ヨーロッパの科学技術における国際協力
ー LHC 実験とヘルムホルツ協会（EMMI）を中心に

日本語解説

長崎総合科学大学

2017 年 3 月 21 日

長崎総合科学大学　新技術創生研究所国際セミナー
「世界で活躍する技術者育成を目指して」
～ドイツに学ぶマイスター&研究者育成法～

講演者紹介

ピーター・ブラウン＝ミュンツィンガー教授
（Prof. Dr. Peter Braun-Munzinger）
原子核物理学者。主な研究対象はクォーク・グルーオン・プラズマ（QGP）。これまで米ブルックヘブン国立研究所（BNL）、独ヘルツホルム協会[1]重イオン研究所（GSI）、欧州原子核研究機構（CERN）ALICE 実験等に在籍。

ホルムヘルツ協会極限物質機関（EMMI）科学理事（2008–）、ALICE 共同研究委員会議長（2011–）、学術雑誌『Nuclear Physics A』監督編集者（2012–）、ハイデルベルク大学名誉教授（2014–）等。

[1]正式名称：ドイツ研究センターヘルムホルツ協会

First a few remarks about German/European Science funding

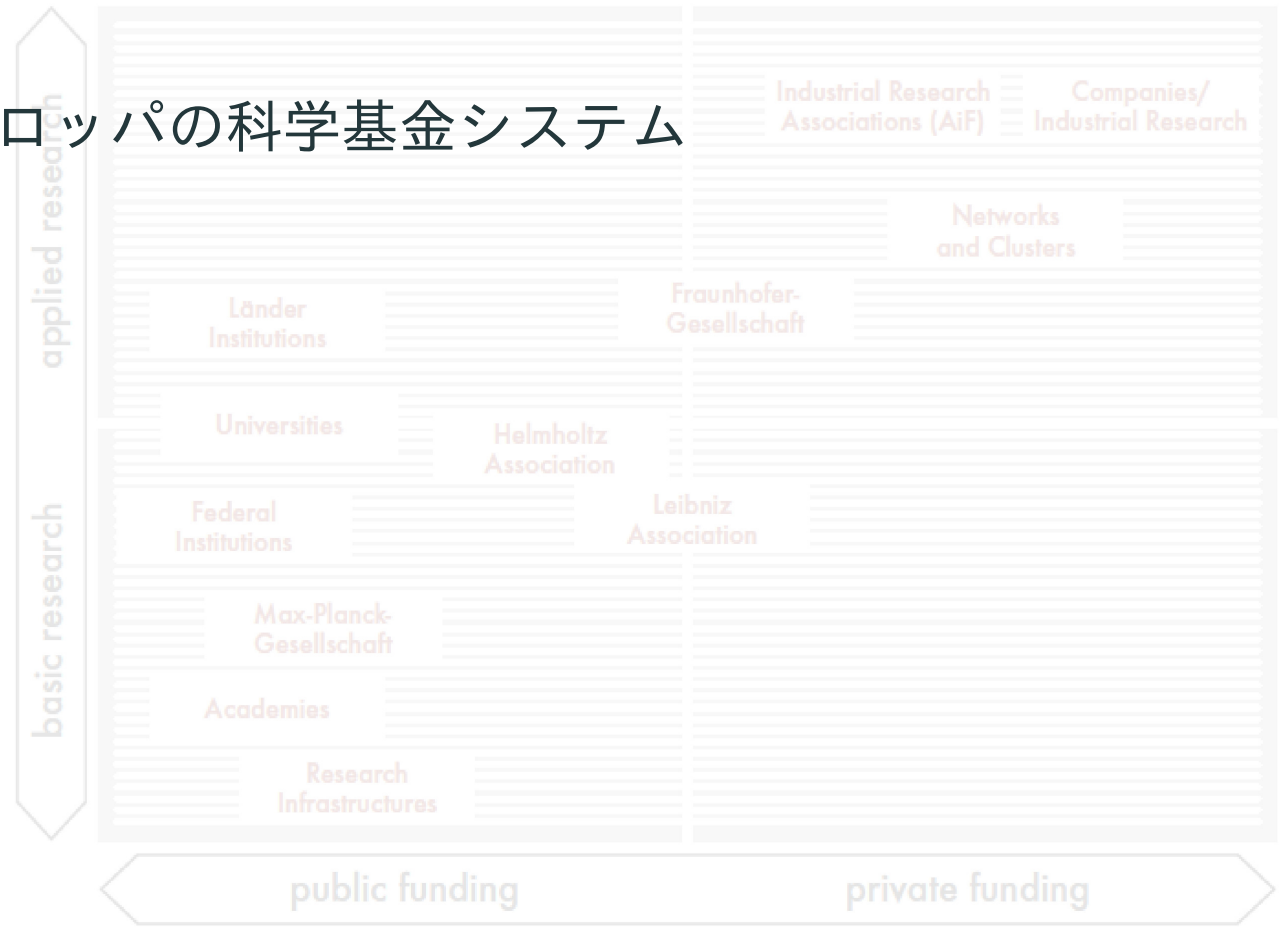
最初に、ドイツ/ヨーロッパの科学基金についていくつかの注釈

German and European Science Funding System

Overview of Research Performing Organisations in Germany

Research institutions differ in terms of their type of research (basic/applied) and financing (public/private).

ドイツとヨーロッパの科学基金システム



ドイツにおける研究

- 研究開発予算全体：年間 800 億ユーロ（~9.6 兆円）
- 高等教育機関：年間 140 億ユーロ（~1.7 兆円）
- 国立研究所：年間 120 億ユーロ（~1.4 兆円）

2 つの例：ケーススタディとして

- The ALICE Experiment at the CERN Large Hadron Collider
- The ExtreMe Matter Institute EMMI: an example of a Helmholtz Alliance

- 欧州原子核研究機構（CERN）の LHC（Large Hadron Collider; 大型ハドロン衝突型加速器）で行われている ALICE 実験
- EMMI（ExtreMe Matter Institute; 極限物質機関）ヘルムホルツ協会の例

ALICE（LHC）：科学的な着想と焦点

相対論的（光速に近い速度で動く）重い原子核の衝突による、ビッグバンのマイクロ秒後に存在した物質の生成

実験室での「リトルバン」を通してビッグバンにおける物質の性質を研究する

ALICE：42 ヶ国から集まった 174 もの科学研究機関による協力

協力している科学者の総数は 1800 人を超える

特別な焦点：いかにして ALICE 実験の大型副検出器を構築するか：ALICE TPC

For such a major sub-detector project one needs:

このような大型の副検出器プロジェクトのために、次のようなものが必要だった：

- A clear idea concerning the physics and technical requirements
  - ・物理学的・技術的要求についての明確なアイデア
- A scientifically and technically strong (international) collaboration
  - ・科学的かつ技術的な優れた（国際）協力
  - ・必要な資金と労働力の適切な推定
- A good estimate of the funds and manpower required
  - ・必要な資金を調達する上での計画
- A plan how to raise the necessary funds

このような科学者の国際協力はいかにして行われているのか？

1. ゆるやかで横並びの管理構造
2. 合意による運営
3. ホスト機関（CERN）による資金的・技術的監修
4. 自発的なスタッフ
5. 成功も失敗も共有する
6. 科学と予定表に焦点を置き続ける

Next: an overview of the project

次：プロジェクトの概要

LHC：世界最高水準の高エネルギー粒子加速器

髪の毛ほどの大きさ（長さ 10 cm、直径 25 µm）の 10^{11} 個の陽子の束が円周 27 km の輪を周回し、25 ns 毎に衝突する

- もし、この陽子と光が LHC を回って競争したら、光が 0.2 mm だけ先を行くが、問題はエネルギーであり、速度ではない
- 衝突するそれぞれの陽子ビームは 150 km/h の新幹線に比類するエネルギーを帯びている — しかしビームは交差の度にその 10^{-11} ほどのエネルギーを失うのみである
- 鉛原子核の各衝突で莫大なエネルギーが解放され 10000 を越える粒子（ハドロン）が生成される

LHC — 世界最高の技術的挑戦

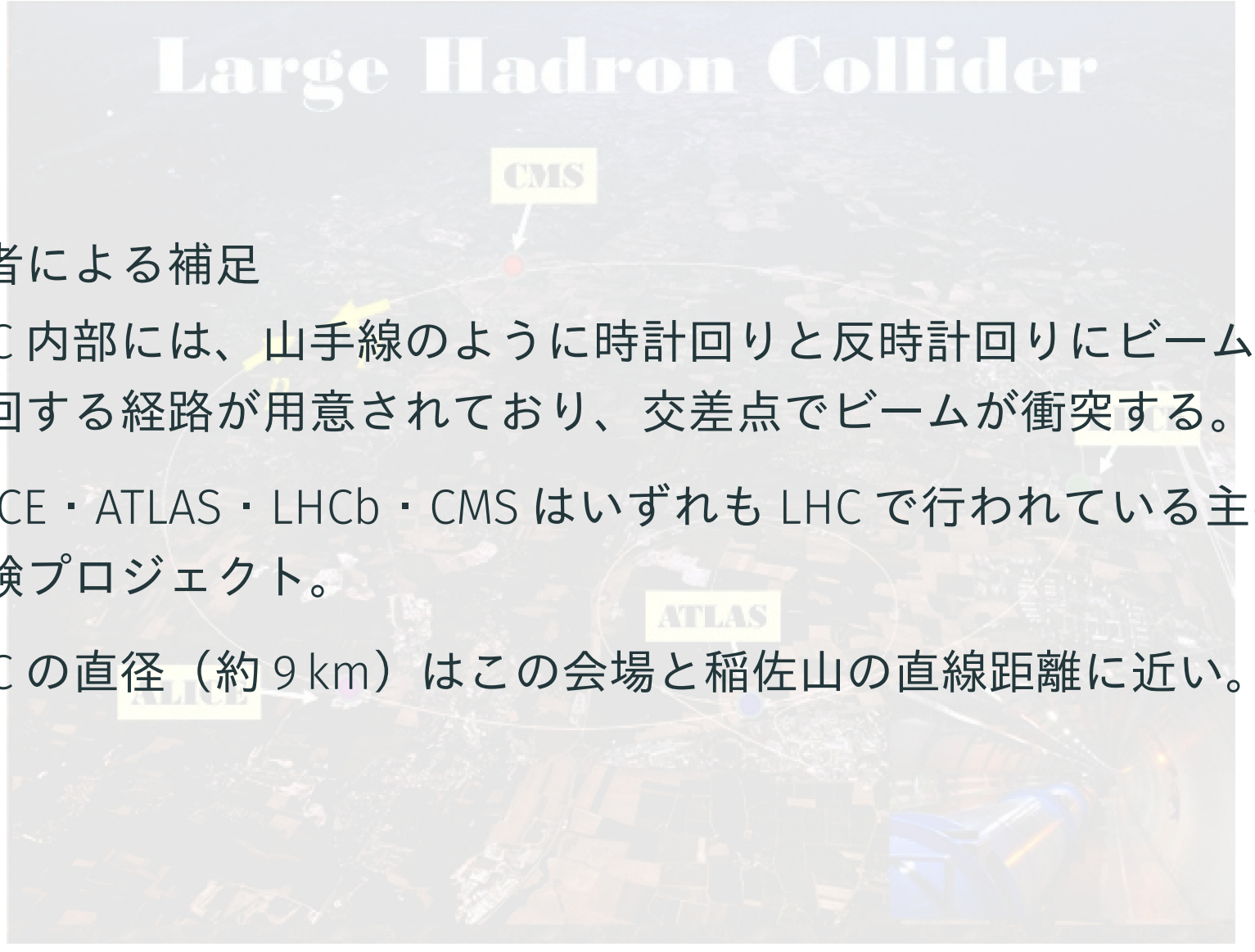
1232 個の超伝導ダイポール磁石

8 テスラの磁場

1.9 ケルビン、700,000 リットルのヘリウム

円周 27 km

上空から見た LHC



訳者による補足

LHC 内部には、山手線のように時計回りと反時計回りにビームが周回する経路が用意されており、交差点でビームが衝突する。

ALICE・ATLAS・LHCb・CMS はいずれも LHC で行われている主要実験プロジェクト。

LHC の直径（約 9 km）はこの会場と稲佐山の直線距離に近い。

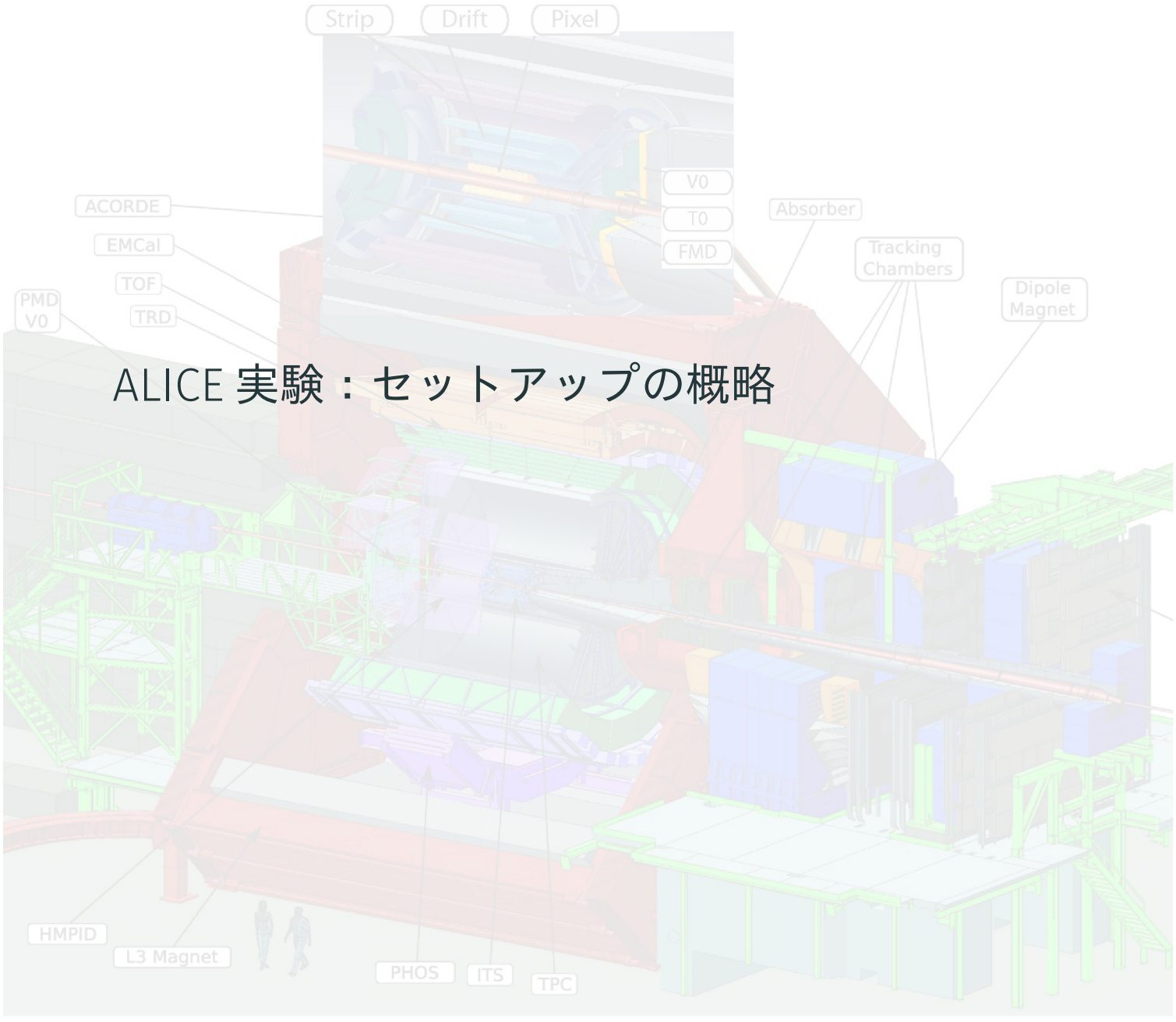
LHC 実験計画の始まり

2009 年 11 月 23 日：$\sqrt{s} = 900\,\mathrm{GeV}$[2]での最初の陽子–陽子衝突

2009 年 12 月 6 日：$\sqrt{s} = 2.36\,\mathrm{TeV}$ での陽子–陽子衝突

2010 年 3 月 30 日：$\sqrt{s} = 7\,\mathrm{TeV}$ での陽子–陽子衝突

[2]訳者注：$\sqrt{s}$ は LHC のような粒子加速器で使われる衝突エネルギーの指標。電子ボルト（eV）はエネルギーの単位で、1 GeV は 10 億電子ボルト。また、1 TeV は 1 兆電子ボルト。



ALICE 実験：セットアップの概略

プロジェクトの対象

ALICE Time Projection Chamber (TPC)

総投資額：1500 万ユーロ（~18 兆円）

総人的資産：200 人年以上

ベルゲン大学、ブラチスラヴァ大学、CERN、コペンハーゲン大学、ダルムシュタット大学、ハイデルベルク大学、フランクフルト大学、GSI、クラクフ大学、ルンド大学

8 ヶ国からの投資機関

50 人の科学者の共同作業、ライン管理なし

プロジェクトは建造と稼動に 7 年を要した

ALICE の TPC

TRD

電子同定のための大面積 TRD（Transition Radiation Detector; 遷移放射検出器）

TPC

Time Projection Chamber

大容量・高解像度・高頻度な飛跡追跡装置

ITS

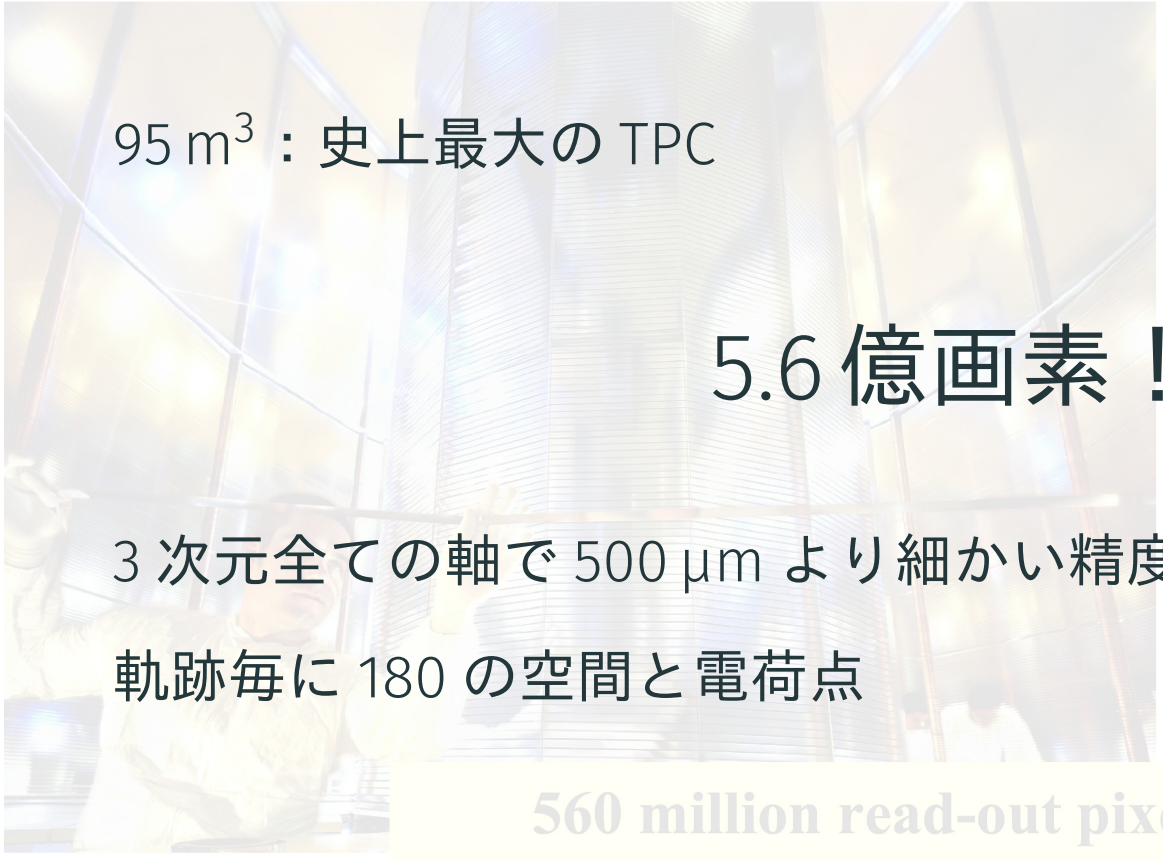
6 層のシリコンセンサーによって構成されるバーテックス検出器

ALICE TPC — LHC における 2 つの鉛原子衝突によって生成される 5000 を越える荷電粒子の飛跡を記録する高速画像化装置

created in a collision of 2 Pb nuclei at LHC

with 95 m^3 the largest TPC ever

ALICE



$95\ m^3$：史上最大の TPC

5.6 億画素！

3 次元全ての軸で 500 μm より細かい精度

軌跡毎に 180 の空間と電荷点

560 million read-out pixels!

precision better than 500 μm in all 3 dim.

180 space and charge points per track

Working inside before completion of the TPC

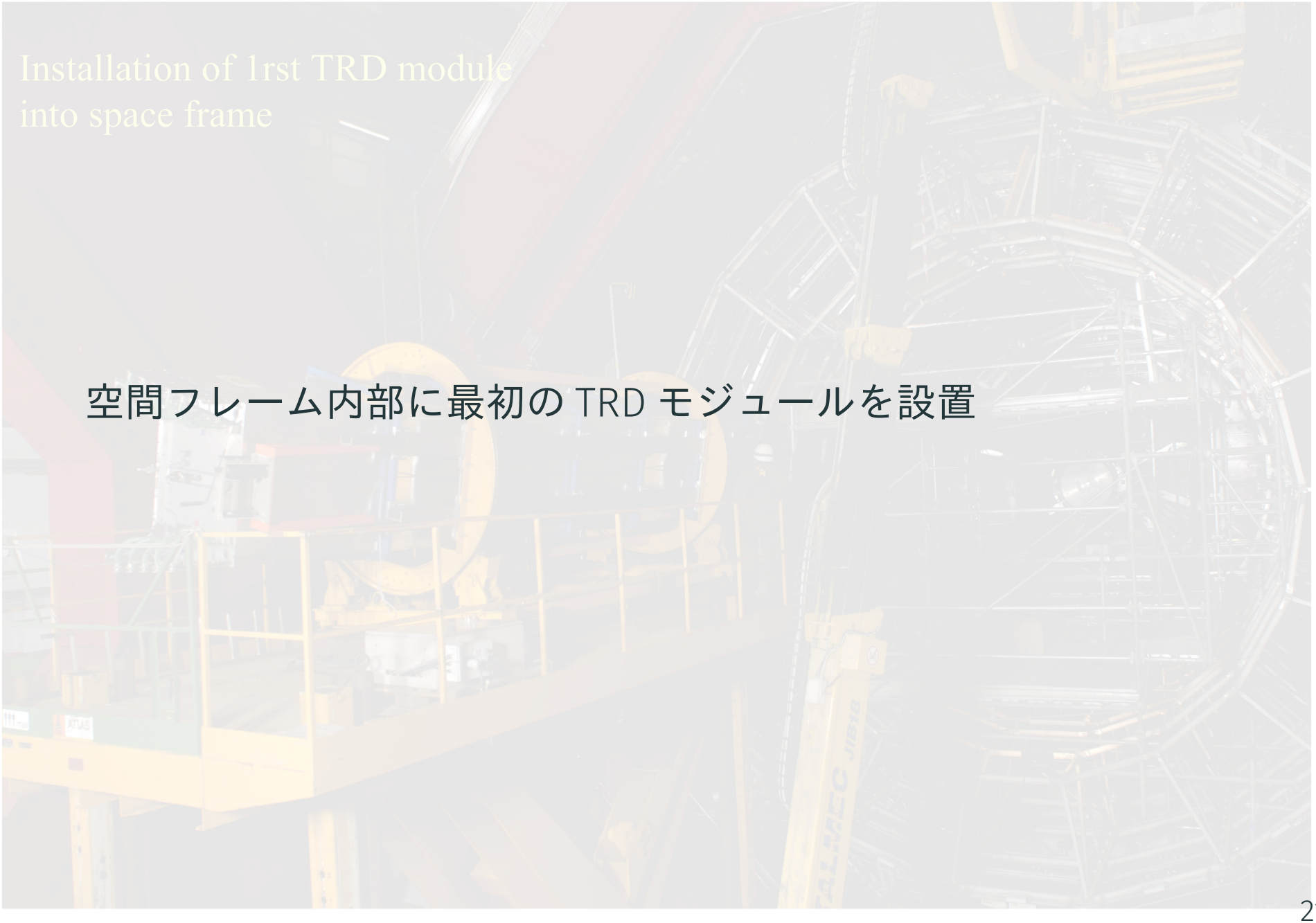
完成前の TPC 内部での作業

complete and calibrated!

完成、そして調整完了！

ITS russian dolls - sliding the SSD/SDD over the SPD

ITS のマトリョーシカ：SSD と SDD を SPD に覆い被せる



Installation of 1rst TRD module
into space frame

空間フレーム内部に最初の TRD モジュールを設置

$\sqrt{s} = 2.76$ A TeV での LHC 初の鉛–鉛衝突

setup for ion collisions: November 4
first collisions with stable beams:
November 8 until Dec 6

already in Dec 2010
5 publications in PRL and PLB

イオン衝突のセットアップ：11 月 4 日

安定ビームでの初衝突：11 月 8 日から 12 月 6 日まで

12 月 10 日には 5 報が PRL と PLB に

このようなプロジェクトを組織するのに何が必要か？（1）

1. 一般的なアイデアと科学的に傑出し、専心した協力
2. プロジェクトの構造と調整
3. プロジェクトの技術的フォローアップとマイルストーン
4. プロジェクトを内包する実験の技術委員会と管理委員会による月例レビュー

What is needed to organize such a project? (II)

1. an organizational structure from the host laboratory (CERN)
   a) for technical oversight on a monthly basis
   b) for budgetary oversight on a bi-yearly basis

2. after approval of scientific part at CERN parallel application for funds by all partners

このようなプロジェクトを組織するのに何が必要か？（2）

CERN scientific committees

Scientific Policy Advice to CERN Council

SPC - Scientific Policy Committee

Approval of Experiments at CERN

RB - Research Board
- General Conditions applicable to all Experiments at CERN (updated Feb. 2008)

CERN の科学委員会

Experimental Committees

INTC - ISOLDE-Neutron Time of flight experiments Committee (formerly ISC)
LHCC - The Large Hadron Collider experiments Committee
SPSC - The SPS and PS experiments Committee

CERN Resources Committees

Resources Review

CERN の資源委員会

LHC RRB - LHC Resources Review Boards

Convened by CERN Director of Research
Members: for each major project:
1 representative plus 1 physicist of each funding agency

Lesson from project TPC

a complex project requiring cooperation of 8 different funding agencies and 10 institutions was realized in time and on budget

1 yearly budget review by funding agencies and CERN

TPCプロジェクトからの教訓

loose and horizontal management structure

technical follow-up by CERN

largely self-motivated staff – share successes **AND** problems/failures

groups deliver in-kind and cash contributions

minimal number of written reports – keep groups focused on delivering the final product

2nd case – the ExtreMe Matter Institute EMMI

An alliance in the framework of the Helmholtz Association (HGF)

第二の例：EMMI（ExtreMe Matter Institute; 極限物質機関）

ExtreMe Matter Institute EMMI

www.gsi.de/emmi

GSI

EMMI

- founded in 2008 in framework of Helmholtz Alliance (2008 - 2015)
  Cosmic Matter in the Laboratory

HELMHOLTZ | ASSOCIATION

Alliance on Cosmic Matter in the Laboratory

- now continued as part of GSI:
  taking the momentum of the alliance into the future

... and its Partners

EMMI の協力機関

Organisation

13 **Partner Institutions**

Management:

Scientific Director: Peter Braun-Munzinger

Scientific Coordinator: Carlo Ewerz

+ administrative support

32 further experts as **Associated Partners**

Steering Committee (representatives of Partners)
as main steering body

Scientific Advisory Committee (8 external experts)

組織

Main Research Areas of EMMI

Matter under extreme conditions of temperature, density and pressure, in particular

- quark gluon plasma and phase diagram of QCD & new hadronic states
- neutron matter
- plasma physics
- atomic physics and ultracold gases

… and related topics

Aim:
bringing together the best minds from these communities

EMMI の主要研究分野

Emergence of common concepts

Common structures and underlying theoretical concepts for these strongly coupled systems, for example

- from BEC to BCS
- from QGP to ultracold Fermi gases
- from conformal field theory to QCD via black holes (AdS/CFT)
- from neutron star matter to strongly coupled electromagnetic plasmas
- hydrodynamics, turbulence, ...
- ...

共通するコンセプトの出現

Goals

目標

central goal of EMMI:

act as think tank & provide intellectual environment
for extreme matter research (at GSI and beyond)

aiming at:

- interdisciplinary scientific events of highest quality
- strong promotion of early-career researchers
- network among two Helmholtz centres and
  eleven top national and international laboratories and
  universities

EMMI Scientists

- more than 100 senior researchers participating in EMMI, more than 400 scientists in total

EMMI の科学者

- 14 new positions (professorships / tenured) created by partners:
  - 10 at TUD, F, MPI-K, MS, HD, LBNL
  - 4 EMMI Fellow positions at GSI

- EMMI supported PhD students associated with surrounding graduate schools (H-QM, HGS-HIRe, HGSFP)

EMMI Programs

- EMMI Workshops
- EMMI Programs
- EMMI Rapid Reaction Task Force meetings (RRTFs)
- joint workshops with ECT* Trento

EMMI の計画

- Visiting Professor program
- Visiting Researcher program

Interdisciplinary Events: examples

学際領域のイベント：例

EMMI RRTFs

- concentrates on focussed problem in intense discussion
- 15 - 25 expert participants
- aim: summary of results, optimally with publication on arXiv and/or in journal

defining the research environment -- extreme matter

研究環境の定義 ー 極限物質

extreme matter

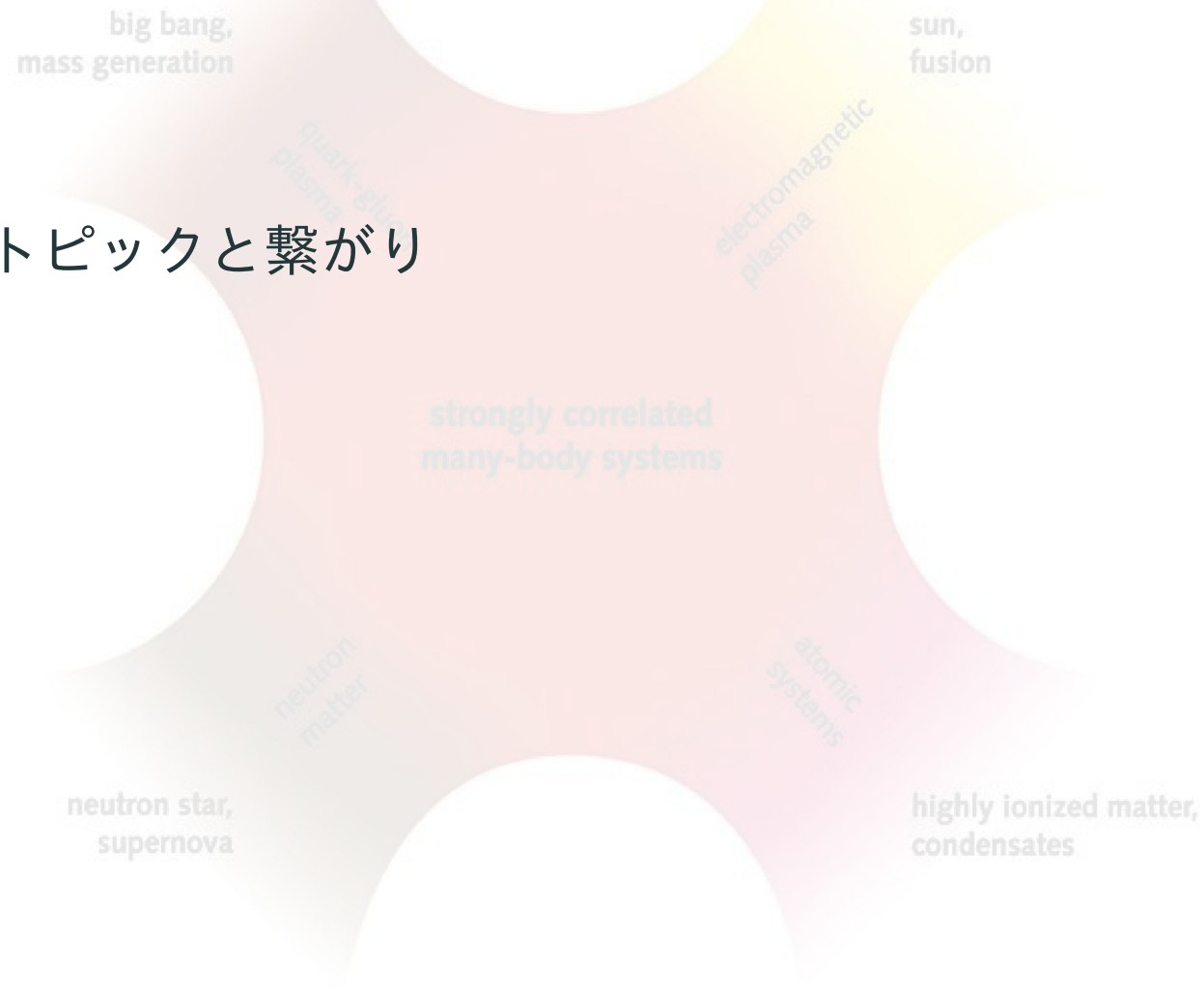
matter under extreme conditions of
temperature, pressure, density

involving many different fields of physics

Physics Similarities and Synergies over a huge Temperature – Density Regime

超高温における物理学的な相似性と相乗効果 ― 密度状態

Scientific Topics and Links



科学的なトピックと繋がり

EMMI Research

In EMMI are organized more than 400 scientists from the 13 partner institutions

About 15 EMMI Visiting Professors per year in the EMMI partner institutions

About 300 publications/year and 100 articles in conference proceedings per year

About 15 workshops of various formats per year

EMMI の研究

Summary EMMI

keep bureaucracy minimal

provide simple structures with efficient financial management

for interdisciplinary projects mix ideas not necessarily technical issues

EMMI の要約

EMMI as model for effective cooperation across borders

Other collaborations in physics

4 collaborations world-wide using special high performance computers to solve quantum field theories on a discrete lattice of space and time

物理学におけるその他の協力

organized very similarly as experimental projects

mixture of theoretical research and developing special tools for networking and computing

Overall summary

In physics there are many successful international collaborations
Collaborations may involve from 20 – 2500 members
All are organized along similar patterns.

全体の要約

1. a major scientific or scientific-technical goal

2. an organizational structure building on consensus
   generally no line management

3. independent scientific and technical oversight on a regular basis

4. financial oversight via resources review boards

… but

Don't forget scientific and technical excellence !

しかし