

日本の核物理の将来WG 代表者会議

ハドロンWG中間報告

石川貴嗣(東北大)、板橋健太(理研)、江角晋一(筑波大)
大西宏明(理研)、小沢恭一郎(東大)、慈道大介(京大)
菅谷頼仁(阪大)、住浜水季(岐阜大)、成木恵(KEK)
新山雅之(京大)、武藤亮太郎(KEK)
森野雄平(阪大)、安井繁宏(KEK)
世話人:中野貴志(阪大)

ハドロン物理実施場所一覧

• 日本国内

- KEK-PS, J-PARC : hadron beam, low momentum p,K,p
primary proton (30 GeV)

- SPring-8 : γ beam

- ELPH: γ beam

- KEKB/Belle

- RIBF

• 国外

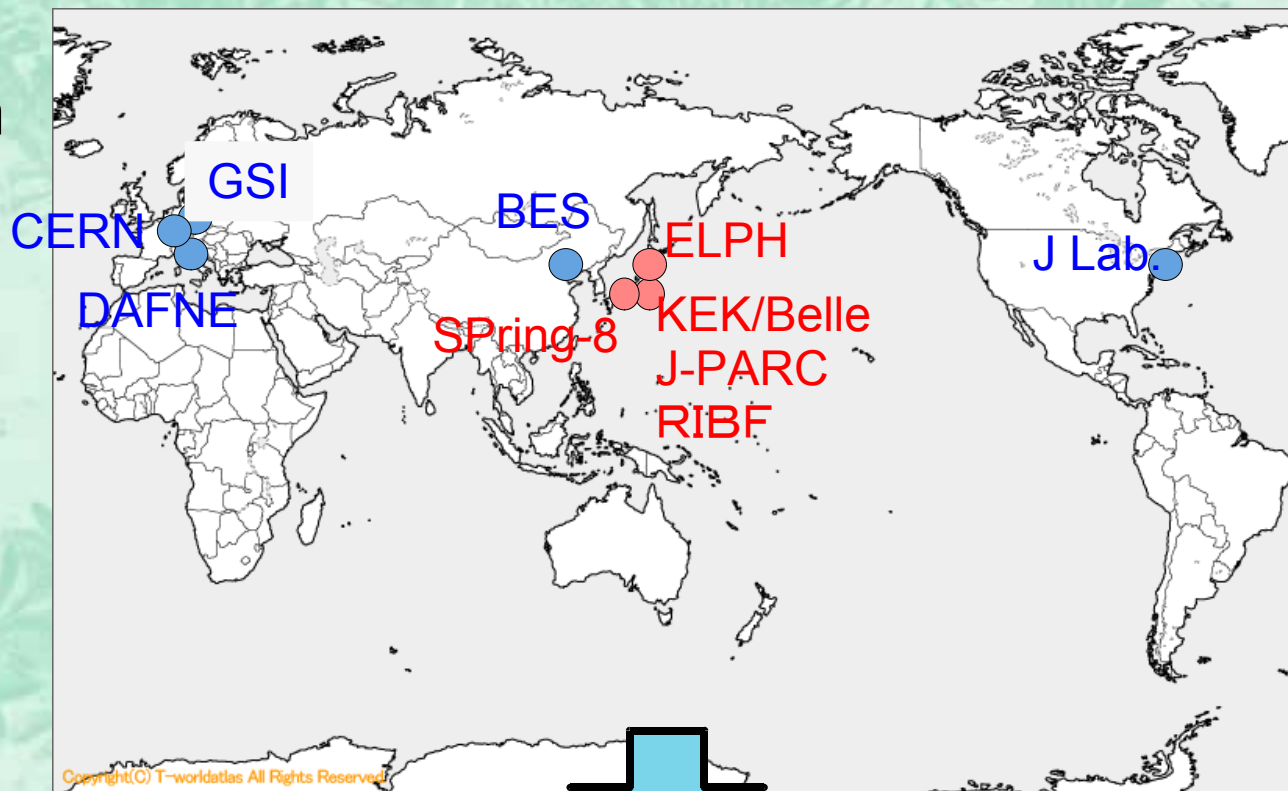
- Jefferson Lab.

- GSI (FAIR)

- BES

- DAΦNE

- CERN/PS, SPS



どのような研究が行われ
何が明らかにされてきたか？

設定した基本的な問題

- なぜ これだけの予算、人、時間を使って
ハドロン物理をしているのか？何を目指しているのか？

設定した基本的な問題

- なぜ これだけの予算、人、時間を使ってハドロン物理をしているのか？何を目指しているのか？
- 何が知りたい、何がわかっている、何が足りない？を本当に理解しているのか？
- 11月WG発足～今日（おそらく4月まで）までの方針
 - まずは 現在わかっていること、興味があることについて 徹底的に調べ 議論し ”ハドロン物理” の目指す目標を明らかにする
 - 議論することで、ハドロン物理を推進していこうとするメンバーのネットワークを強固にする
 - 究極には、WG議論が発端で実験プロポーサルを作っていけたら良いのでは
 - 必要な新たな設備、施設を作っていくための提案を行う推進母体となる

これまでの経緯

計6回のWG ミーティングを実施
内3回 トピックスを決めて議論

Tuesday 30 November 2010







[top↑](#)

- | | | |
|-------|---|-------------------------|
| 16:00 | ハドロン分子状態についてのお話 (20')   | Daishuke Jido |
| 16:20 | ハドロン物理におけるチャーム・ボトムクォークについて (20')   | Shigehiro Yasui (KEK) |
| 16:40 | ϕ メソン (20')   | Hiroaki Ohnishi (RIKEN) |
| 17:00 | K+N 弾性散乱実験 (20')   | Takatsugu Ishikawa |

ハドロン分子状態、
チャームクォーク、 ϕ 中間子

Wednesday 12 January 2011







[top↑](#)

- | | | |
|-------|---|---------------------------|
| 14:00 | 原子核内カイラル対称性の部分的回復 (20')   | Hatsuda (Univ. of Tokyo) |
| 14:20 | 原子核内カイラル対称性の部分的回復 - 実験 (20')   | Satoshi Yokkaichi (RIKEN) |
| 14:40 | ハドロンホールのビームライン 現状とこれから (20')   | Ryotaro Muto (KEK) |

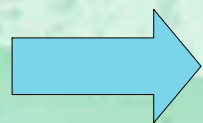
核物質中の
カイラル対称性特集

Wednesday 09 February 2011

[top↑](#)

- | | | |
|-------|---|------------------------------|
| 14:00 | Hadron Resonances and Electromagnetic Meson Production Reaction (20')   | Toru Sato (Osaka Univ.) |
| 14:20 | Resonances with hidden ss-bar (20')   | Mizuki Sumihama (Gifu Univ.) |
| 14:40 | 東北大学電子光物理学研究センターでの光生成反応実験 (20')   | Takatsugu Ishikawa |

Baryon resonance
(γ beam 実験)



3月2日 は ペンタクォーク特集
4月はHadron Physics @ KEKB/Belle

答えるべき問題、疑問：ハドロン物理

- ハドロン(バリオン、メソン)ってなに？
 - ハドロンの内部構造？
Quark-quark correlation, di-quark in hadron, exotic hadron の正体？ハドロン内を記述する準粒子
 - Hadron interaction \leftrightarrow quark interaction 階層の境界？
 - ハドロンの大きさって測れる？
 - Exotic hadron の存在意義
(ハドロン相関？、カラー3表現や6表現の役割？)

答えるべき問題

11月30日、慈道さん

ハドロン分子状態

ハドロン：クォークの束縛状態（クォークのダイナミクス）

ハドロン分子状態

ハドロンが構成要素（入れ子構造）

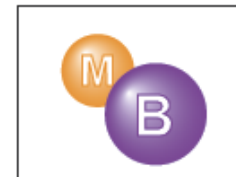
ハドロンのダイナミクスで束縛

ハドロン間距離 > 閉じ込めのサイズ

典型的なハドロンより大きなサイズ

例) 原子核：バリオンの束縛状態

${}^3\text{He}$, triton (NNN), hypertriton (Λpn)



中間子を構成要素として持つもの

崩壊幅をもつ共鳴状態（準束縛状態）

中間子の数は保存しない 吸収による崩壊モード

より軽い中間子 (π) への遷移

構成要素は実粒子

核子の π 雲のようなものとは異なる

しきい値近傍の物理

$\Lambda(1405)$



$\bar{K}NN$



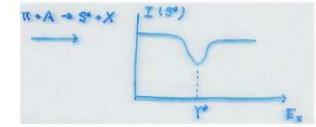
佐藤透さん(阪大)

Hadron Resonances and Electromagnetic Meson Production Reaction

Particle	Γ (MeV)	Λ (fm)	Prod. Reaction
$\Lambda(1116)$	-	-	(K^-, π) (π, K)
$\Sigma(1190)$	-	-	(K^-, π) (π, K)
$\Xi(1320)$	-	-	(K^-, K) (π, KK)
$\Omega(1670)$	-	-	(K^-, KK)
$\Lambda_s(1405)$	40	3.5	(K^-, π) (π, K)
$\Lambda_s(1520)$	15.6	8	(K^-, π) (π, K)
$\eta(548)$	10^{-3}	10^5	(π, N) (K^-, Λ)
$\omega(783)$	9.8	2.6	(π, N) (K^-, Λ)
$\eta'(958)$	0.24	86	(π, N) (K^-, Λ)
$f_0(975)[S^*]$	33	6	(π, N) (K^-, Λ)
$\phi(1020)$	4.2	46	(π, N) (K^-, Λ)

90年代の核物理 ~ 1988?
(Hadron Physics with GeV proton beam)

multi-quark hadron --- molecular state
gluon degrees of freedom
strangeness in nucleon



f_0 (K bar(K)) production in nuclei

FOREST を使った実験
中性子標的の η 光生成反応で観測される核子共鳴 $N^*(1670)$
(東北大核理研、CB-ELSA、GRAAL)

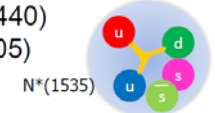
T. Ishikawa, 2011/02/09

住浜さん 岐阜大
Mass-reverse problem of three quark model

$uud(L=1) \frac{1}{2}^- : S_{11}(1535)$ *should be the lowest*
 $uud(n=1) \frac{1}{2}^+ : P_{11}(1440)$
 $uds(L=1) \frac{1}{2}^- : \Lambda^*(1405)$
 harmonic oscillator : $E = (2n + L + 3/2) h\omega$

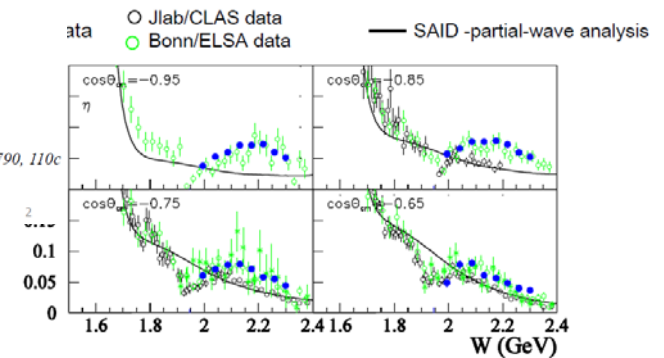
◆ $+q\bar{q}$ pair solve this problem

$uud[s\bar{s}] : S_{11}(1535) \rightarrow$ strong coupling to ηN
 $uud[d\bar{d}] : P_{11}(1440)$
 $uds[u\bar{u}] : \Lambda^*(1405)$



B. S. Zou, NPA790, 110c

Differential cross sections $d\sigma/d\Omega$ vs. W η



Wide structure is seen above $W=2.0$ GeV

光子ビームでの baryon resonance search



マルチクオーク状態への道?
「バリオンそのものの記述」



ハドロンを記述する準粒子は何か?

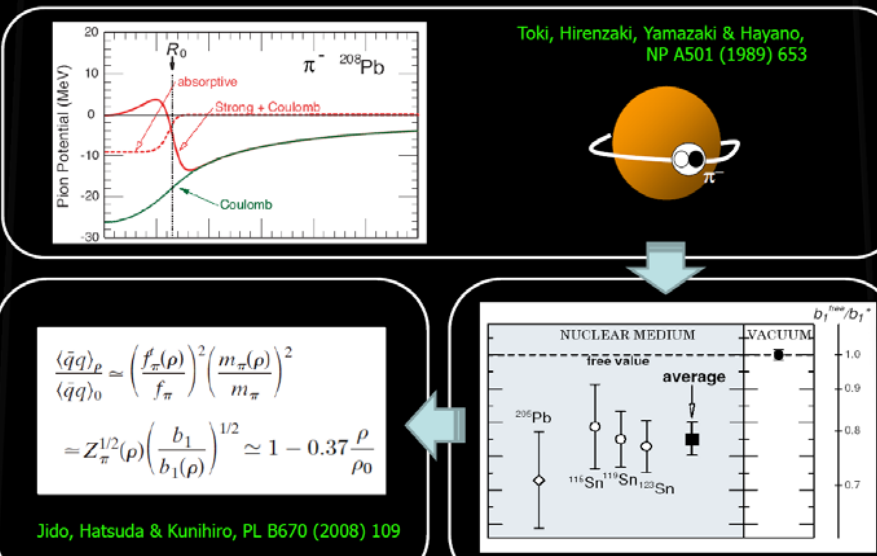
答えるべき問題

- ハドロン(バリオン、メソン)の問題
 - ハドロンの内部構造？
Quark-quark correlation, di-quark in hadron, exotic hadron の正体？ハドロン内を記述する準粒子
 - Hadron interaction \leftrightarrow quark interaction 階層の境界？
 - ハドロンの大きさを測れる？
 - Exotic hadron の存在意義
(ハドロン相関？、カラー3表現や6表現の役割？)
- ハドロンをプローブとして見る有限密度QCDの世界
 - 有限密度環境下でのハドロン(メソン/バリオン)の性質が変化？
 - 媒質中でカイラル対称性の自発的破れって測定できる
 - 質量？ decay constant (f_π)？
 - カイラル対称性が破れて得た「クォーク凝縮」と質量の関係は自明ではない (初田さん)

答えるべき問題、疑問

実験的な取り組み

Dim.3 chiral condensate from pionic atom



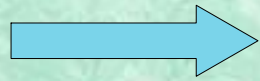
Toki, Hirenzaki, Yamazaki & Hayano, NP A501 (1989) 653

$$\frac{\langle \bar{q}q \rangle_\rho}{\langle \bar{q}q \rangle_0} \approx \left(\frac{f_\pi(\rho)}{f_\pi} \right)^2 \left(\frac{m_\pi(\rho)}{m_\pi} \right)^2$$

$$= Z^{1/2}(\rho) \left(\frac{b_1}{b_1(\rho)} \right)^{1/2} \approx 1 - 0.37 \frac{\rho}{\rho_0}$$

Jido, Hatsuda & Kunihiro, PL B670 (2008) 109




Suzuki et al., PRL 92 (2004) 72302

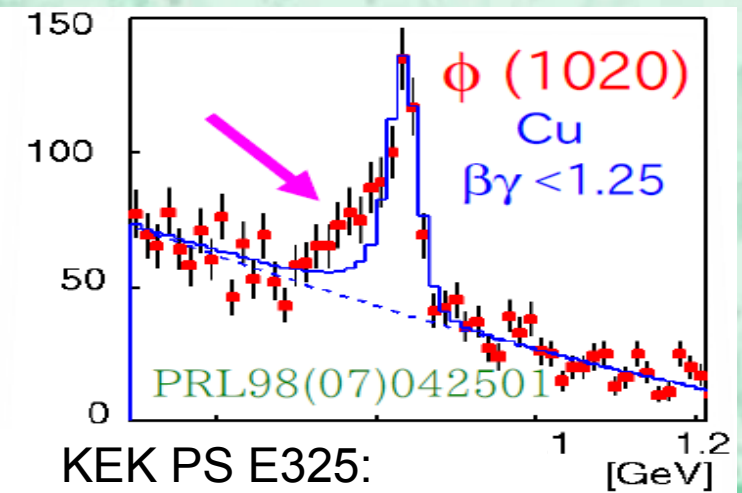


- New generation experiment
- J-PARC E16 (四日市さん)
 - ϕ meson mass shift
 - NP0802-RIBF54 (板橋さん)
 - pionic atom
 - J-PARC E26(小沢さん)
 - ω meson in nucleus
 - J-PARC E29 (大西)
 - ϕ meson bound state

初田さん

Chiral symmetry and In-medium hadrons :

-  Spectral difference between chiral partners
 - π - σ , ρ - a_1 , ω - f_1 , etc
 - No experiment
 - Determination of D=6 chiral condensates in the vacuum?
 - Tau-decay in nuclei?
-  Individual properties of NG and "Higgs" bosons
 - π , K, η (NG), σ (Higgs), η' (anomaly)
 - Mesic nuclei
 - Dipion
 - $\sigma \rightarrow 2\gamma$, $\eta \rightarrow 2\gamma$, $\eta' \rightarrow 2\gamma$
-  Individual properties of vector bosons
 - ρ , ω , K^* and ϕ
 - Dileptons
 - Hadronic decay
 - Precision/systematic studies (dispersion relation, different targets, ...)



難しい測定だらけ。実現できる？ 10

答えるべき問題、疑問

- 新しい方向性

- Charm quark in hadron, in nucleus は新しい物理を開くのか？

- Charmed baryon, Charmed meson, tetra quark?

- charm quark を key として u-d-s quark (SU3) の世界を理解することができないか？

答えるべき問題、疑問

- 新しい方向性

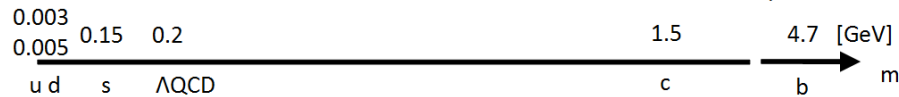
- Charm quark in hadron, in nucleus は新しい物理を開くのか？

- Charmed baryon, Charmed meson, tetra quark?

→ charm quark を key として u-d-s quark (SU3) の世界を理解することができないか？

ハドロン物理におけるチャーム・ボトムクォークについて

安井繁宏 日本の核物理の将来・ハドロングループ2010.11.30@U. Tokyo



Chiral symmetry SU(N _f) _L × SU(N _f) _R + breaking by μ, m_d, m_s Hadron Effective Theory	Chiral symmetry breaking Color confinement Quantum anomaly ...	Heavy quark (spin) symmetry SU(2) _{spin} × SU(N _h) + breaking by $1/m_c, 1/m_b$ Quark Effective Theory
--	--	--

What is interesting in heavy quarks?

1) Probes to search the properties of vacuum (temperature, density, isospin, strangeness, ...)

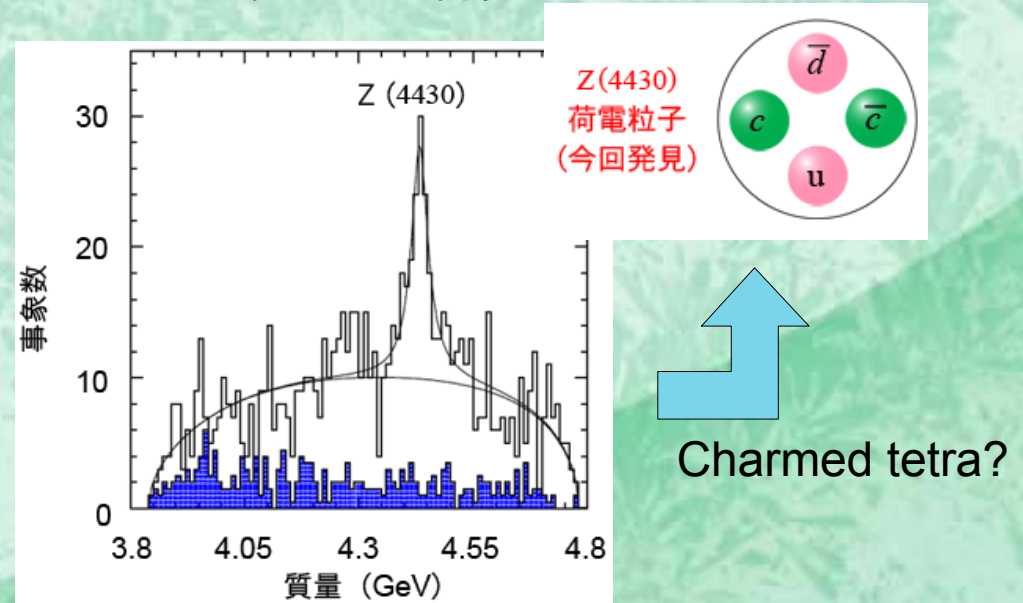
- high energy scale $m_Q > \Lambda_{QCD}$
- color multiple poles (octet for $Q\bar{Q}$, triplet and sextet for QQ , ...) in vacuum
- glueon dynamics \neq hadron and nuclear dynamics

2) Many experimentally observed and theoretically proposed exotic states

- D_sJ(2317), X(3872), Y(4260), Z(4430) \pm , Y_b, ...
- T_{cc}($ud\bar{c}\bar{c}$), Θ_{cs} ($udu\bar{s}\bar{c}$), H_c($udusuc$), ... (hadronic molecule v.s. multi-quark)
- $\bar{D}N$ molecule \neq charmed nuclei (cf. J/ ψ -, Λ_c -nuclei)

3) etc.

Belle で発見された新種の間接子



Belle のデータに何か鍵が隠されている？

答えるべき問題

- 新しい方向性

- Charm quark in hadron, in nucleus は新しい物理を開くのか？

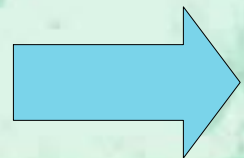
- Charmed baryon, Charmed meson, tetra quark?

→ charm quark を key として u-d-s quark(SU3) の世界を理解することができないか？

- Lattice QCD 核力の記述ができるらしい

- さて、Lattice QCDの結果で、実際に実験と比較できるものってなに？

- Lattice ではわからないこと、計算できないことって何？



まだ、手付かず

答えるべき問題、疑問

- 他のWGIにも関係するであろう話題
 - Quark 描像 ($SU(3)$) で 原子核を見るとどうなるんだろ？
QCD—原子核物理のつながり。
たぶんHadron物理はその境界線上にいる
 - QCD媒質効果—QCD相転移 をhadron で見る？
 - 陽子—陽子散乱って、どこまでわかっているの？
(pQCDが適用できない領域？)

近未来ハドロン物理 将来計画

ハドロン物理を推進していく 現在進行中のプロジェクト

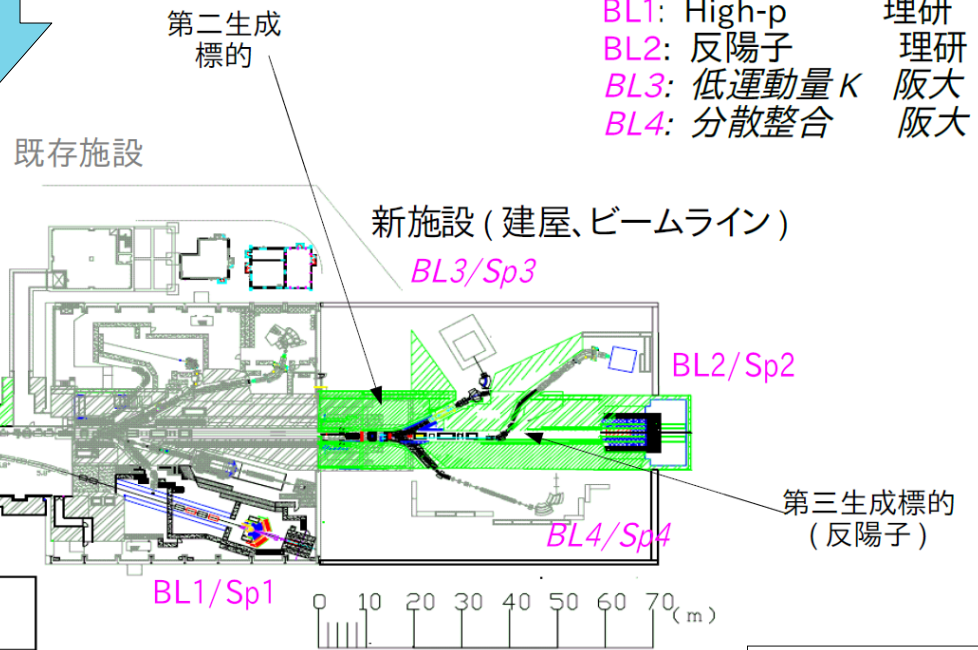
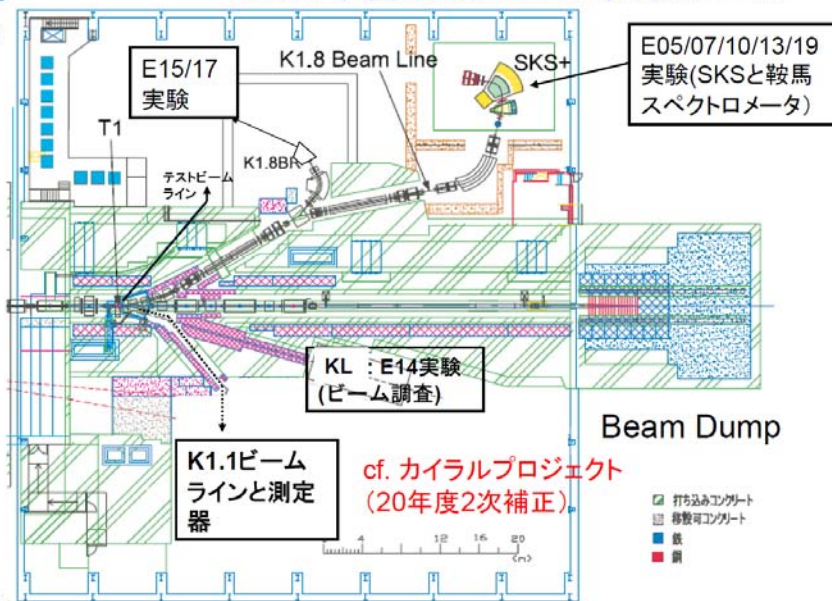
- J-PARC ハドロンホール

- 2009年 稼動開始。
- 2010年 最初の物理データ取得(ペンタクオーク)
- 2011年 本格的に実験がスタート!
- 更なる 発展のために → ハドロンホール拡張計画!

理研-J-PARC 連携センター
プロジェクト (開始目標 2013年)

四日市さん

2009年度末のハドロン実験ホール

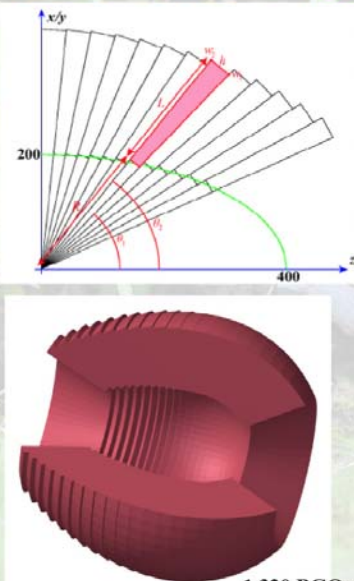


BL1: High-p	理研
BL2: 反陽子	理研
BL3: 低運動量K	阪大
BL4: 分散整合	阪大

ハドロン物理を推進していく 現在進行中のプロジェクト

- SPring-8 , ELPH(東北大)
 - GeV γ を使った物理
 - LEPS, FOREST → 現在稼働中
 - 更なる 発展のために → 新規プロジェクト
 - LEPS2、BGO EGG

BGO EGG の紹介 石川さん



SPring-8 で建設予定
 σ の Primakov 生成
 η' 光生成

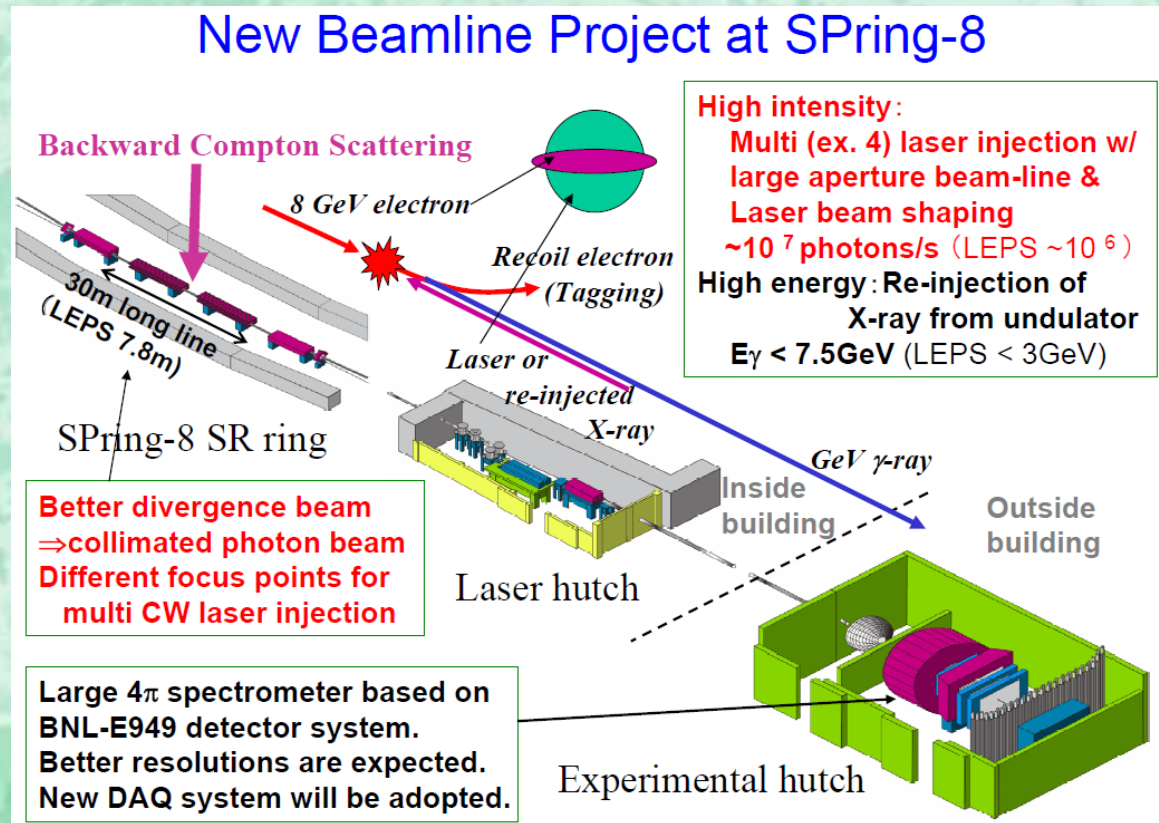
BGO クリスタル

Density	7.13 g/cm ³
Radiation length	11.2 mm
Decay time	~300 ns
Peak emission	480 nm
Light output	0.1
Hygroscopicity	No

一周 60 crystals
前面の高さ 21 mm
長さ 220 mm (19.6X₀)

エネルギー分解能 1.4% @ 1 GeV
(5×5のプロトタイプ)

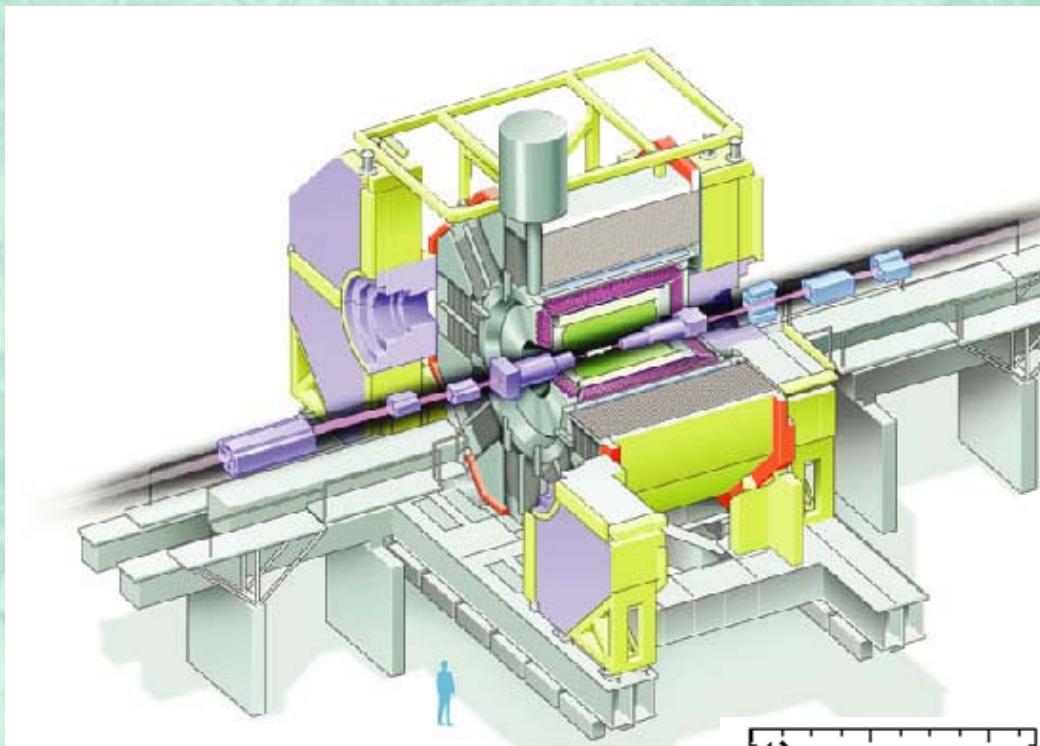
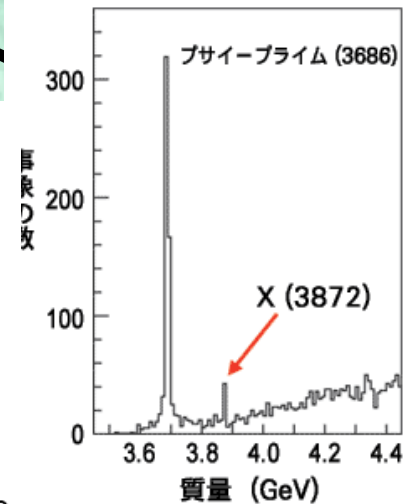
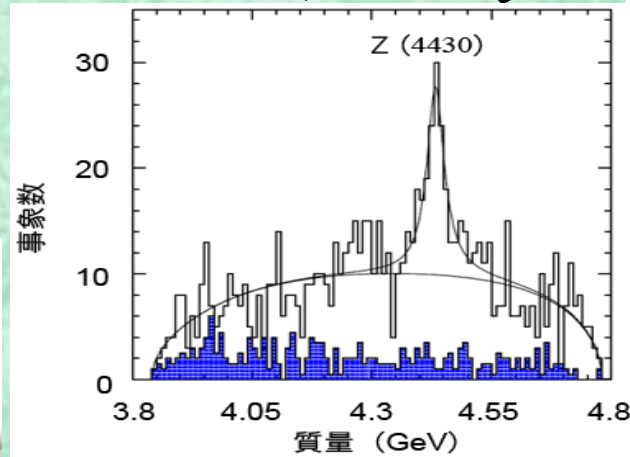
1,320 BGO crystals T. Ishikawa, 2011/02/09



ハドロン物理学を推進していく 現在進行中のプロジェクト

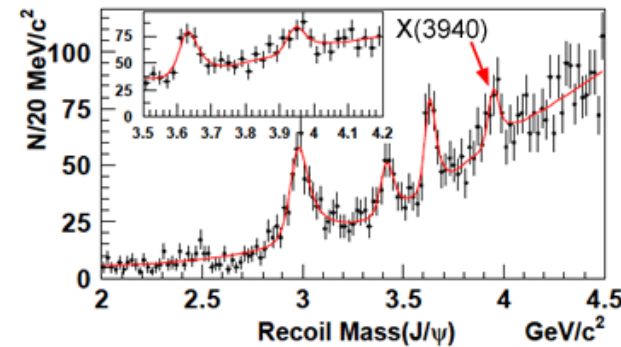
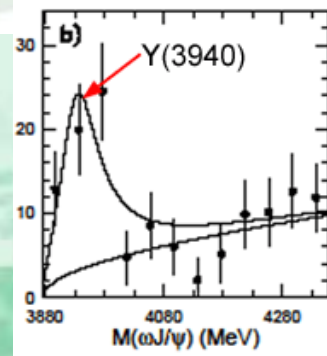
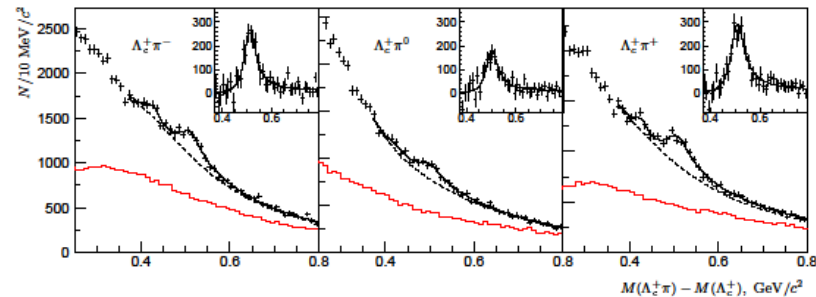
- KEKB/Belle

- データはうなるほど存在！



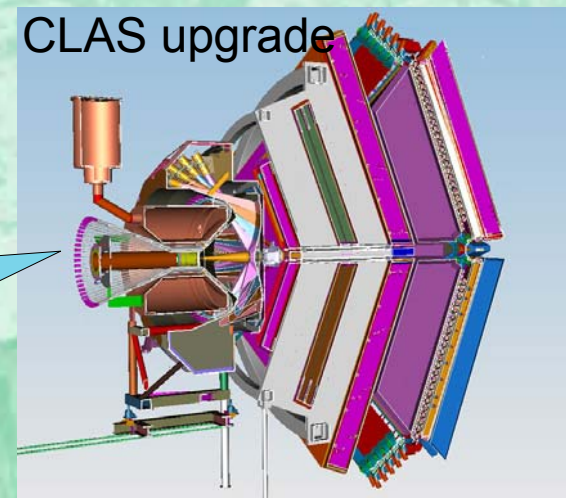
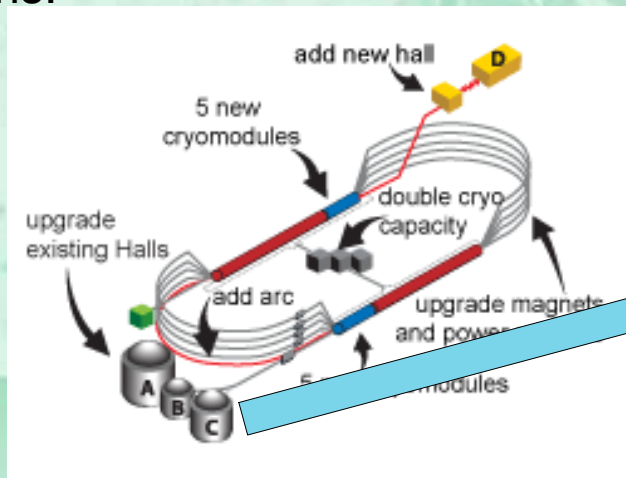
$\Sigma_c(2800)$ 三重項の発見

この研究ではB中間子の崩壊ではなく電子・陽電子衝突によって直接作り出される Σ_c の励起状態を Λ_c と Σ_c という崩壊モードで探索したものである。結果は下の図に示す通り、 Σ_c のすべての電荷について新しいチャームドリオン(チャームクォークを含んだリオン)が発見された。このことからこれらはアイスピンを1を持つ新しいチャームドリオンの3重項(同じ質量と量子数を持つ粒子が3つのうちがった電荷を持った状態で現れること)として $\Sigma_c(2800)$ と呼んでいる。崩壊幅はいずれも60MeV程度である。理論的にはこの近辺にさらに多くの励起状態があると考えられ、今後その全容を明らかにしたいと考えている。



国外プロジェクト

- Jefferson Lab. CEBAF 12 GeV upgrade, 建設完了、2015年
 - **Quark Confinement** - With the upgrade, physicists plan to address one of the great mysteries of modern physics - why quarks only exist together, and never alone.
 - **The Fundamental Structure of Protons and Neutrons** - The upgrade will enable scientists to map in detail the distributions of quarks in space and momentum, culminating in tomography measurements that will constitute a three-dimensional picture of the internal structures of protons and neutrons.
 - **The Physics of Nuclei** – The upgrade will allow researchers to illuminate the role of quarks in the structure and properties of atomic nuclei, and how these quarks interact with a dense nuclear medium.
 - **Tests of the Standard Model** - An upgraded facility will allow physicists to study the limits of the "Standard Model," a theory that describes the fundamental particles and their interactions.

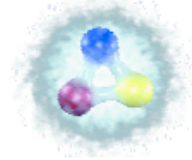


国外プロジェクト

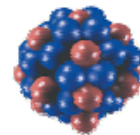
- GSI-FAIR

Research programmes at FAIR

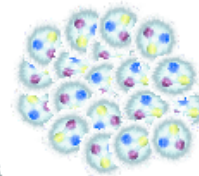
Beams of antiprotons: hadron physics
quark-confinement potential
search for gluonic matter and hybrids
nucleon structure, double hypernuclei



Rare isotope beams: nuclear structure and nuclear astrophysics
nuclear structure far off stability
nucleosynthesis in stars and supernovae



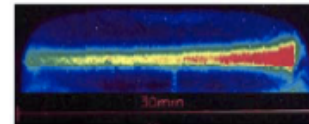
Nucleus-nucleus collisions: compressed baryonic matter
baryonic matter at highest densities (neutron stars)
phase transitions and critical endpoint
in-medium properties of hadrons



Atomic physics, FLAIR, and applied research
highly charged atoms
low energy antiprotons
radiobiology



Short-pulse heavy ion beams: plasma physics
matter at high pressure, densities, and temperature
fundamentals of nuclear fusion



Accelerator physics
high intensive heavy ion beams
dynamical vacuum
rapidly cycling superconducting magnets
high energy electron cooling

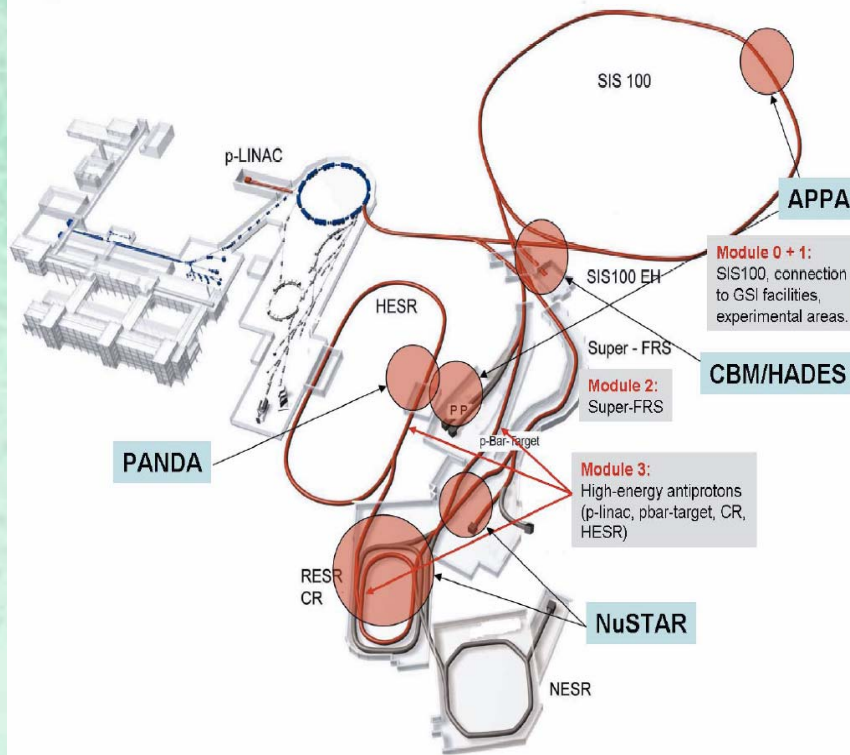


Peter Senger, GSI and Univ. Frankfurt

国外プロジェクト

- GSI-FAIR

Facility for Antiproton and Ion Research (FAIR)



primary beams

- $5 \times 10^{11}/s$; 1.5-2 GeV/u; $^{238}\text{U}^{28+}$
- factor 100-1000 increased intensity
- $4 \times 10^{13}/s$ 90 GeV protons
- $10^{10}/s$ ^{238}U 35 GeV/u (Ni 45 GeV/u)

secondary beams

- rare isotopes 1.5 - 2 GeV/u;
- factor 10 000 increased intensity
- antiprotons 3(0) - 30 GeV

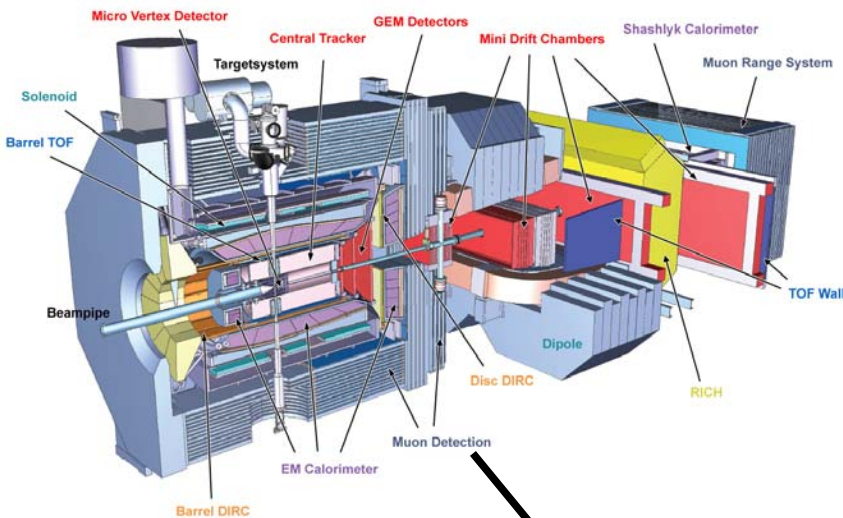
storage and cooler rings

- beams of rare isotopes
- e - A Collider
- 10^{11} stored and cooled antiprotons
- 0.8 - 14.5 GeV

accelerator technical challenges

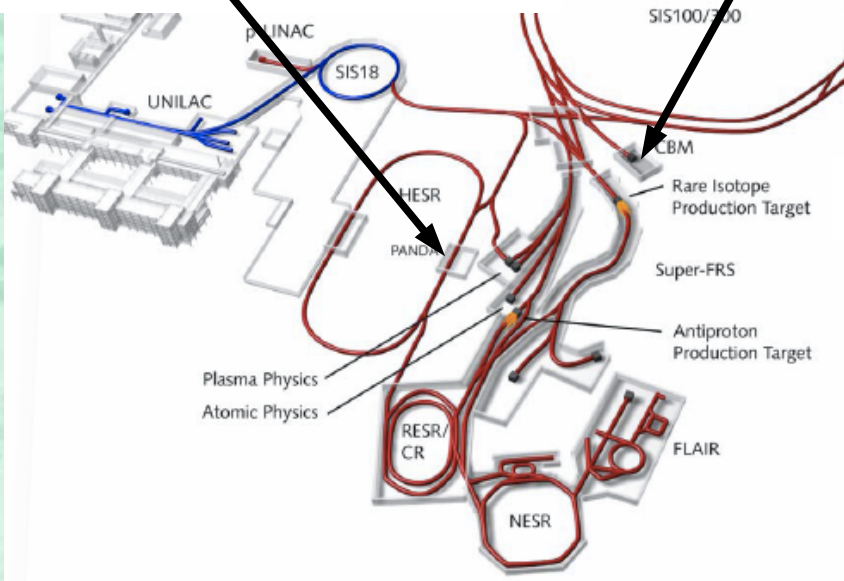
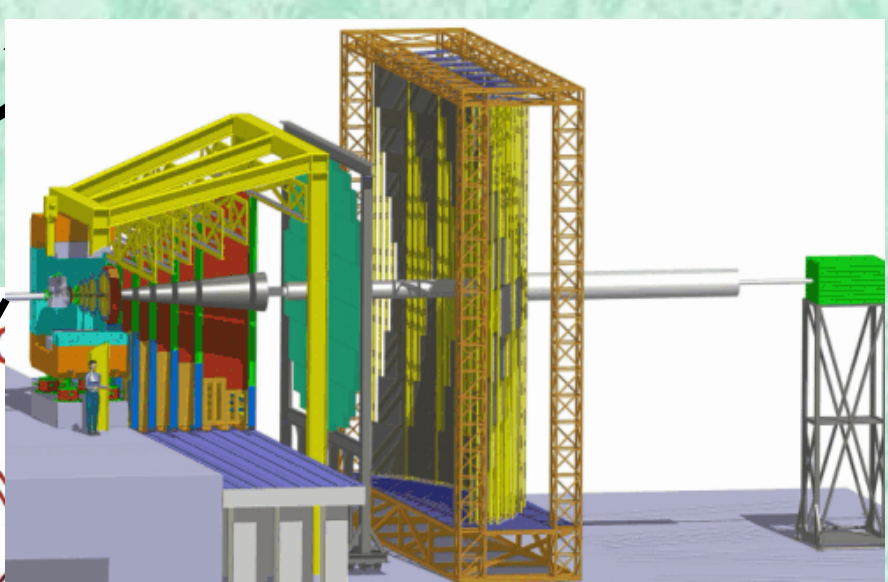
- Rapidly cycling superconducting magnets
- high energy electron cooling
- dynamical vacuum, beam losses

Peter Senger, GSI and Univ. Frankfurt



プロシ

ton and I



- factor 100-1000 increased intensity
- $4 \times 10^{13}/s$ 90 GeV protons
- $10^{10}/s$ ^{238}U 35 GeV/u (Ni 45 GeV/u)

secondary beams

- rare isotopes 1.5 - 2 GeV/u;
- factor 10 000 increased intensity
- antiprotons 3(0) - 30 GeV

storage and cooler rings

- beams of rare isotopes
- e - A Collider
- 10^{11} stored and cooled antiprotons
- 0.8 - 14.5 GeV

accelerator technical challenges

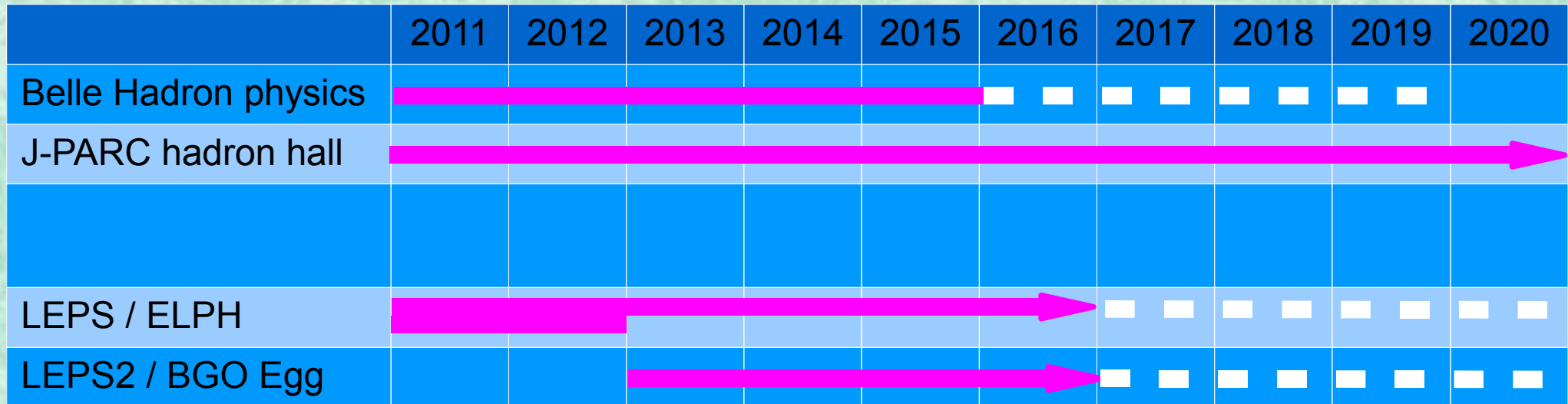
- Rapidly cycling superconducting magnets
- high energy electron cooling
- dynamical vacuum, beam losses

Peter Senger, GSI and Univ. Frankfurt

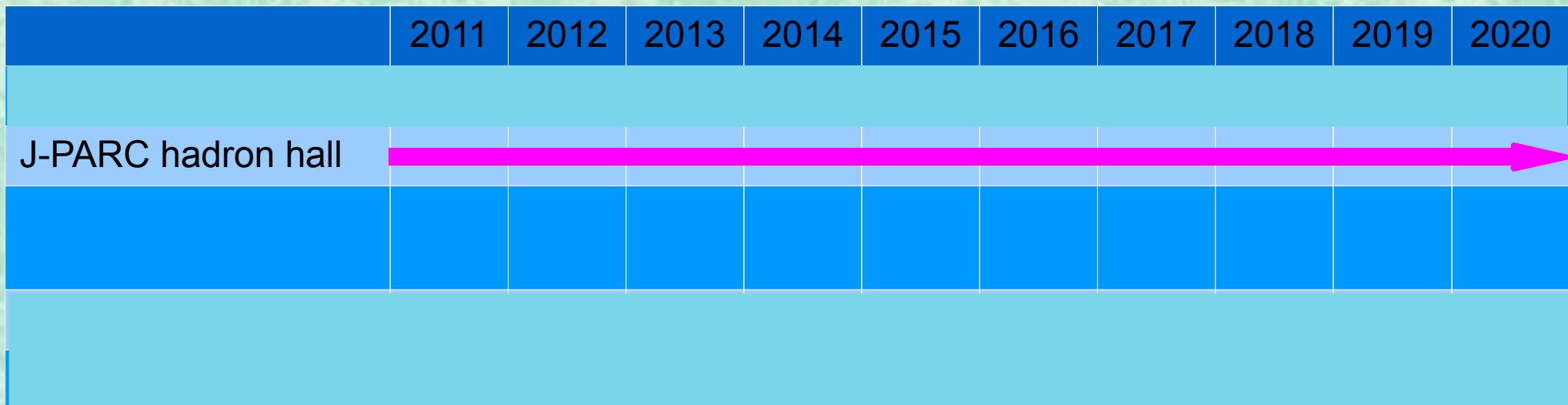
- 2016-17年 最初の実験開始

これからのハドロン物理
(私見。。。ですが。。。)

国内外 将来計画(10年?)



国内外 将来計画(10年?)

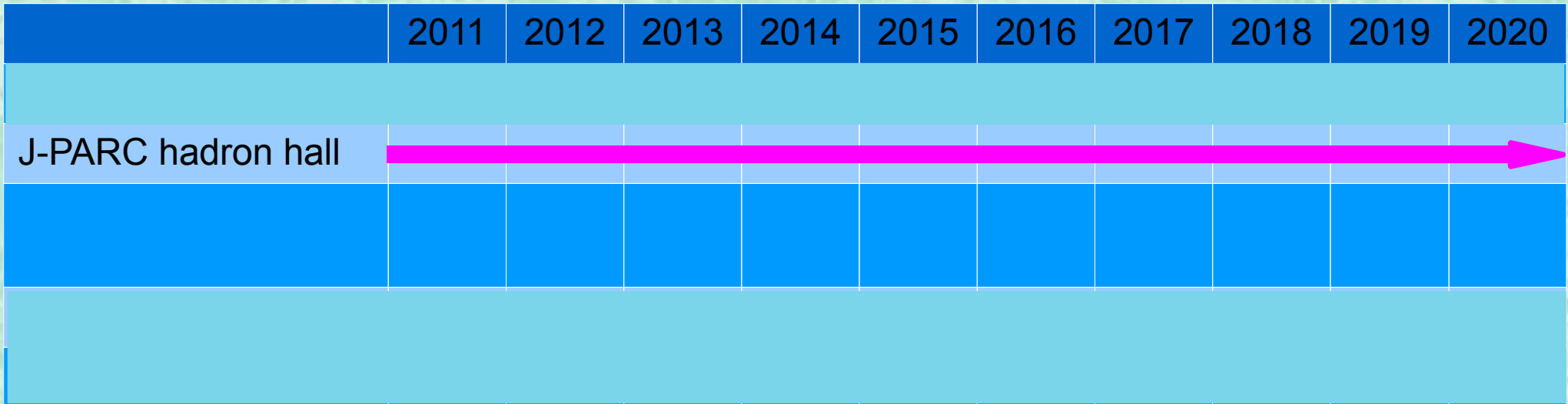


J-PARC ハドロンホール

3つの charged hadron

ビームライン(K1.8, K1.8BR, K1.1)

国内外 将来計画(10年?)



J-PARC ハドロンホール
 3つの charged hadron
 ビームライン(K1.8, K1.8BR, K1.1)

目指す物理はある。実験施設もある。
**K1.8/K1.8BRのstage-2採択だけで
 6960 h~6年分以上(ハイパー核も含む)**

目を背けることができない現実
 将来に向けた積極的な
 アクションが必要！

ハドロンホール拡張



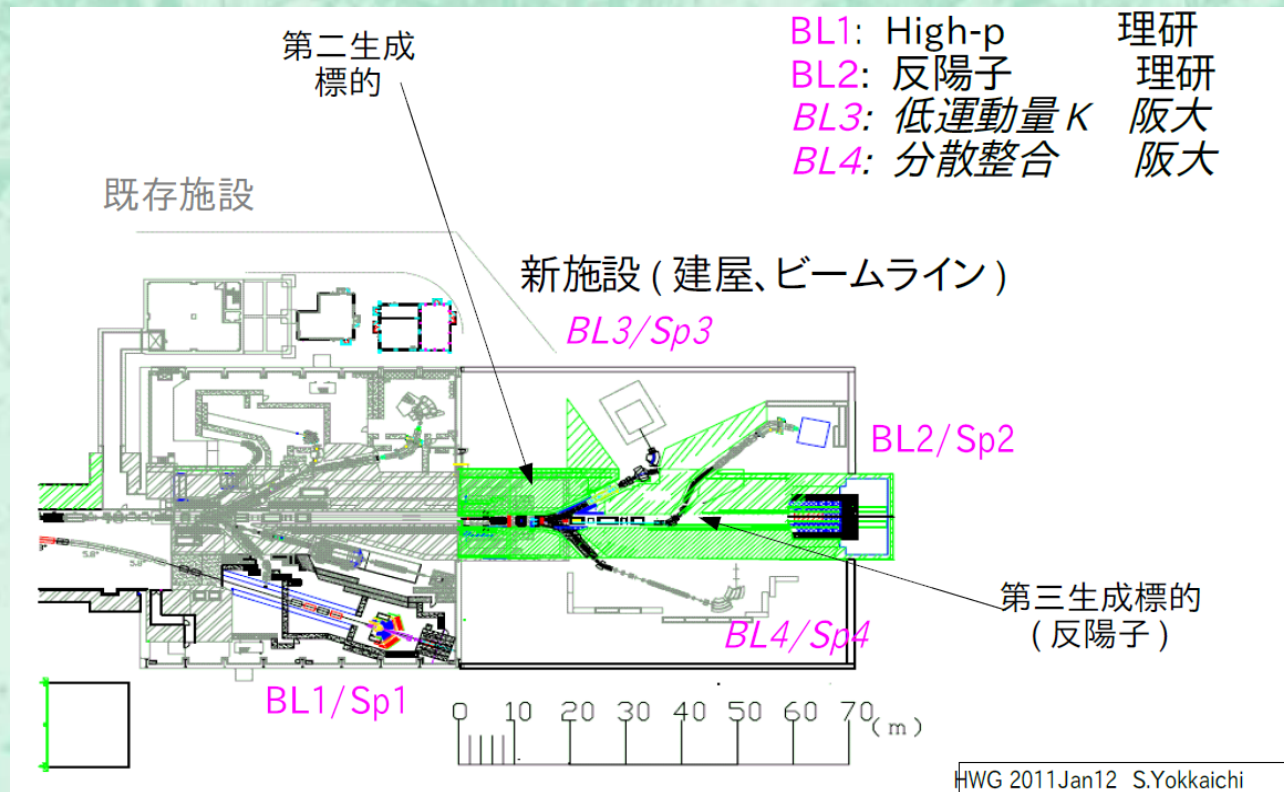
理研J-PARC 連携センター

ハドロン物理を考えると

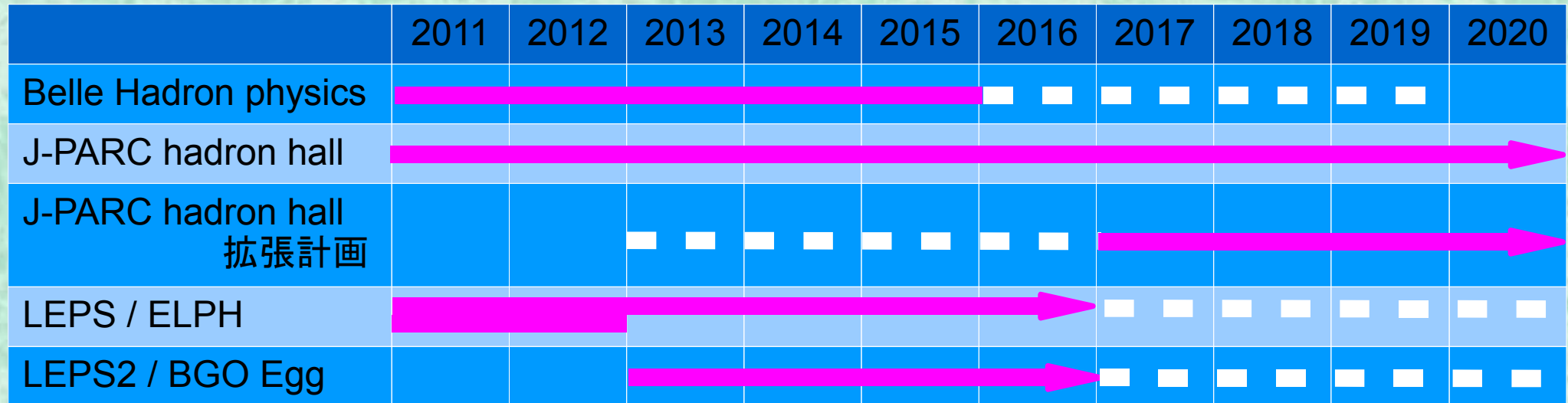
- 1) 有限密度QCD状態のハドロンをプローブとした測定！
- 2) マルチクオーク状態—ハドロンの本質に迫る！

を実現するには何が必要なのか？

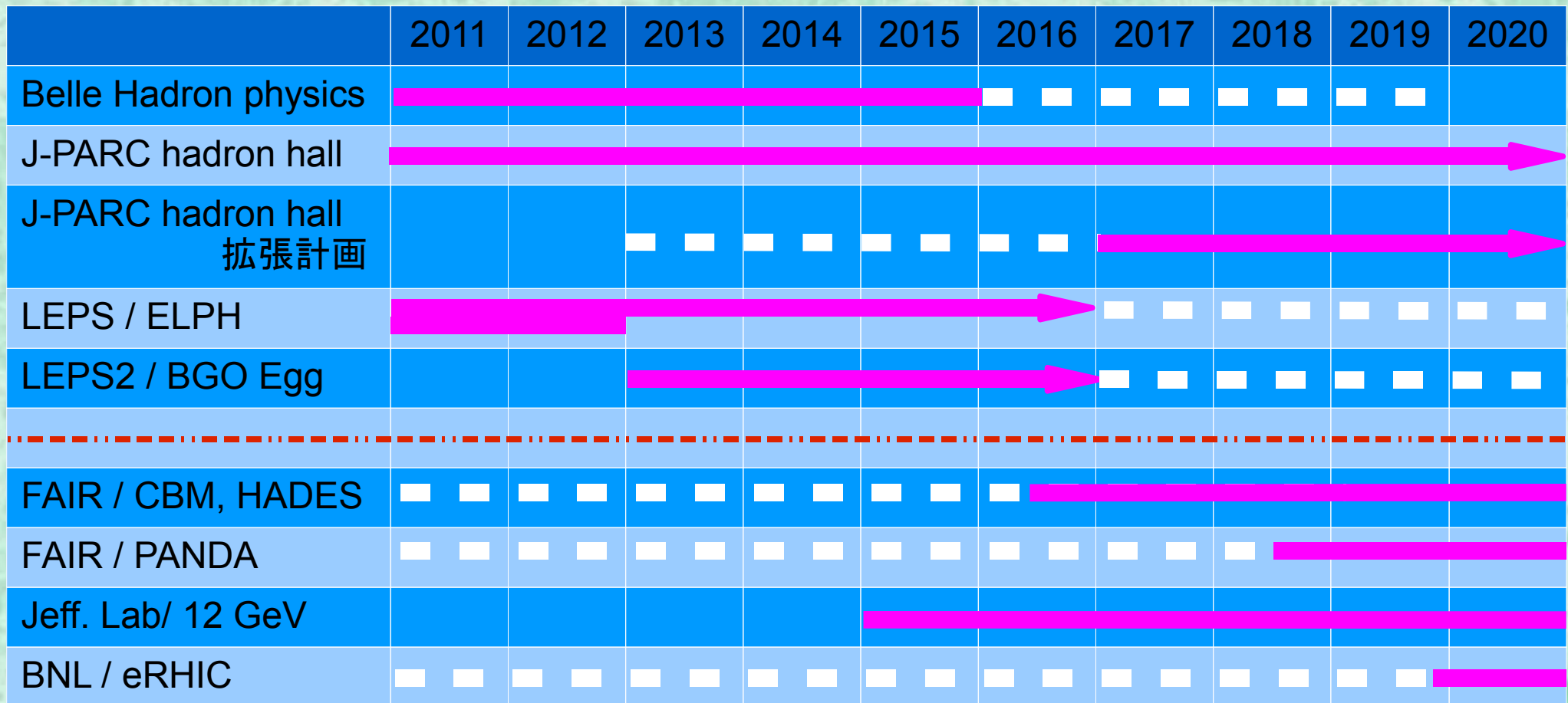
リソース(人・もの・予算)のJ-PARC への集中が必要？



国内外 将来計画(10年?)



国内外 将来計画(10年?)



10年以降—20年の計画?

今後の議論

Long range を見据えた明らかにすべき物理の整理

積み残し課題

今後の方針

- Pentaquark (3月2日)
- Belle hadron physics (4月)
- Lattice QCD

ハドロン物理の目標の共有化

- QCD Lagrangian からスタート?
 - QCD 真空状態の物性 (カイラル対称性の自発的破れ)
 - QCDの励起状態 ~ ハドロン
(集団励起 / 非集団励起モード?)
 - ハドロン内部構造? quark-quark correlation in hadron?

Working group 間連携を模索

- ハイパー核
(核媒質効果?、フレーバーSU(3)対称性とその破れ)
- 高エネルギー原子核衝突
(カイラル対称性の回復、非閉じ込め、マルチクォーク生成?)
- ○○○○

宿題

人員ならびに予算と、今後必要と考えるリソースの年次進行に関してはこれからの課題。

おわり