスドクをするつもりでしたが、小柴昌俊先生から、「助手のポストが付いた。DESYでの電子・陽電子衝突装置PETRAを用いたJADE実験に参加しないか？」とお誘いを受けました。運命が決まった瞬間でした。その後、約6年間DESYに滞在し、グルオンの発見や電弱相互作用の検証などに貢献できました。1984年からは、舞台をジュネーブのCERNに移し、LEPのOPAL実験に参加しました。1989年に神戸大学に赴任してからも、OPAL実験を継続し、LHCでのATLAS実験の立ち上げにも協力

させていただきました。私の研究者としてのキャリアは、ICEPPで培われたものであると感謝しております。ICEPP在任中に一番驚き、記憶に残っているのは、JADE実験が軌道に乗り、これから続々と成果が出ると期待していた時に、小柴先生が放った宣言でした。「これからは、俺は自分の好きなゲリラ戦をやる。加速器での衝突実験はお前ら若い正規部隊に任せた」。当時は、人、物、金が割かれるのですから、「殿、御乱心!」と思いました。しかし、このゲリラ戦が神岡実験に繋がり、後のノーベル物理学賞にも繋がる訳で、「物理の実験は、やってみないと何が出てくるかわからない」ということを、実感しました。ICEPPの次の50年でも、「何が出てくるかわからない」実験に挑戦してください。

MESSAGE ____ 02

理論屋からみた超新星ニュートリノ初観測の思いで



佐藤 勝彦

東京大学名誉教授
日本学術振興会学術
システム研究センター顧問

1987年2月、歴史上はじめて超新星ニュートリノが検出された。検出した装置、KAMIOKANDEは宇宙線研に属するが、主導していたのは小柴先生、戸塚先生はじめICEPPの方々である。これによって宇宙を観測する新たな眼としてニュートリノ天文学が創始された。当時超新星ニュートリノの理論研究を進めていた私は、マゼラン雲で超新星が現れたニュースを聞き、直ちに戸塚先生に電話で連絡したのをよく覚えている。その年は小柴先生の退官の年で、その退官パーティーで中畑先生から「今日、神岡から記録磁気テープが届いたので、今晚徹夜して解析します」とお伝えいただいた。そして13秒の間に11発のニュートリノが検出される歴史に残る記録が作られた。嬉しいことに、ちょうど私が理学部長を勤めていた2002年、小柴先生はこの業績によりノーベル

賞を受賞された。その後、日本はニュートリノ研究の世界の中心拠点となり梶田先生もノーベル賞を受賞された。ICEPPのますますの発展を祈念している。



2002年10月8日午後8時30分、理学系研究科化学本館において、小柴昌俊名誉教授（当時）のノーベル物理学賞受賞の記者会見が開かれた。理学系研究科長・理学部長の佐藤勝彦教授が記者会見に同席し、約100人の報道陣が詰め掛けた。

MESSAGE ____ 03

当時の日本では目覚ましい存在だったICEPP



日笠 健一

東北大学高等大学院機構
学際高等研究教育院長・
総長特命教授

ICEPP が設立された1974年は、偶然自分が東大に入学した年でもあります。学部生時代から当時施設長の小柴先生にはいろいろお世話になりましたが、すでに50年前とは信じられないものがあります。電子・陽電子衝突実験がJ/ψの発見により脚光を浴びる前から、ICEPPはドイツの加速器を利用した研究をスタートさせていました。今では素粒子物理の国際共同研究は当たり前ですが、当時の日本では目覚ましいものでした。その後CERNに舞台を移し、今世紀になってからは陽子・陽子衝突で世界最高エネルギー

の実験を行っています。この50年間の成果は、ヒッグス粒子の発見、グルオンの存在証明をはじめとして枚挙に暇がありません。この長きにわたり最先端の素粒子実験を次々に成功させてきたことに敬意を表するとともに、お祝いを申し上げます。ICEPPの守備範囲はエネルギーフロンティアだけでなく、現在スイスで進行中の、分岐比の最先端を行くミュオンの実験結果にも大いに注目しています。

MESSAGE ____ 04

世界初の難しい挑戦に胸躍らせた日々



坂本 宏

東京大学名誉教授
元・素粒子物理
国際研究センター教授

私がICEPPに在籍したのは2001年から2018年まで。ATLAS実験地域解析センターを構築運用することが主な仕事でした。ATLAS日本グループの規模に見合う十分な計算資源と、世界中のサイトと相互接続し、最大限の処理能力を提供するための国際ネットワーク接続を確保することが課題でした。計算グリッド技術を世界で初めて実用化したWLCG解析網により、ヒッグス粒子発見のデータ解析を数ヶ月で完遂したことは非常に印象的でした。今日では100Gbpsを超える帯域の国際学術ネットワークが世界中を結び、LHCだ

けでなくBelle IIなど多くの国際共同研究の共通基盤となっています。それへのICEPPの貢献は非常に大きかったと思います。またICEPPでは幾人もの若手研究者と出会うことが出来ました。私自身も彼らと切磋琢磨する中で多くのことを学びました。世界で初めてのことへの挑戦は、どれも難しくても胸躍るものでした。そういった訓練を積んだ彼らが現在、様々な研究の最先端で活躍していることを頼もしく思っています。



Rolf-Dieter Heuer

Current; President of
SESAME Council
Former; Director-General
of CERN / President of the
German Physical Society /
Research Director of DESY

In 1975 the DESY began constructing a new electron-positron collider, PETRA, which was at the time the most powerful in the world. One year earlier, the University of Tokyo had established a particle physics group, which, together with a group from the University of Heidelberg proposed and designed the JADE experiment whose name derives from the institutes in JApan, Deutschland, and England that were members of the collaboration at the time the experiment was approved in 1977. It was the beginning of a long and fruitful scientific journey.

To cover the University of Tokyo's responsibilities in the experiment, a new laboratory, the Laboratory of International Collaboration on Elementary Particle Physics (LICEPP), was created, replacing the particle physics group. Some years later, this evolved into ICEPP.

The establishment of the Tokyo group in 1974 marked an important milestone for particle physics in Japan and globally, coming as it did alongside the birth of the Standard Model of particle physics. Half a century later, the Standard Model has reached full maturity, with ICEPP always playing a full role in guiding it there. From the discovery of the gluon at PETRA to establishing three generations of elementary particles through precision measurements of the Z^0 , ICEPP was there. And from precision measurements of Standard Model interactions, indicating where the mass of the top quark should lie and constraining the mass range for the Higgs boson, right through to the discovery of this elusive particle at the LHC, ICEPP physicists share the credit.

On a personal note, throughout these 50 years my own scientific journey has proceeded in lockstep with colleagues from ICEPP, first at DESY, then at CERN, and later through preparatory work for a possible linear collider project. It has always been a pleasure to work together with such excellent scientists, and to spend so many memorable moments together with such good friends. One special moment that I will never forget came late at night on 13 August 1989. When LEP produced its first electron-positron collisions, it was colleagues from Tokyo who showed me the first events with signals in the Jet chamber of the OPAL experiment, indicating not only that all components of the detector were working, but that LEP's scientific programme was underway. I was overwhelmed to see that our many years of work together had been successful.

I wish ICEPP all the best for the coming decades, so that fifty years from now someone from a younger generation can pen a similar note to this one, highlighting the Institute's role in unravelling the nature of dark matter and other mysteries that nature has still to reveal. Happy Birthday, ICEPP!



1. 2012年7月4日 CERN所長として、ヒッグス粒子発見の快挙を提唱者のヒッグス博士と喜び合った。 2. 2010年3月30日 LHC Run1初入射のプレス発表を東大で行った。 3. 2013年12月18日 東大との学術交流協定書（全学）に調印。

CHAPTER

3

PAST

PRESENT

○ FUTURE

ICEPPと 素粒子物理学 実験の未来

ICEPPが担う素粒子物理学実験の最前線。それは新たな理論を導出するための次世代加速器実現に向けた挑戦です。ヒッグス粒子を大量に生成できるHiggs Factoryを構想し、そのひとつの解としてのILC建設に邁進するICEPP。ここでは、石野雅也センター長が自らの人生にも重ねた素粒子実験の過去を振り返るとともに未来に向けた思いを語ります。

Interview with the Director, ICEPP, UTokyo

ISHINO MASAYA

東京大学素粒子物理国際研究センター長

石野雅也



センター長インタビュー

より宇宙の真理に近づく
新たな実験結果を得るために



©CERN

私は大学院生のとき、わずか7名の仲間と共に原子核分野の実験をしていました。何もない状態から立ち上げた実験で、それは良い経験をしました。でも、素粒子物理学の分野では、ICEPPがCERNで大規模な国際実験に取り組んでいて、いつかそういう舞台で活躍したいと思っていました。博士号を取得した後、縁あってICEPPに着任することとなり、ATLAS実験の準備段階から関わることができました。

CERNではATLAS実験のミュオントリガー検出器の建設における、現場監督のような仕事をしました。LHC加速器によって高エネルギーの陽子ビームが衝突すると、膨大なデータが発生します。それらの中から物理解析に有用な事象を選び出す役割をする検出器です。イスラエル、日本、中国、それぞれの国で作成した量くらいの大きさのTGC検出器が、合計で3,600枚程度CERNに送られてきます。我々のチームはそれらの検出器を受け取り、性能の最終チェックをした後に、直径25mもある6枚の巨大な円盤型検出器に組み上げます。

ミュオントリガー検出器は32万ものチ

ャンネルを有する複雑なシステムです。センサーがミュオンの信号を感知し、それらを独自に開発した専用の電子回路で処理します。複数段階を経て処理される各部の動作を正確に理解することで、大規模なシステムを制御できるようになります。

LHCの運転が始まり、最初に周回したビームによって発生した粒子をこのトリガーシステムでとらえたときは、とても嬉しかったです。チーム一丸となり、みんなでアイデアを出し合いながら構築してきたものが想定通りに動き、これまでの成果がその一瞬に結実したという実感があって、とても印象に残っています。

ATLAS実験は、世界中から3,000人ほどの研究者・学生が集まる巨大な研究チームです。日本からも13の大学・研究機関から180人ほどの研究者・学生が参加し、ATLAS日本グループをつくり、活動しています。ICEPPから参加している研究者・学生は30人ほどですが、長年、ヨーロッパの国際的な高エネルギー加速器実験に参加してきた歴史もあり、ATLAS実験の中でも中心的な役割を担っています。現場の最前線に常駐

している教員の数も多く、現地の大学院生と共に研究を進めており、データ収集においても物理解析においても、多くの成果をあげています。ICEPPの研究者は、物理解析・データ収集・計算機など、日本と実験のコアを橋渡しするハブとしての機能を果たし、ATLAS実験グループ全体に対して、日本グループの存在感を高める役割をしてきたと思います。

ランコーディネータとして 合意形成に導く日々

私は2009年8月から2016年3月までICEPPを離れていましたが、2016年4月から再びICEPPで働くことになりました。

2017年と2018年の2年間はATLAS実験全体のデータ収集に全責任を持つランコーディネータとなり、ATLASを代表する立場で働く機会がありました。ATLAS実験を構成する、全てのシステムが正常に動くように常に気を配ります。

この期間、ATLAS実験の仲間だけでなく、LHC加速器のエキスパートや、ライバルでもあるCMS実験の人たちとも議論を戦わせ

る機会が多くありました。ATLASグループとCMSグループがLHCに提案する内容は、相容れないことも多いのですが、内容を精査して互いに理解して、「LHC実験全体で成果を最大化するという高い視点に立って、どんな選択がベストだと思うか」という話に持っていくと、ほとんどの場合、リーズナブルな解決方法が見つかりました。

世の中にはうまく行かないことがたくさんありますが、これらの経験から、最終的に実現したいことについて、お互いの共通点を見い出すことができれば、アプローチが違ってても最終的に合意形成が可能であることを学びました。

2024年からはICEPPの第7代センター長に就任しましたが、話を頂いたときは、正直なところ青天の霹靂といった感じでした。第5代の駒宮幸男さんや第6代の浅井祥仁さんは、圧倒的な高い能力を持ち、強いリーダーシップを発揮して組織を引っ張ったと思います。

私はどちらかというと、そのようなタイプではありません。ICEPPには優秀な人がたくさんいるので、自分の足りない考えを押しつけて、無理矢理強いリーダーの真似事をする意味はないと思っています。私としては、ICEPPのキーとなる研究者とのコミュニケーションを密にして、みんなが挑戦して行きたいことを引き出し、結果として多くの成果をあげていくことを考えてい

ます。

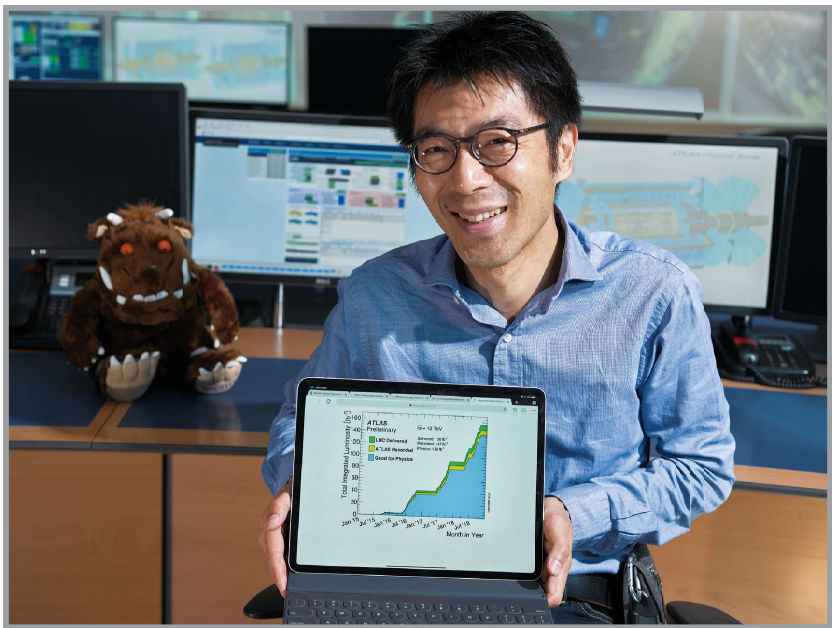
私はこれまでATLAS実験に関わってきました。ATLAS実験は現在、第3期目の運転（Run3）を行いながら、高輝度LHCに向けて準備を進めています。高輝度LHCでは、観測データの量がRun3までの10倍になります。これによって初めてアクセスできる重要な物理課題も多岐に渡ります。今は、新しい成果を長年に渡ってきちんと得られるように、準備を進めることが重要なタイミングです。

MEG実験は、2022年7月からMEG II実験が本格的に始動して、今まさに大きな成果を刈り取ろうとしています。世界一の成果をきちんと出して、さらに実験を進めてもらいたいと期待しています。

量子コンピュータ分野は、浅井前センター長の時代から力を入れて研究を進めてきました。量子コンピュータが効果的に活用される対象は、まだはっきりとはしていませんが、ICEPPでは素粒子分野への応用を目指して、様々な研究を進めているところです。今は幅広く種をまいている段階ですが、早く成果を得られるように努力しています。ひとたび、有望な応用先が見つければ、そこを拡大し、新しい大きな流れに育てていきたいと考えています。

新たなサイエンスを開拓 するための土俵を日本に

©CERN



2012年にLHC加速器を利用した2つの実験によってヒッグス粒子が発見されたことで、素粒子の標準理論は完成しました。しかし、標準理論が究極の理論とはどうしても思えません。標準理論を包括して、より宇宙の真理に近づく新たな理論をつくる必要がありますが、その姿はまだはっきりとは見えていません。

2040年くらいまで運転を続けるLHCから新たな理論のヒントは示される可能性はありますが、新しい理論を構築するためには次世代の加速器、Higgs Factoryが必要です。1つの現実的な解であるILCは、間違いなく次世代のトッププロジェクトとしてこれからの素粒子物理学を牽引していく存在になります。

私自身、標準理論を超える新たな理論を知りたいという思いがあり、2年前からILCの推進活動に関わるようになりました。また、2024年1月には、ILC-Japanの代表者となるスポークスパーソンに就任しました。

ICEPPの歴史は、小柴昌俊先生がドイツのDASP実験に参加したところから始まっています。以来、JADE実験、CERNでのOPAL実験と、ヨーロッパでの国際共同実験で中心的な役割を担い、日本のトップランナーとして走ってきました。

長い時間をかけて、世界の研究者との信頼関係を築いてきたことにより、ATLAS実験で、たくさんの日本の研究者が参加するための土壌をつくりました。日本の大学・研究機関の研究者・学生が世界で活躍するための先鞭をつけたことは、ICEPPの大きな功績の1つです。

現在、ICEPPは、共同利用・共同研究拠点として、国際的な素粒子実験への参加経験のない大学の研究者たちを受け入れ、日本チームとして編成し、成果へとつなげていく役割も果たしています。

現在、たくさんの日本人がATLAS実験で活躍しています。私自身、ランコーディネータとして、ATLAS実験グループの中心で充実した時間を過ごしました。しかし、これはCERNがLHC加速器を作って高い性能で運転してくれた、いわば、他人のつくった土俵で勝負して成果をあげただけとも言えるでしょう。

次は、その土俵を日本につくりたいと考

えています。個人の物理学者としてはILCが世界のどこかにできればとても嬉しいです。しかし、できれば日本につくりたいと切に願っています。

日本にはATLAS実験で活躍している研究者がたくさんいて、大型加速器実験をホストする能力やノウハウが蓄積されています。ILCが日本にできれば、最先端の高エネルギー実験を日本の研究者が中心に進めることになります。私たちにはその準備ができています。そうすれば日本の素粒子物理学のレベルがもう一段上がることになるでしょう。新しい土俵を自分たちでつくり、素粒子物理学の世界を切り開く、新たな成果を日本から発信したいという夢を抱えています。

ILCの建設を実現するためにはたくさんの課題をクリアする必要があります。現在、実現に向けたロードマップを作成していて、理想に近づけるように努力しています。ATLAS実験やMEG II実験から、新たな発見があれば、ILC建設の機運も高まると思いますし、小中高生などの若い世代の人たちが、素粒子物理学を目指すきっかけにもなります。近い将来、世界が驚くような発見をして、ILC建設につながれば最高ですね。

多様なスキルの統合で ひとつの実験を成し得る

素粒子物理学は、目に見えない素粒子を対象に研究する分野なので、専門外の人からは少し難しそうに感じるかもしれませんが、しかし、ICEPPにやって来た大学院生と話



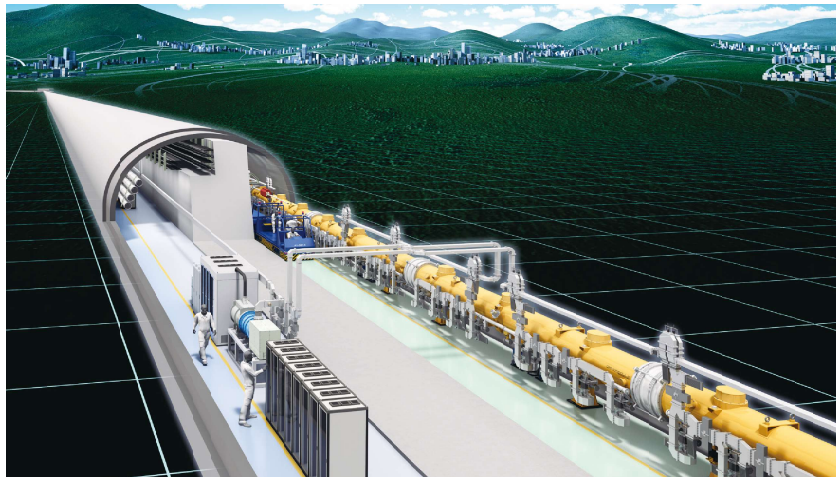
をしてみると、「やってみると素粒子の世界がしっかりと想像できておもしろい」「教科書で読んでいたときとはまったく違った」といった感想をよく聞きます。

私たちが取り組んでいるATLAS実験のような巨大実験では、素粒子物理学の知識だけでなく、超伝導、低温、真空、エレクトロニクス、データ通信、計算機など、多岐に渡る分野の知識が必要で、それぞれの分野の最先端技術が集まっています。しかも、それらの技術を1つのシステムとして統合する必要があります。

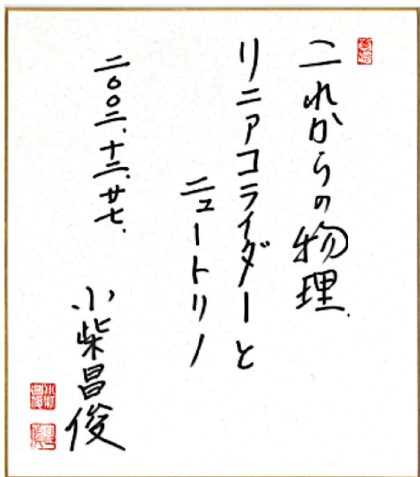
さらに、国際共同研究を成功させるには、世界の研究者たちの中に入り、意見や方針の違いなどについてしっかりと話し合い、お互いに納得する点を探りながら研究を進めるためのマネジメントやコミュニケーシ

ョンの力も必要です。たくさんのスキルが合わさることで、1つの実験が成立しています。このように、様々な国籍の人たちと一緒に1つの目標に向かって研究していける場は、世界中を見渡しても、ほとんどありません。

これからの素粒子物理学を切り開いていくためには、若い人たちの力が必要です。何らかの形で宇宙や素粒子などの興味がある人、様々なテクノロジーに興味がある人、世界の人たちと科学を進めていきたいと考えている人など、様々な人たちが活躍できる場があります。ICEPPや素粒子物理学に少しでも興味があれば、気軽に飛びこんで、一緒に研究する仲間になってもらえたら嬉しいです。



©Rey Hori



数字で見るICEPP

設立から半世紀を経て、ICEPPが築き上げてきた「現在の姿」を数字という視点から紹介します

01

教員数

1974年



3人

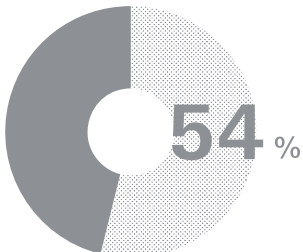
2024年



37人

02

研究室の修士課程学生の
博士課程進学率



(2000-2023年度調べ)

03

論文数



1,648 編

(2010-2023年度調べ)

04

被引用数

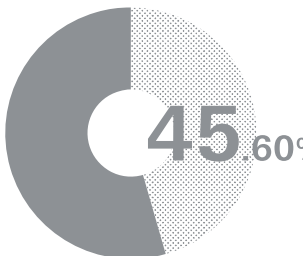


94,452 編

(2010-2023年度調べ)

05

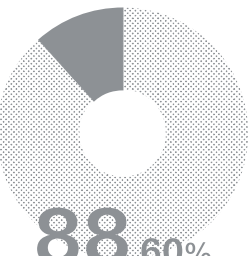
Top10%論文比率 (Q値)



(2010-2023年度調べ)

06

国際共著論文比率



(2010-2023年度調べ)

07

国際共同実験の参加人数
(ATLAS・MEG)



188人

(2023年度までの累計、学生含む)

08

国際共同研究
派遣実績

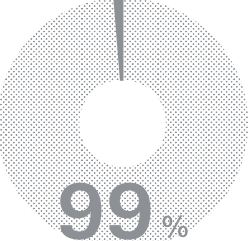


6,531 人・日

(2023年度、学生含む)

09

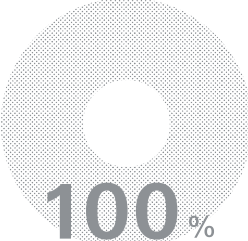
地域解析センター
年間絶対稼働数



(2023年度)

10

地域解析センター
年間運転効率



(2023年度)

11

全国共同利用
ICEPP共同研究課題



延べ355 件

(1994-2023年度調べ)

12

全国共同利用
ICEPPフェロシップ採択人数



延べ54人

(2005-2023年度調べ)

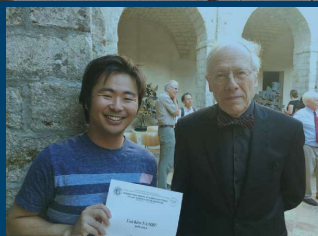
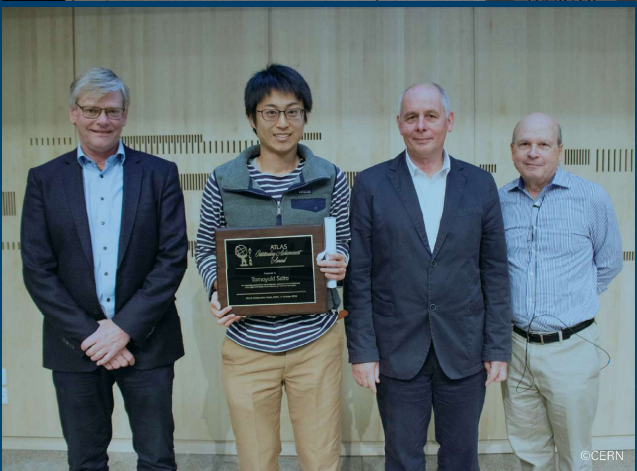
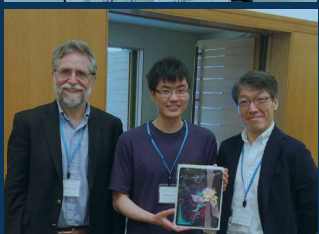
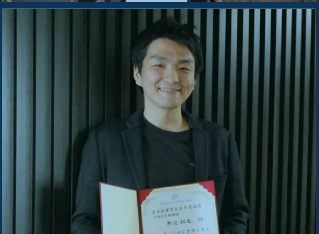
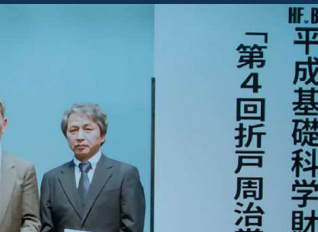
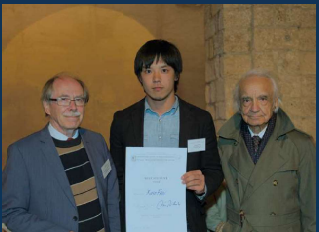
13

全国共同利用
ICEPPシンポジウム参加人数



延べ1,122人

(1994-2023年度調べ)



ICEPPの歩み

西暦 (年度)	沿革	研究業績	各プロジェクトの変遷	
1972	DESYとの国際共同研究を提案			
1973				
1974	理学部附属高エネルギー物理学実験施設を創設 初代施設長 小柴昌俊		DASP実験開始(DESY)	DORIS加速器、DASP検出器の完成
1975		●新しいチャーム中間子の発見		西ドイツ政府がPETRA加速器建設を承認
1976		●チャーム、タウの研究		PETRA加速器の建設開始、JADE実験を提案、 JADEコラボレーションを結成
1977	理学部附属素粒子物理学国際協力施設へ改組 施設長 小柴昌俊			JADE検出器の建設開始
1978				PETRA加速器の完成
1979		●グルーオンの発見	JADE実験開始(DESY)	JADE検出器の完成
1980		●量子電磁力学(QED)の検証		
1981		●量子色力学(QCD)の検証		LEP加速器の建設決定
1982		●トップクォークの探索 ●二光子過程の研究		LEP加速器の建設開始、OPAL実験を提案、 OPALコラボレーションを結成
1983				
1984	理学部附属素粒子物理国際センターへ改組 センター長 小柴昌俊			OPAL検出器の建設開始
1985				
1986				
1987	第2代センター長 有馬朗人			
1988	CERNと学術交流協定書を締結	■Z ⁰ 粒子の大量生成		
1989	第3代センター長 山本祐靖	●素粒子は3世代	LEP OPAL実験開始(CERN)	LEP加速器、OPAL検出器の完成
1990		●Z ⁰ 粒子の精密測定		
1991		●量子補正も含めた電弱統一ゲージ理論の確立 ●トップクォーク質量の予測		LHC承認に向けて実験の公募
1992	第4代センター長 折戸周治	●軽いヒッグス粒子の探索 ●超対称性大統一理論の示唆		ATLASコラボレーションを結成(東大と神戸大が参加) ATLAS実験を提案
1993		●B $\bar{B}$ 振動測定などボトムクォークの研究		
1994	素粒子物理国際研究センターへ改組 文部省の全国共同利用施設に認定			LHC加速器の建設承認(2段階建設) ATLAS日本グループを結成
1995			LEP II OPAL実験開始(CERN)	LEPに超伝導加速空洞を導入し、 加速器エネルギーを約2倍に増強 文部省がLHC加速器の建設協力を表明 (非加盟国のなかでは初)
1996		■W粒子の対生成		非加盟国の建設協力によりLHCを1段階建設に変更、 ATLAS検出器の建設開始
1997		●W粒子の精密測定		
1998		●Z ⁰ より重いヒッグス粒子の探索		
1999		●標準理論ヒッグス粒子の質量に上限・下限値 ●超対称性粒子の探索		PSIにMEG実験を提案、承認
2000	第5代センター長 駒宮幸男	●10 ⁻¹⁷ cmまでの素粒子の構造を探究		LEP加速器の運転終了(衝突エネルギー209GeVに到達) LHC加速器の建設開始
2001	センター内にLHC実験データ解析部門を設置			$\mu \rightarrow e \gamma$ 実験の国際コラボレーションを拡大、 「MEG」と命名
2002	小柴昌俊 ノーベル物理学賞を受賞			
2003	PSIと学術交流協定書を締結			ATLAS検出器を設置する地下100mの実験ホール (ポイント1)が完成
2004	国立大学法人化 素粒子物理国際研究センターを再組織			ATLAS検出器を地下に設置開始 MEG測定器の建設開始
2005	小柴昌俊 東京大学初の特別栄誉教授に CERNとLHCコンピューティングの覚書を締結			
2006				
2007				MEG測定器の完成 センター設置のATLAS地域解析センターが稼働開始
2008				LHC加速器・ATLAS検出器の完成 LHC加速器ビーム周囲に成功(直後に故障で運転停止)
2009				LHC加速器の再稼働
2010	文部科学省より共同利用・共同研究拠点に認定		LHC Run1 ATLAS実験開始(CERN)	LHC加速器7TeVの衝突実験開始
2011		●LHC初期の新物理探索(超対称性、余剰次元) ●ヒッグス粒子の兆候		
2012		●ヒッグス粒子の発見($\gamma\gamma$, ZZ, WWへの崩壊モード)		LHC加速器8TeVの衝突実験開始 PSIにMEG II実験を提案
2013				MEG II実験の承認、MEG実験のデータ収集終了 LHC Run1実験の終了 Run2に向けたLHC加速器、ATLAS検出器のアップグレード
2014				MEG II測定器アップグレード(探索感度10倍に)
2015		●ヒッグス粒子とタウレプトンの結合を観測 ●LHC13TeVデータ初期の新物理探索	LHC Run2 ATLAS実験開始 (CERN)	LHC加速器13TeVの衝突実験開始
2016	文部科学省より共同利用・共同研究拠点に再認定	● $\mu \rightarrow e \gamma$ 崩壊は2.4兆に1回未満		東京大学CERN-LHC研究拠点を現地に構築
2017	第6代センター長 浅井祥仁 CERNと将来計画のFCC研究に関する覚書を締結			
2018		●Run2実験2015-16年データを使った新物理探索 ●ヒッグス粒子とトップクォークの結合を観測 ●ヒッグス粒子とボトムクォークの結合を観測		LHC Run2実験の終了 Run3に向けたLHC加速器、ATLAS検出器のアップグレード MEG II測定器の完成
2019				MEG II測定器の性能評価
2020		●ミューオン崩壊から軽い中性スカラー粒子の探索		
2021	量子AIテクノロジー研究分野を新設 量子ネイティブ育成センターを発足			MEG II測定器のフルエンジニアリングラン
2022	文部科学省より共同利用・共同研究拠点に再認定	●ヒッグス粒子とミューオンとの結合を示唆	LHC Run3 ATLAS実験開始(CERN)	PSIにPIONEER実験(新実験)を提案、承認 LHC加速器13.6TeVの衝突実験開始
2023				
2024	第7代センター長 石野雅也			
2025				
2026				LHC Run 3実験の終了(予定)
2027				
2028				
2029				HIMB計画(PSI)始動予定 ミューオンビームを 100倍以上増強
2030			HL-LHC(CERN)始動予定 陽子衝突頻度が約3倍に増強	HL-LHC実験開始(予定)

