ハドロン施設での ストレンジネス核物理 の今後

研究会「高密度核物質に挑む実験の将来－施設・装置の観点から」

2015/12/4

新学術「中性子星核物質」A01班代表
高橋俊行 (KEK-IPNS/J-PARC)

Contents

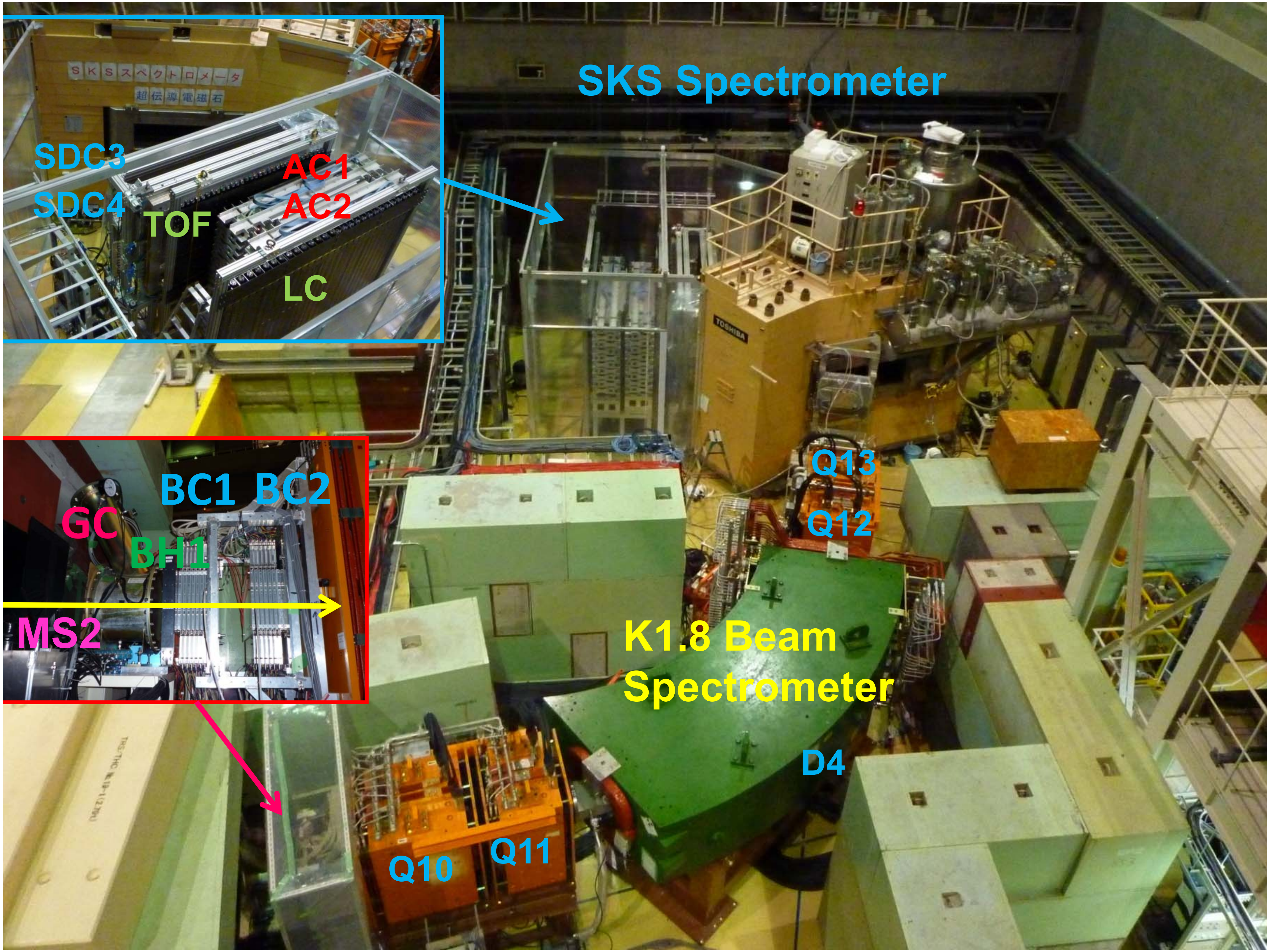
- J-PARC K1.8ビームラインでのSKSスペクトロメータ
  イントロダクションとして
- 最近の実験から
- 今後の実験
- Summary

SKS実験@K1.8　これまでの歴史と成果

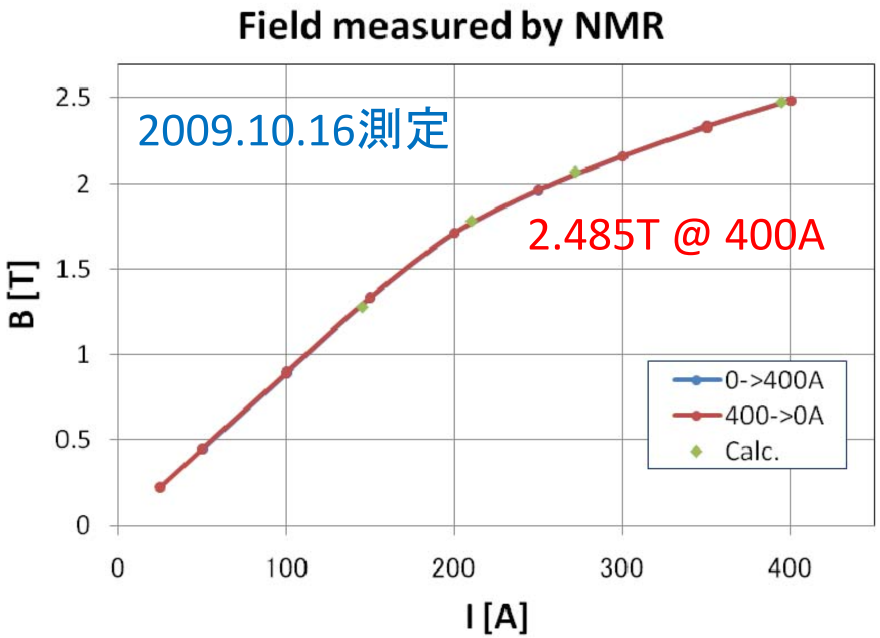
- Commissioning 2009/10-2010/2
  - PTEP 02B010(2010)
- E19 (Search for penta-quark Θ^+) 2010/10-11, 2012/2
  - PRL**109**,132002(2012) / PRC**90**,035205(2014)
  - 学位取得3名
- E27 (Search for K^-pp bound state) 2012/6
  - PTEP**2014**, 101D03(2014) / PTEP**2015**, 021D01(2015)
  - 学位取得1名
- E10 (Search for neutron-rich ${}^{6}_{\Lambda}$H) 2012/12-2013/1
  - PLB 729, 39(2014)
  - 準備中論文1
  - 学位取得2名
- E13 (γ-ray spectroscopy of ${}^{4}_{\Lambda}$He and ${}^{19}_{\Lambda}$F) 2015/4, 6
  - PRL **115**, 222501 (2015)
  - 学位取得予定4名
- E05-pilot (Ξ-hypernucleus ${}^{12}_{\Xi}$Be) 2015/11
  - 学位取得予定1名

5 Experiments, 7 papers, 6 Ph.Ds

SKS@K1.8 組立　2009/1/20-2/15

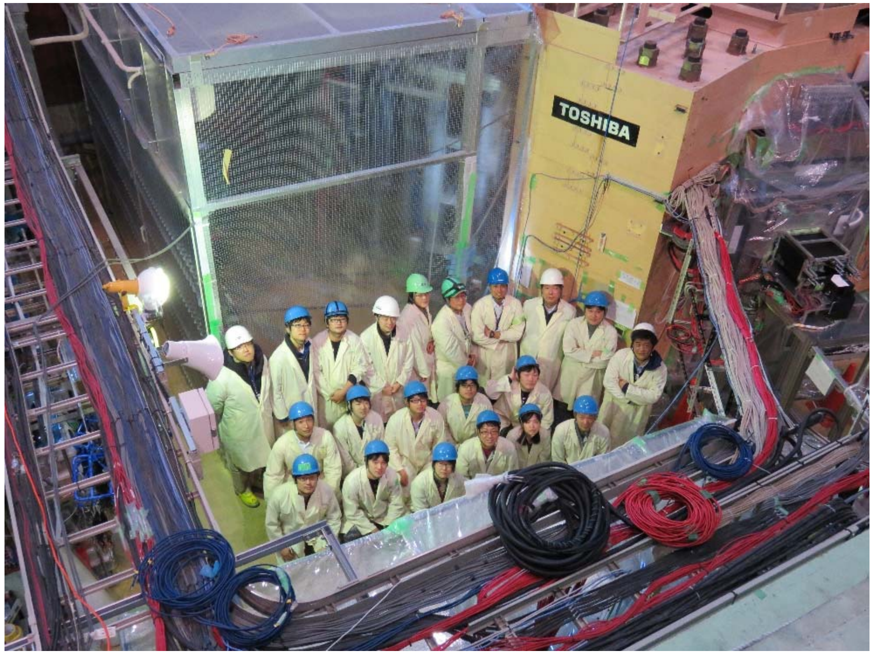

SKS Spectrometer
SKSスペクトロメータ
超伝導電磁石
SDC3
SDC4
TOF
AC1
AC2
LC
BC1
BC2
GC
BH1
MS2
Q13
Q12
K1.8 Beam
Spectrometer
D4
Q10
Q11

Commissioning in October 2009



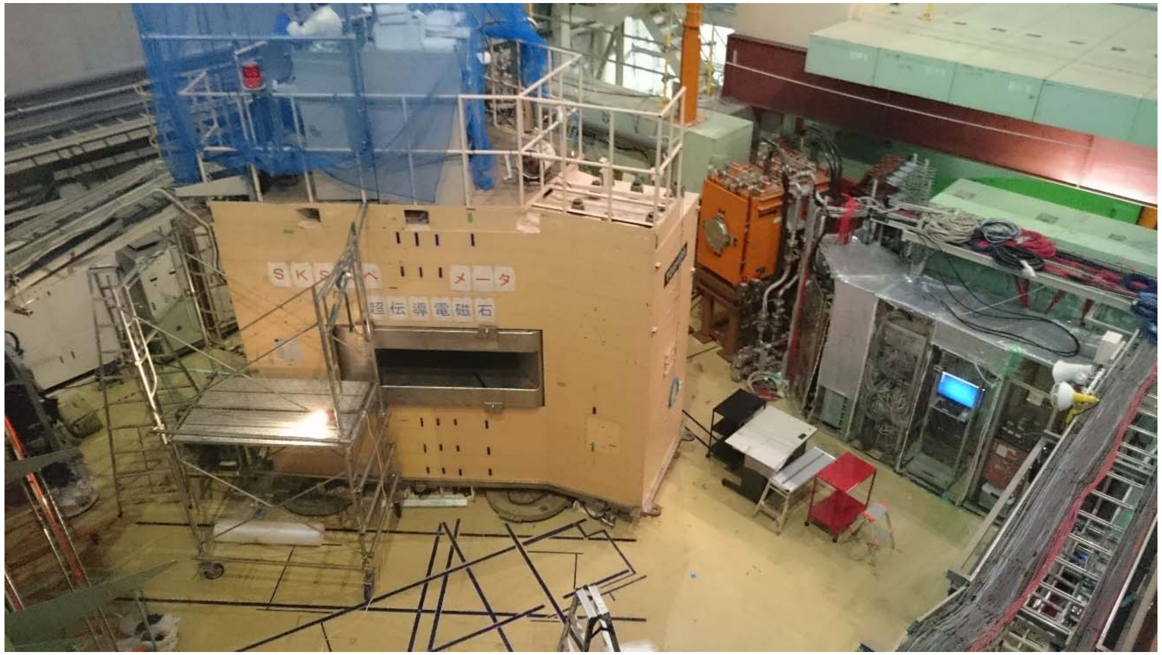
K1.8ビームラインでのSKS実験終了

2015年11月19日　10:00　 **E05-pilot　データ収集終了**



検出器等解体･撤去作業完了

2015/11/27



今後

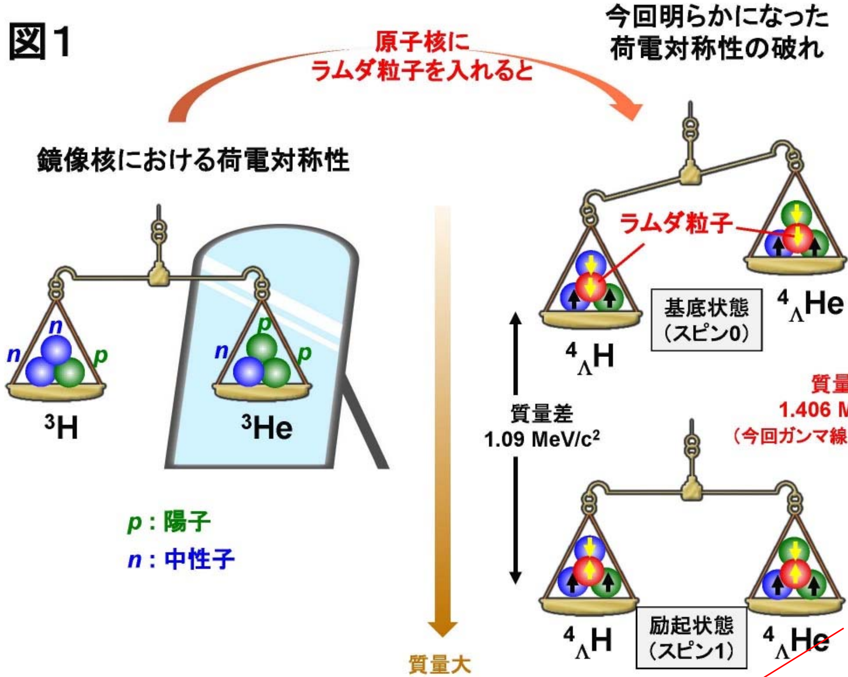
- SKSは南側　K1.1エリアへ移設（2016/2/1 - ）
  - ➢ Λハイパー核ガンマ線精密分光、弱崩壊
- K1.8エリアにKURAMAを設置し、E07（エマルジョン）実験を開始
  - ➢ ダブルストレンジネス系の研究
    - × ΛΛ核、Ξ核、Ξ原子X線分光、H粒子
  - ➢ ΣN散乱実験

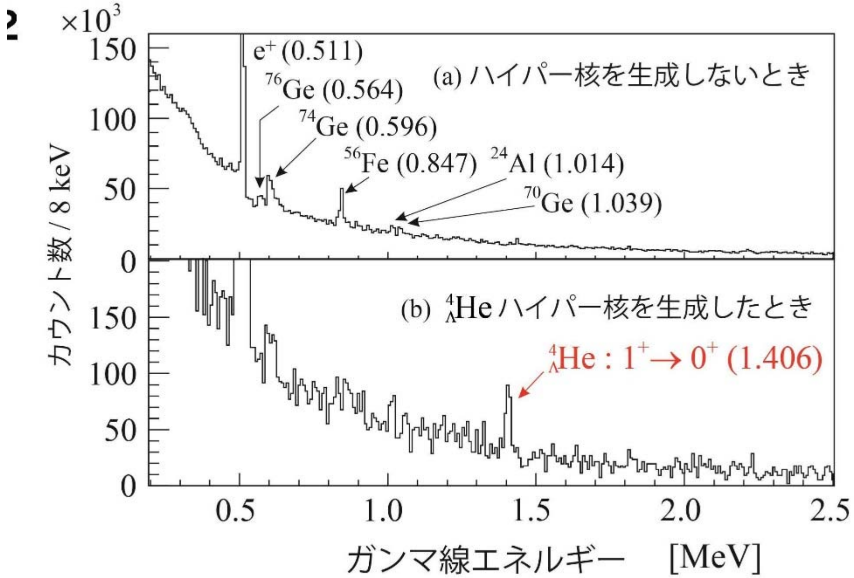
最近の実験から

最近(2015年度)の実験

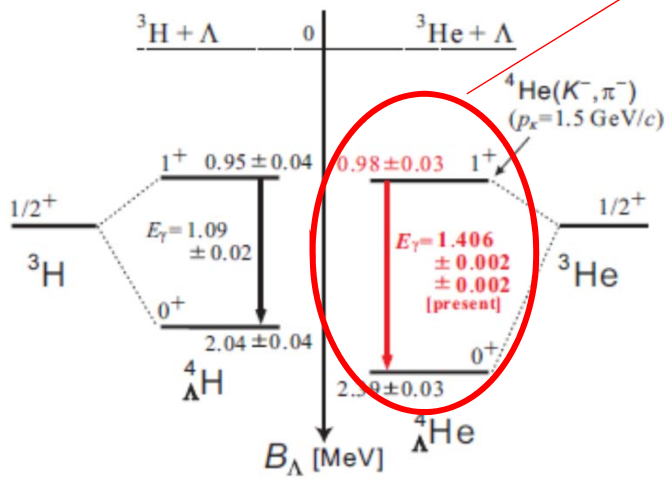
- ${}^{4}_{\Lambda}$He, ${}^{19}_{\Lambda}$Fのガンマ線分光(E13)
  ⇒ 大きな荷電対称性の破れ(CSB)の観測
- エマルジョン実験(E07)に向けたStudy
  ⇒ Emulsion/SSDの位置合わせ
  潜像が蓄積されたエマルジョンでの飛跡認識テスト
- ^{12}C(K^{-},K^{+})反応による${}^{12}_{\Xi}$Be分光(E05-pilot)
  永江さんの講演

E13: Spin-dependent CSB in ΛN interaction





ガンマ線測定により$^4_\Lambda$He*の励起エネルギーを精密に決定した。



$^4_\Lambda$H*の励起エネルギーと大きく違う。

↓

荷電対称性の大きな破れ

エマルジョンデータを採用すると、1^+状態は破れはほとんどなく0^+状態は大きい。

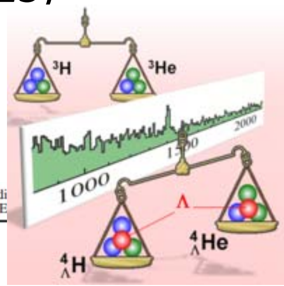
↓

スピン依存性 ⇔ ΣN-ΛN混合による効果？

E13実験：論文出版＆プレスリリース

Observation of Spin-Dependent Charge Symmetry Breaking in ΛN Interaction : Gamma-Ray Spectroscopy of $^{4}_{\Lambda}$He
ΛN相互作用におけるスピン依存の荷電対称性の破れの観測: $^{4}_{\Lambda}$Heガンマ線分光

Physical Review Letters **115**, 222501 (2015)
(published 2015/11/24)
“Editor’s Suggestion”に選ばれました。



PRL 115, 222501 (2015) PHYSICAL REVIEW LETTERS week endi 27 NOVEMBE

Observation of Spin-Dependent Charge Symmetry Breaking in ΛN Interaction: Gamma-Ray Spectroscopy of $^{4}_{\Lambda}$He

T. O. Yamamoto,[1] M. Agnello,[2,3] Y. Akazawa,[1] N. Amano,[4] K. Aoki,[5] E. Botta,[3,6] N. Chiga,[1] H. Ekawa,[7] P. Evtoukhovitch,[8] A. Feliciello,[3] M. Fujita,[1] T. Gogami,[7] S. Hasegawa,[9] S. H. Hayakawa,[10] T. Hayakawa,[10] R. Honda,[10] K. Hosomi,[9] S. H. Hwang,[9] N. Ichige,[1] Y. Ichikawa,[9] M. Ikeda,[1] K. Imai,[9] S. Ishimoto,[5] S. Kanatsuki,[7] M. H. Kim,[11] S. H. Kim,[11] S. Kinbara,[12] T. Koike,[1] J. Y. Lee,[13] S. Marcello,[3,6] K. Miwa,[1] T. Moon,[13] T. Nagae,[7] S. Nagao,[1] Y. Nakada,[10] M. Nakagawa,[10] Y. Ogura,[1] A. Sakaguchi,[10] H. Sako,[9] Y. Sasaki,[1] S. Sato,[9] T. Shiozaki,[1] K. Shirotori,[14] H. Sugimura,[9] S. Suto,[1] S. Suzuki,[5] T. Takahashi,[5] H. Tamura,[1] K. Tanabe,[1] K. Tanida,[9] Z. Tsamalaidze,[8] M. Ukai,[1] Y. Yamamoto,[1] and S. B. Yang[13]

(J-PARC E13 Collaboration)

[1]Department of Physics, Tohoku University, Sendai 980-8578, Japan
[2]Dipartimento di Scienza Applicate e Tecnologica, Politecnico di Torino, Corso Duca degli Abruzzi, 10129 Torino, Italy
[3]INFN, Sezione di Torino, via P. Giuria 1, 10125 Torino, Italy
[4]Department of Physics, Kyoto University, Kyoto 606-8502, Japan
[5]Institute of Particle and Nuclear Studies (IPNS), High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Tsukuba 305-0801, Japan
[6]Dipartimento di Fisica, Universit di Torino, Via P. Giuria 1, 10125 Torino, Italy
[7]Department of Physics, Kyoto University, Kyoto 606-8502, Japan
[8]Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Moscow Region 141980, Russia
[9]Advanced Science Research Center (ASRC), Japan Atomic Agency (JAEA), Tokai, Ibaraki 319-1195, Japan
[10]Department of Physics, Osaka University, Toyonaka 560-0043, Japan
[11]Department of Physics, Korea University, Seoul 136-713, Korea
[12]Faculty of Education, Gifu University, Gifu 501-1193, Japan
[13]Department of Physics and Astronomy, Seoul National University, Seoul 151-747, Korea
[14]Research Center of Nuclear Physics, Osaka University, Ibaraki 567-0047, Japan
(Received 12 August 2015; published 24 November 2015)

プレスリリース（11/25付）

配布先：宮城県政記者会、文部科学記者会、科学記者会、原子力規制庁記者会（仮称）、茨城県政記者クラブ、筑波研究学園都市記者会

TOHOKU UNIVERSITY

平成２７年１１月２５日

報道機関　各位

国立大学法人　東北大学　大学院理学研究科
大学共同利用機関法人　高エネルギー加速器研究機構
国立研究開発法人　日本原子力研究開発機構
J-PARC センター

J-PARC ハドロン実験施設で
“奇妙な粒子” が原子核の荷電対称性を破る現象を発見

D.S.系の本格的研究に向けて（1）
ー K^-ビーム強度&純度@K1.8 ー

Duration: 5.51 sec.
Spill length: 2.0-2.1 sec.
38.6kW = 4.43×10^{13} ppp

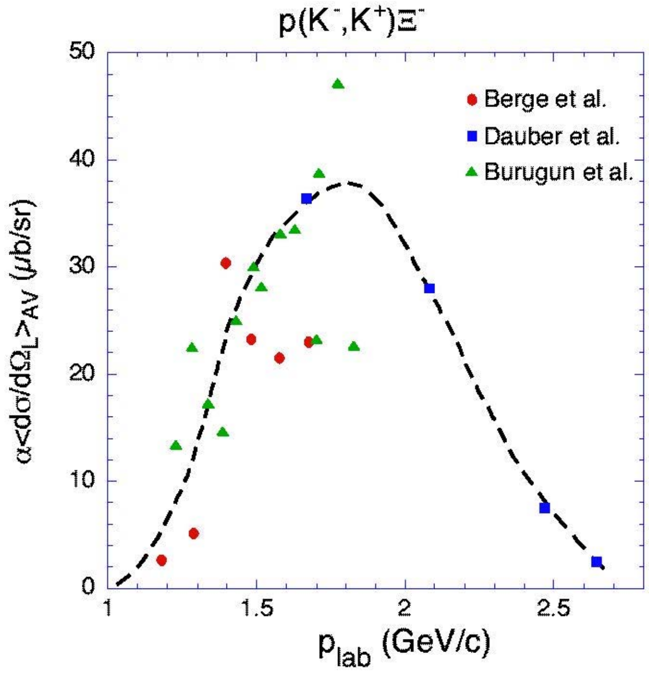
ESS1/ESS2: ±250kV (max. 375kV)
IFH: ±110mm (full open)
Mom: ±180mm (full open)

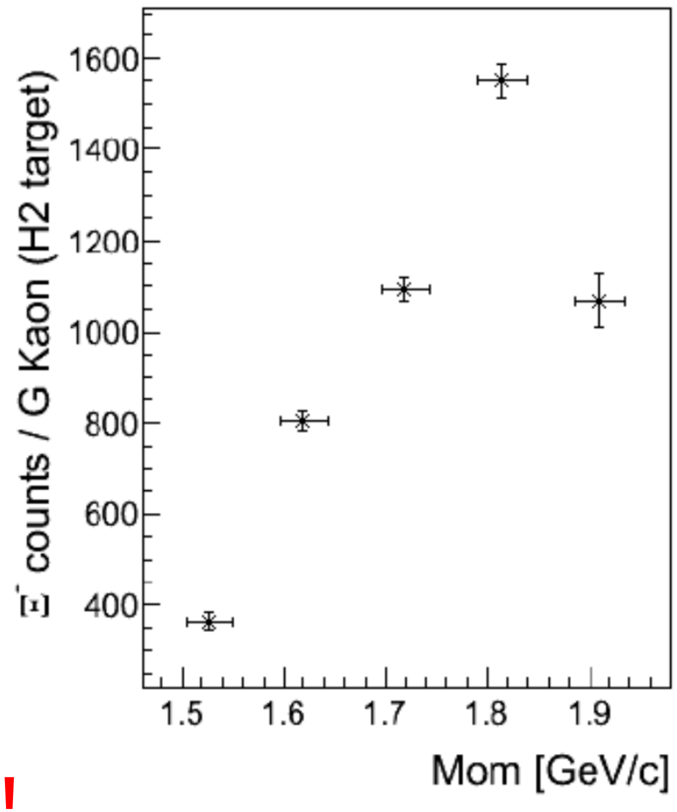
p [GeV/c]	K^- /spill	π^- /spill	prim.	vertical slit condition
1.9	480k	590k	38.6kW	IFV:3.3/0.3mm MS1/2:±1.11mm
1.8	500k	550k	31.2kW	IFV:3.3/0.3mm MS1/2:±1.25mm
	580k	750k	38.6kW	IFV:3.2/0.0mm MS1/2:±1.4/1.36mm
1.7	500k	520k	38.6kW	IFV:3.5/0.1mm MS1/2:±1.6mm
1.6	530k	500k	38.6kW	IFV:3.7/-0.1mm MS1/2:±1.7mm
1.5	530k	470k	38.6kW	IFV:4.0/-0.4mm MS1/2:±2.2mm

100kW（ユーロコイン,Pt）標的では、
>1M kaons/spillが期待できる。

D.S.系の本格的研究に向けて(2)
ー Ξ⁻生成断面積の運動量依存性 ー

$K^- + \text{“}p\text{”} \rightarrow K^+ + \Xi^-$ 反応がD.S.系への入口

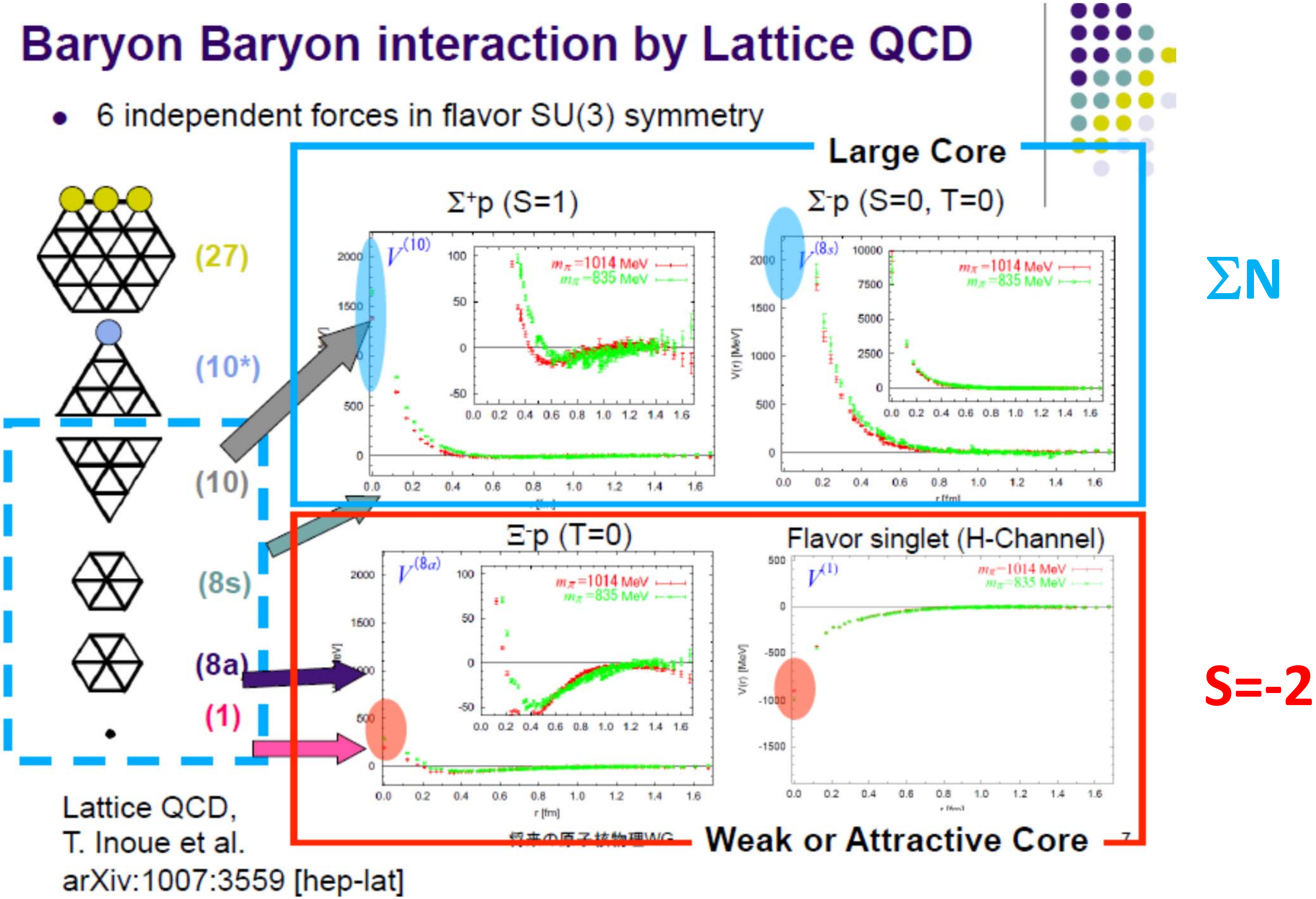




1.8 GeV/c がやはり最適！

今後の実験

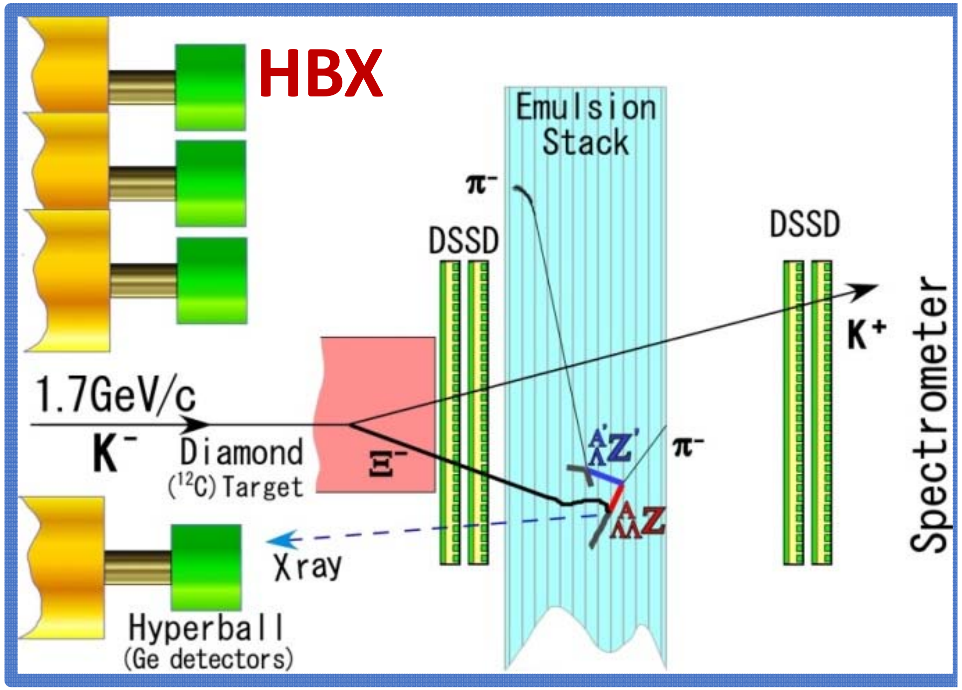
Baryon間相互作用 ー 核力の斥力芯の源を探る



(Approved) Experiments at K1.8

- E07: Emulsion Exp. for D.S. Nuclei
- E03: X-rays from Ξ^{-}-Fe atom
- E05: ${}^{12}{}_{\Xi}\mathrm{Be}$ spectroscopy by the ${}^{12}\mathrm{C}(\mathrm{K}^{-},\mathrm{K}^{+})$
- E10: n-rich Λ hypernuclei: ${}^{9}\mathrm{Be}(\pi^{-},\mathrm{K}^{+}){}^{9}{}_{\Lambda}\mathrm{He}$
- E40: ΣN scattering
- E42: *H* dibaryon search (stage-1)

Outline of E07



Making S=-2 nuclear chart

$\Lambda\Lambda$-Nuclei, Ξ-Nuclei, *H*-particle

⇒

$\Lambda\Lambda$, ΞN, and $\Xi N \rightarrow \Lambda\Lambda$ interactions

① Hybrid-scan method

10^4 Ξ^- stop in the emulsion

⇒ 100 D.S.N (×10 of previous)

Automatic scan of X- track

using counter(SSD) information

② Overall-scan method

Search 3-vertex events w/o counter

×10 events of H.S. are expected.

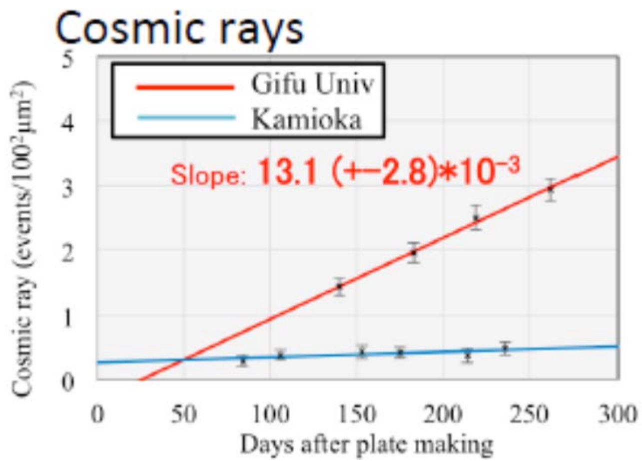
③ X-ray measurement by HBX

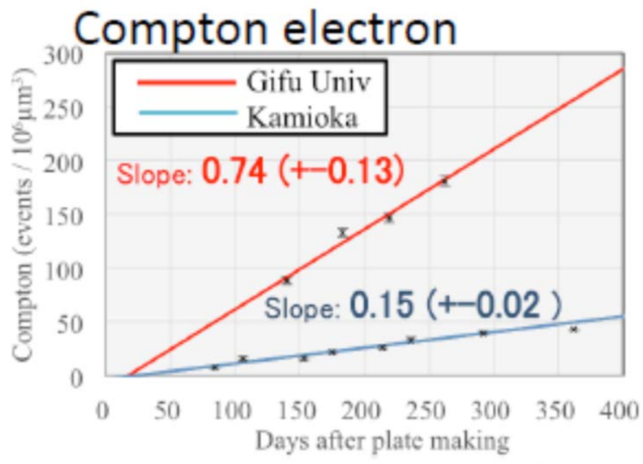
at Ξ^- capture in Ag/Br atoms

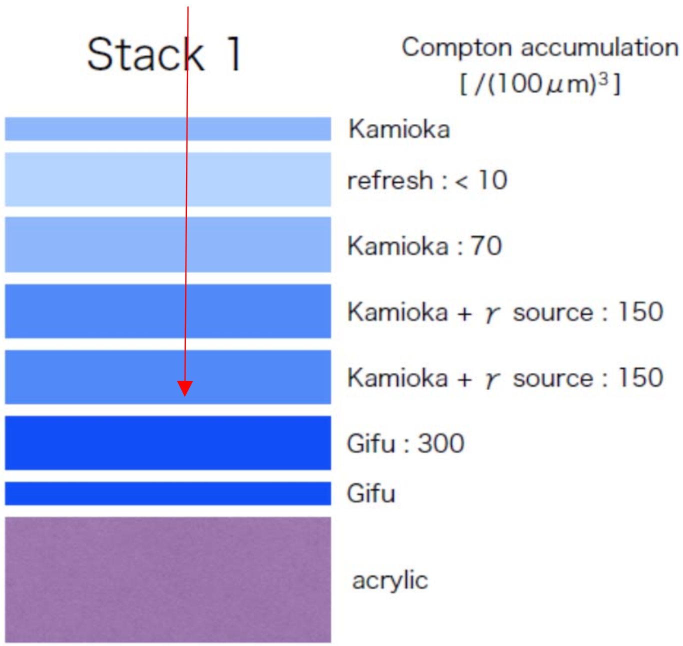
⇒ Ξ^- potential in the surface region

心配事（1）　潜像蓄積

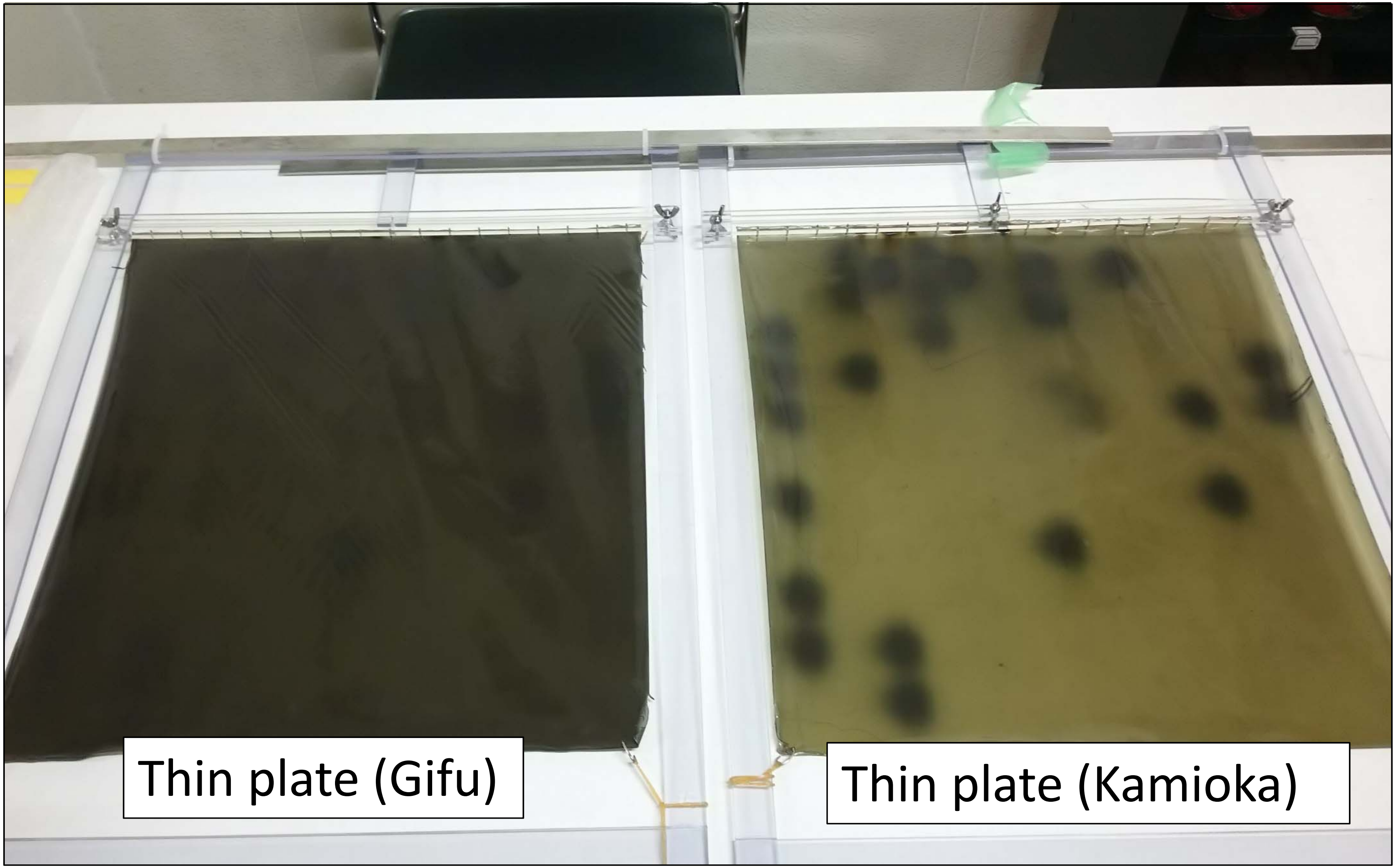
エマルジョン乾板製作 2013/12 ― 2014/5
神岡鉱山で保管しているが、
2017/4　までの蓄積量は
  Cosmic rays: negligible
  Compton electron: 180/(100μm)^3
E373の時は、~120/(100μm)^{3}程度





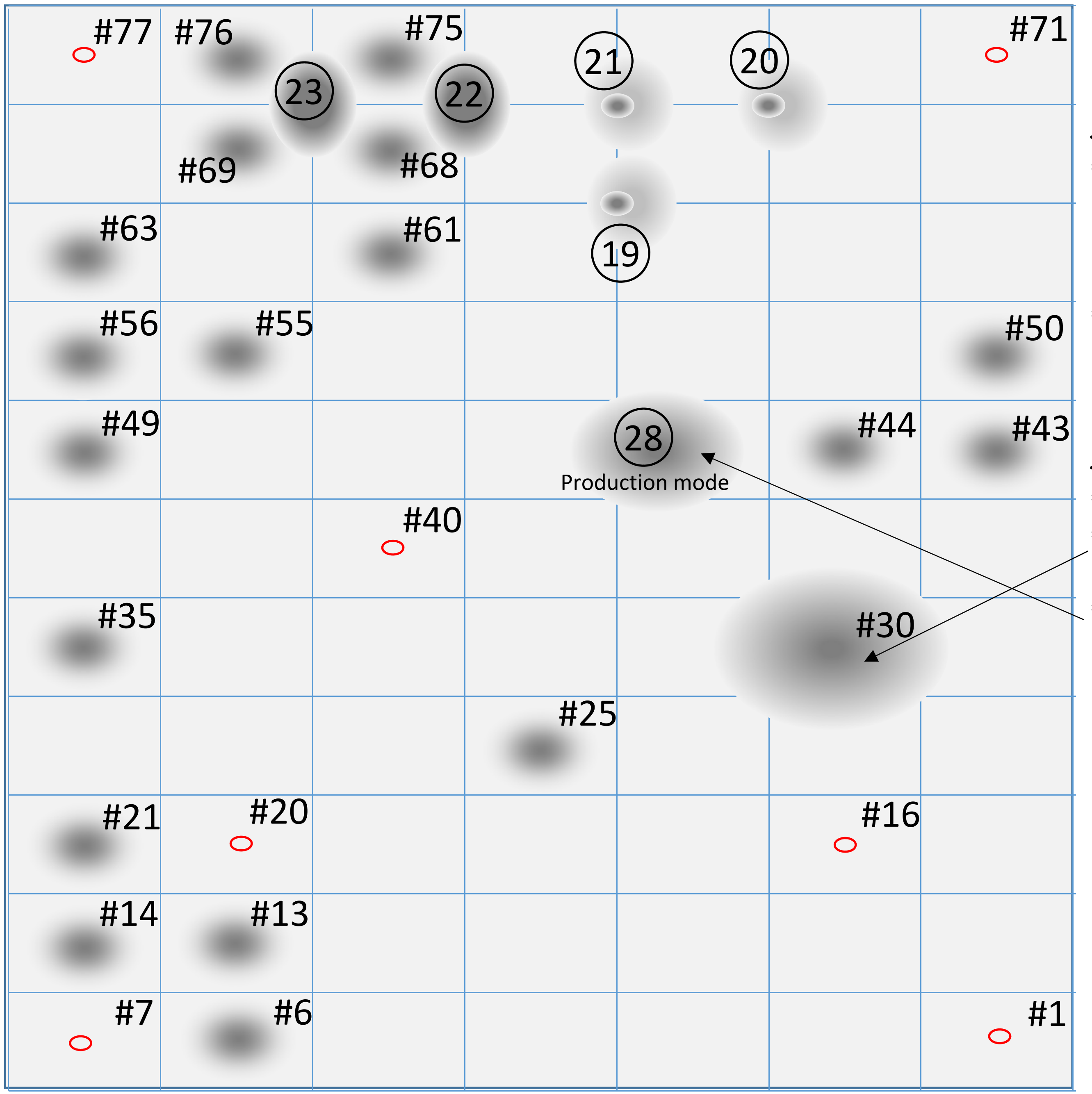


⇒　2015/10　ランで蓄積量を変えた
乾板を用意しビーム照射


Thin plate (Gifu)
Thin plate (Kamioka)

PL01 thin plate

⊗beam



<Blackspot>
*#19,20,21
Halo D ~15mm
Spot Width ~4mm, Height ~3mm

*#22,23 too dark

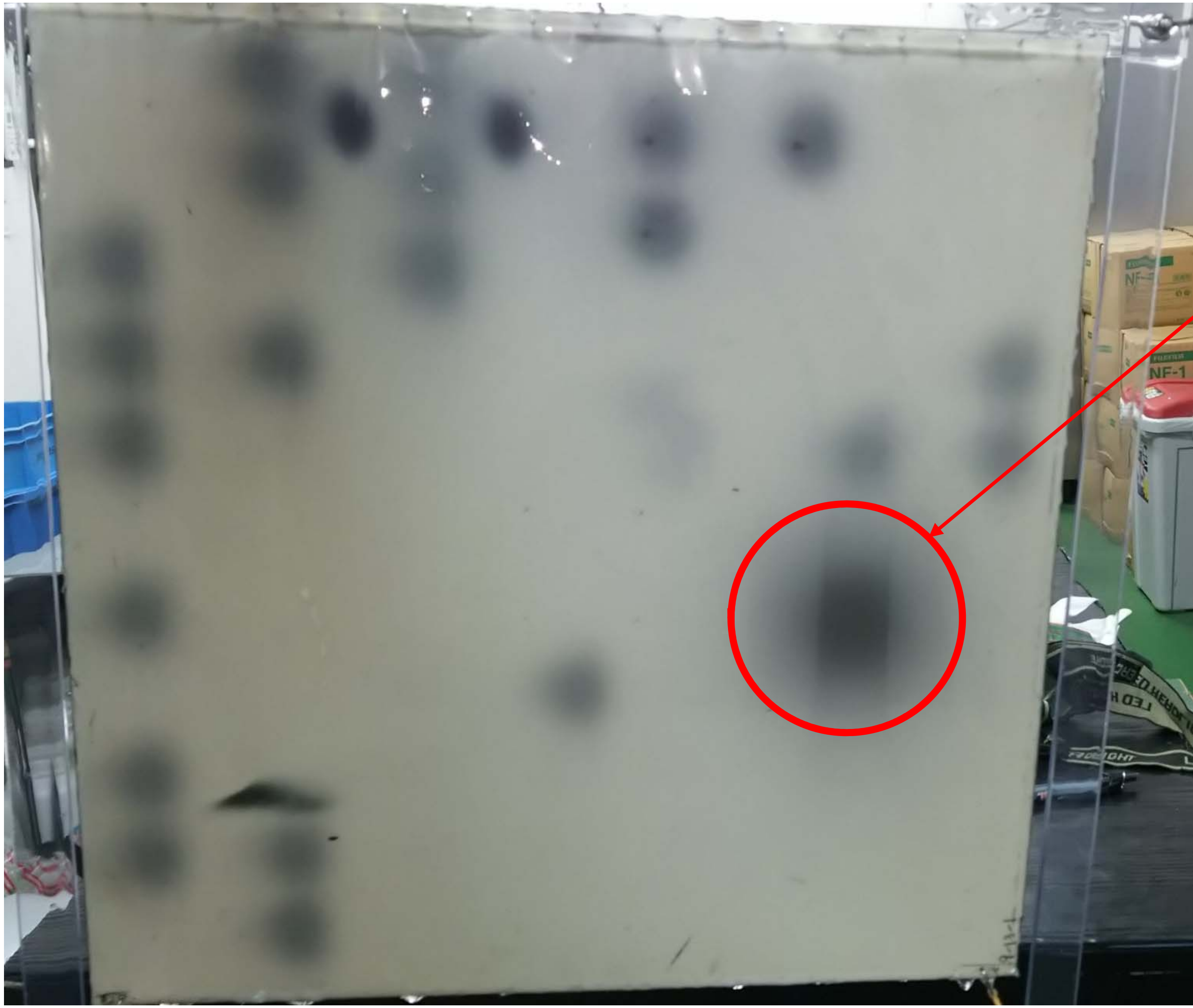
<Dark parts>
*10^6
*Gamma ray by 60Co

*#28 production mode

P-bar 30spills
With collimator
Without pi-Beam

10spill = 10^3~10^4 / cm^2

PL04 (Thick, Kamioka)



irradiated by
^{60}Co source
~160/(100μm)^3

p_barビーム
30spillを照射
10^3~10^4 / cm^2

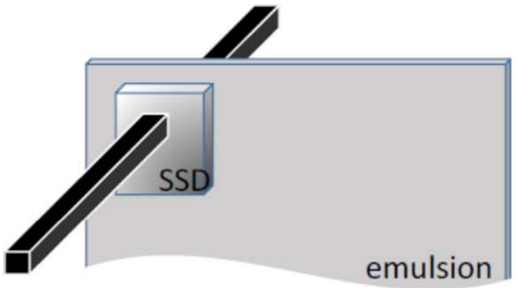
これらを認識
できるか？
確認中

心配事（２） SSD/Emulsionの位置合わせ

SSD-Emulsion alignment with beams

: 2 step procedures

1. Black spot

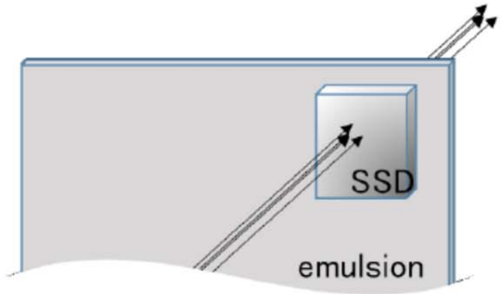


Rough alignment : ~200um accuracy

A guide toward a pattern matching region.
Can be recognized by human eyes.

Beam track density: ~10^5 tracks/mm^2
=> High-intensity π beam is essential.

2. Beam pattern matching

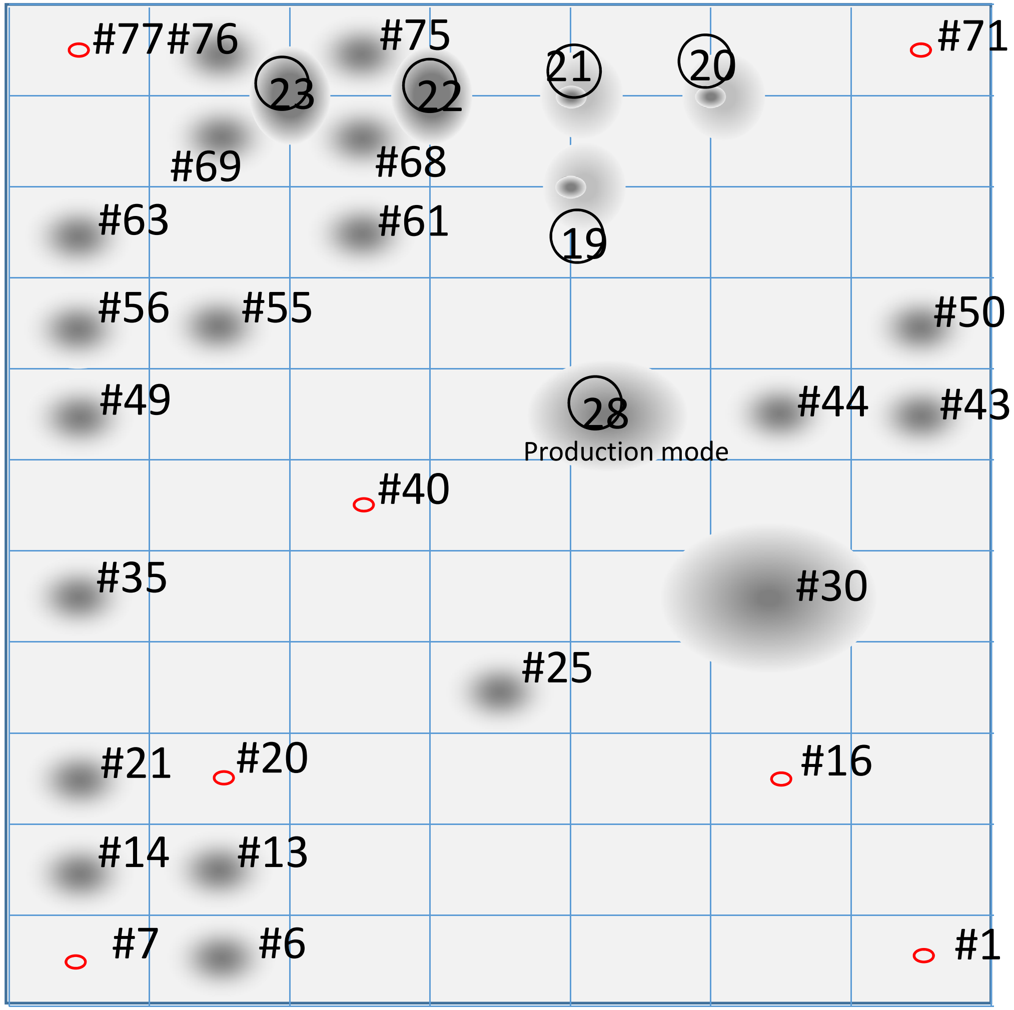


Precise alignment : ~20um accuracy

It is necessary for automated track following
over several emulsion layers.

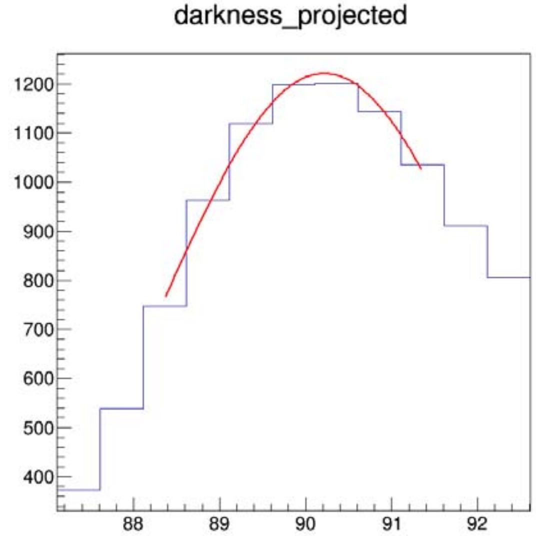
Beam track density: ~10^2 tracks/mm^2
PID by track thikness and S/N ratio is important.
=> Low-momentum p bar beam is a candidate.

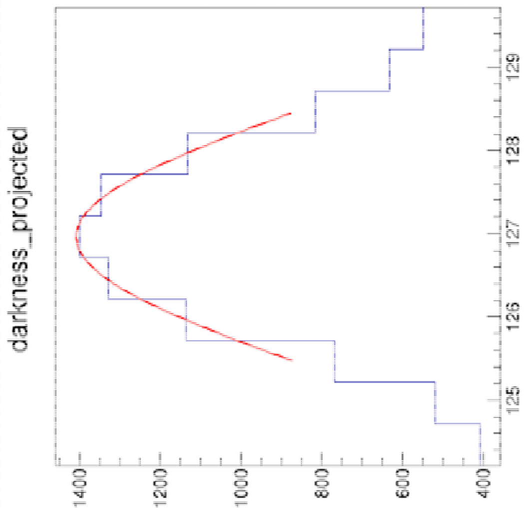
SSD/Emulsion 位置合わせ

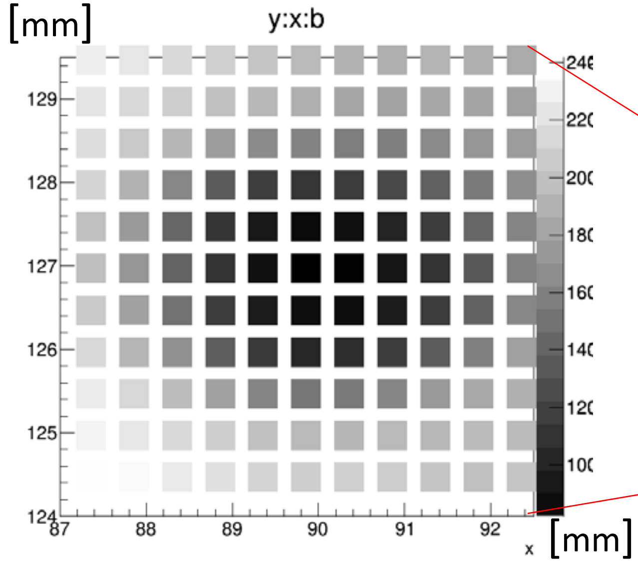


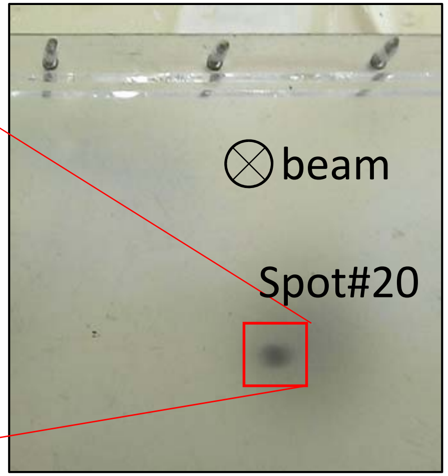
1. Black-spot の位置合わせ
   - #19, #20, #21
   - X, Y, Θ
2. p_bar beam の Pattern matching
   - #1, #7, #77

Black spot #20 (emulsion)









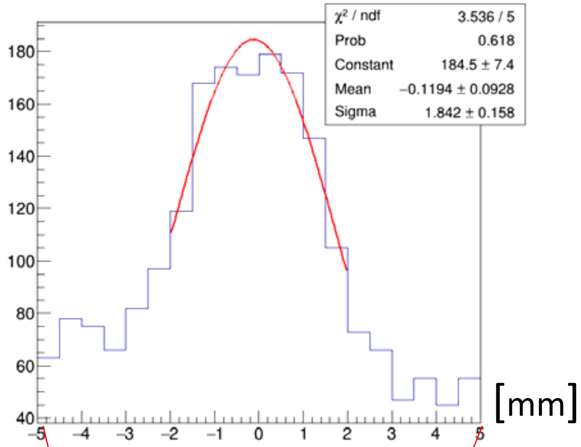
*Projection

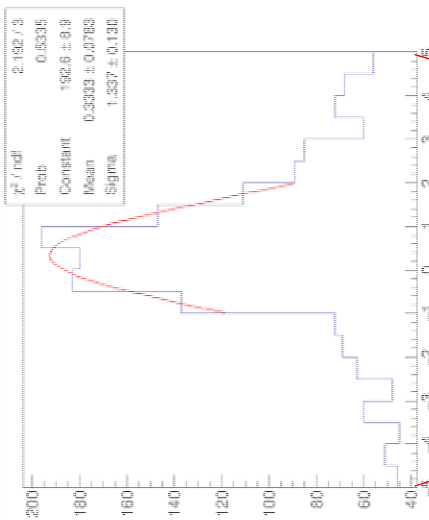
*Gaussian fitting:
 Darkest point +- 3mm
In this case, peak is (90.22, 126.97)

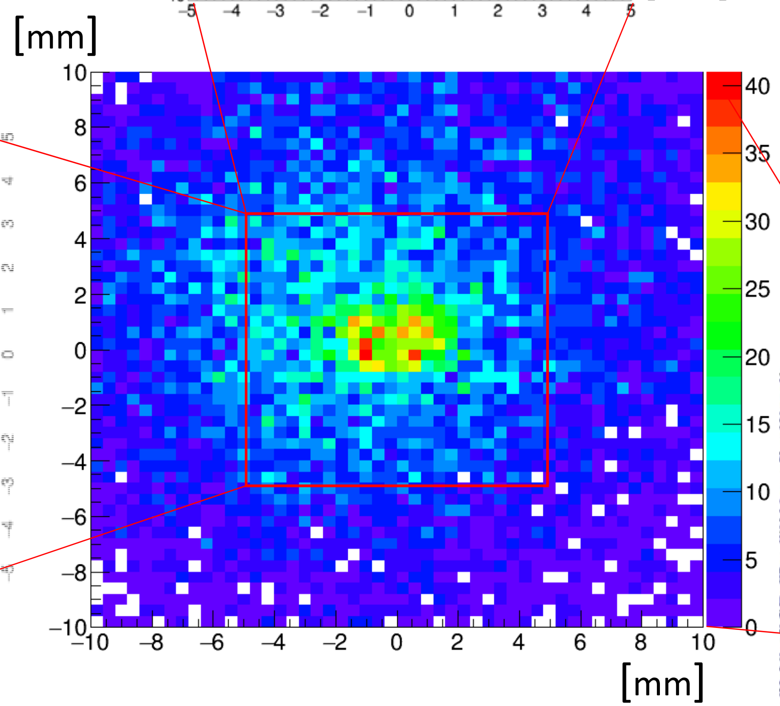
20x (F.O.V 330micron*290micron)
Pitch: 0.5mm
Mean brightnesses of each view

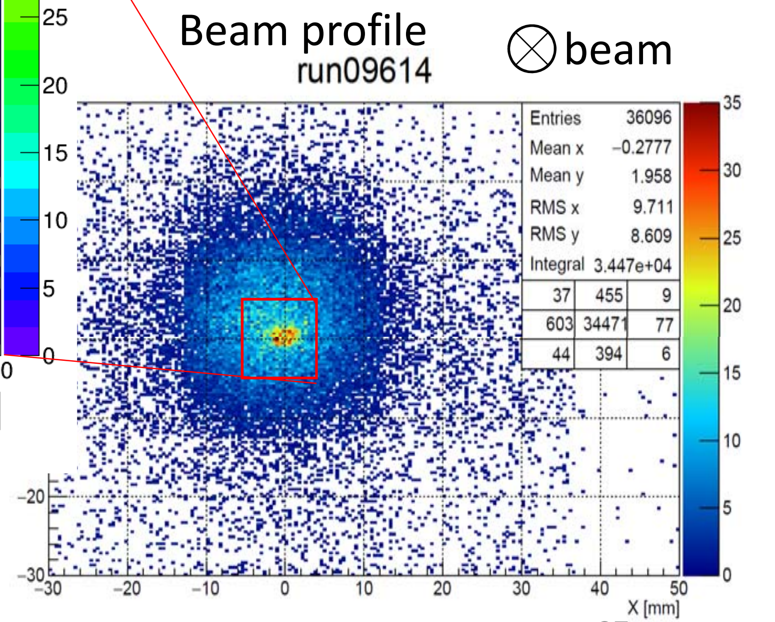
Ellipse
Width ~4mm
Height ~3mm

Black spot (Beam profile by SSD)





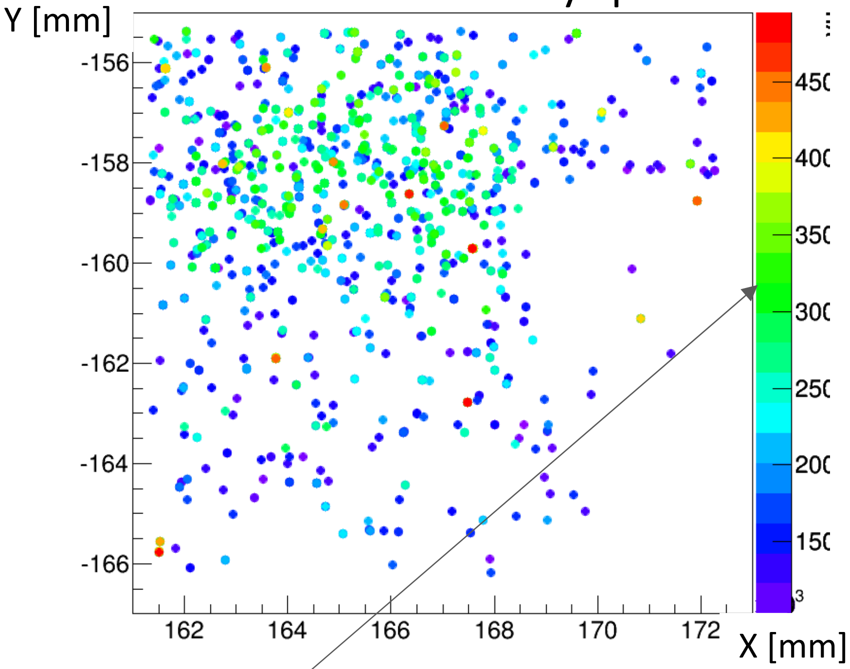




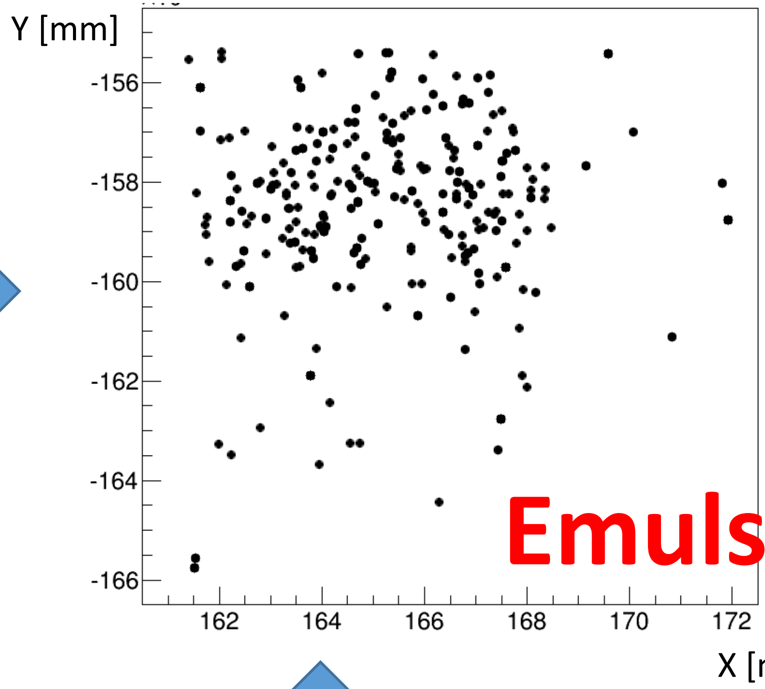
*Projection
*Gaussian fitting:
Maximum bin center +- 2.5mm

In this case, peak is (-0.119, 0.333) in SSD coordinate selecting p-bar track

Detected tracks in x-y space



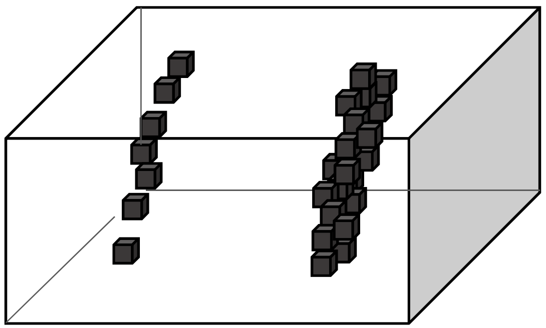
Cutting by a threshold



Emulsion

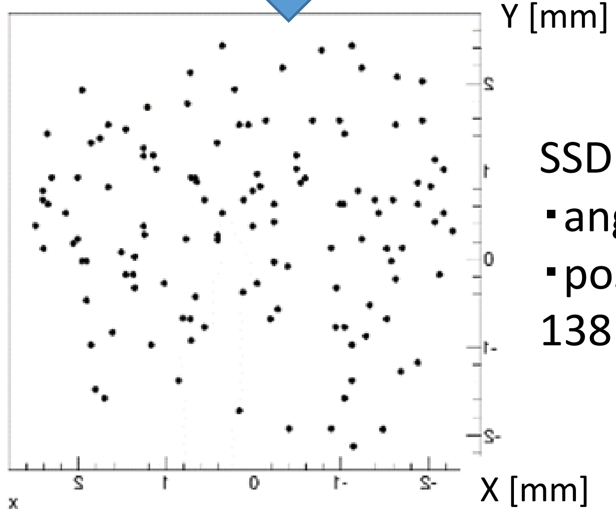
Matching

This value reflects number of pixels, i.e, volume and boldness of a track.



small <-- Volume --> large

SSD

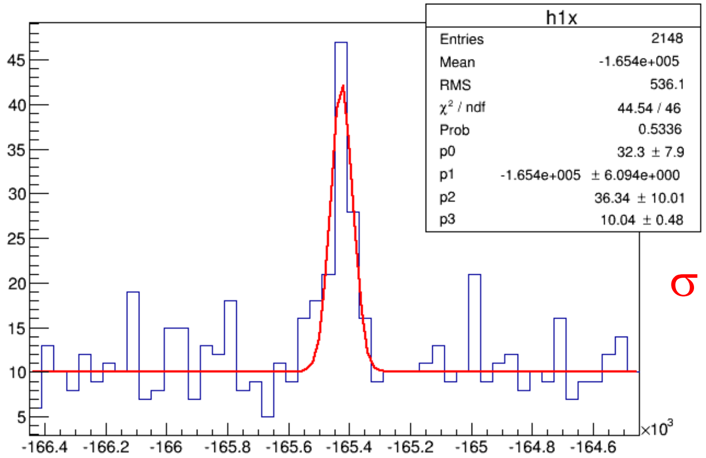


SSD

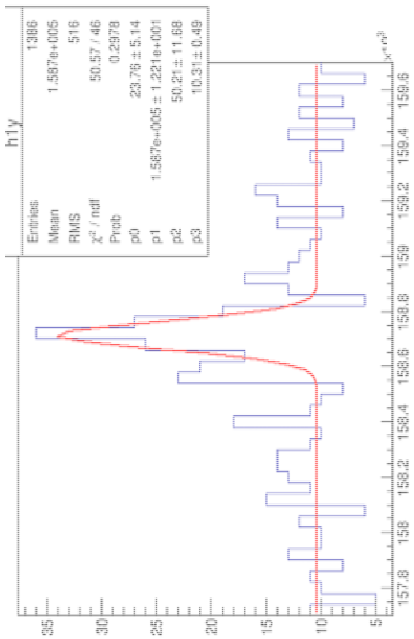
- angle < 50mrad
- position < 5mm

138 tracks

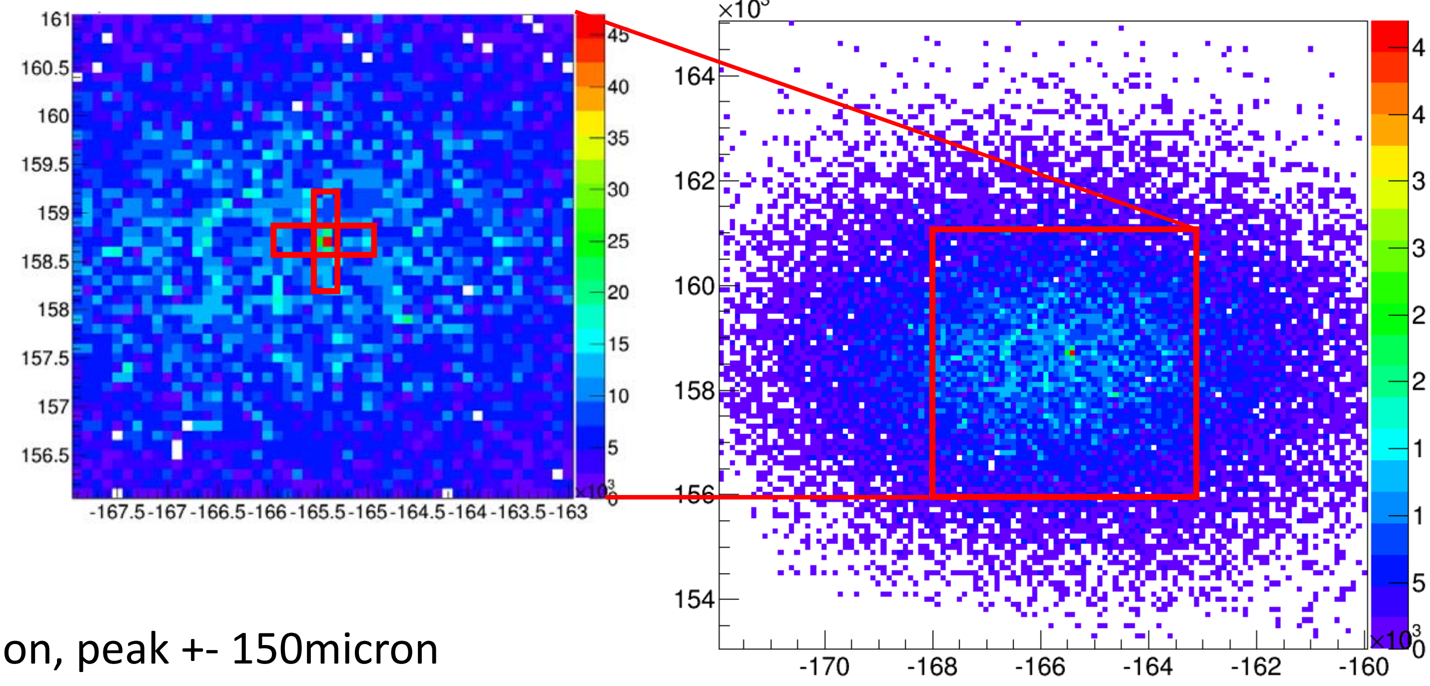
Peak detection



$\sigma \sim 10\mu m$



(dx, dy) = SSD(-X, Y) – emul(x, y)



*Width for Projection, peak +- 150micron

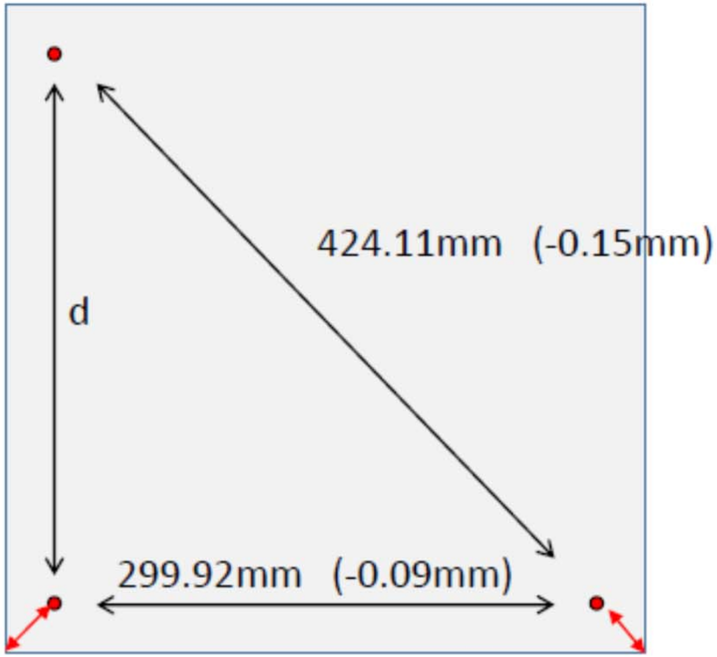
*In this case, peak is (165.4,   -158.7)

結果

Mapping in grid-mark coordinate

Distance “d”
300.05 mm in Mover coordinate
300.02mm in grid-mark coordinate
-0.03mm diff

100μm以下の精度で
Mover (SSD)と
grid-mark (emulsion)
の位置は一致

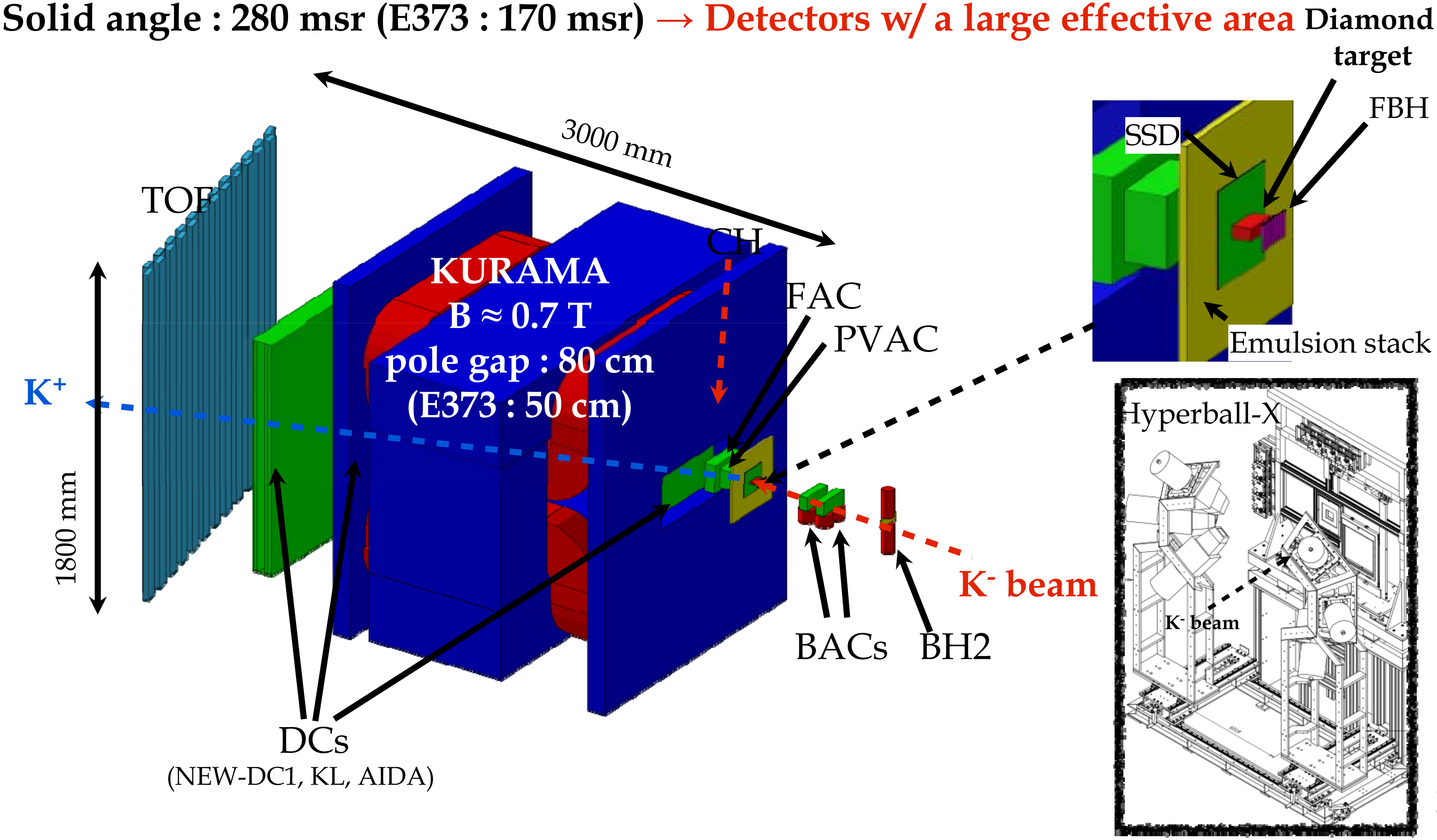


Peak is
(20.00, 25.10) from estimated corner
(20.06, 25.64) from actual corner

(25.00, 25.10) from estimated corner
(25.67, 27.36) from actual corner

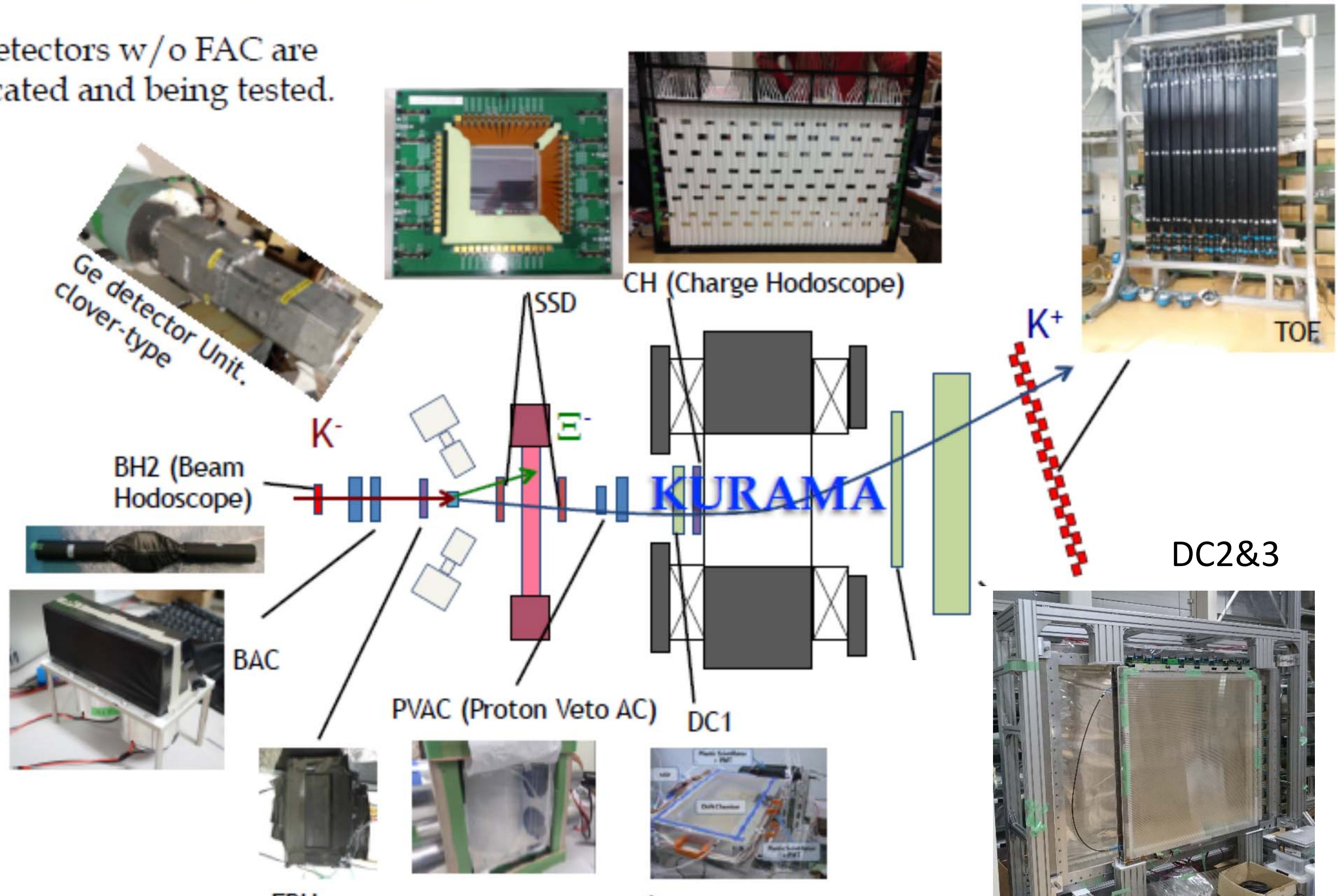
New KURAMA spectrometer

Beam : 1.67 GeV/c, 10^5 - 10^6 K^-/spill → Operation with a high counting rate
Solid angle : 280 msr (E373 : 170 msr) → Detectors w/ a large effective area



Preparation of the KURAMA spectrometer

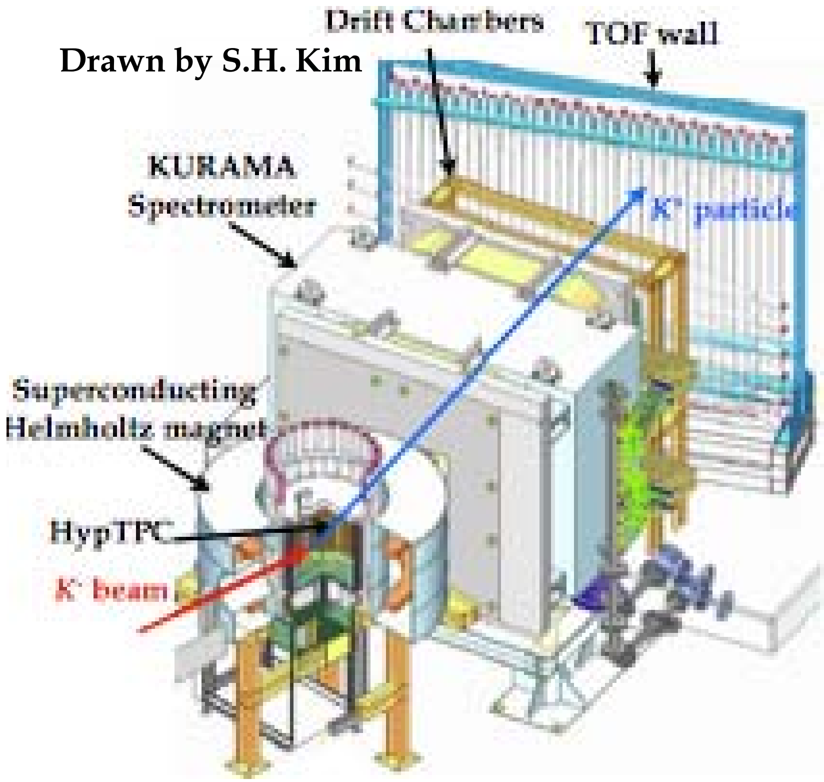
All detectors w/o FAC are fabricated and being tested.



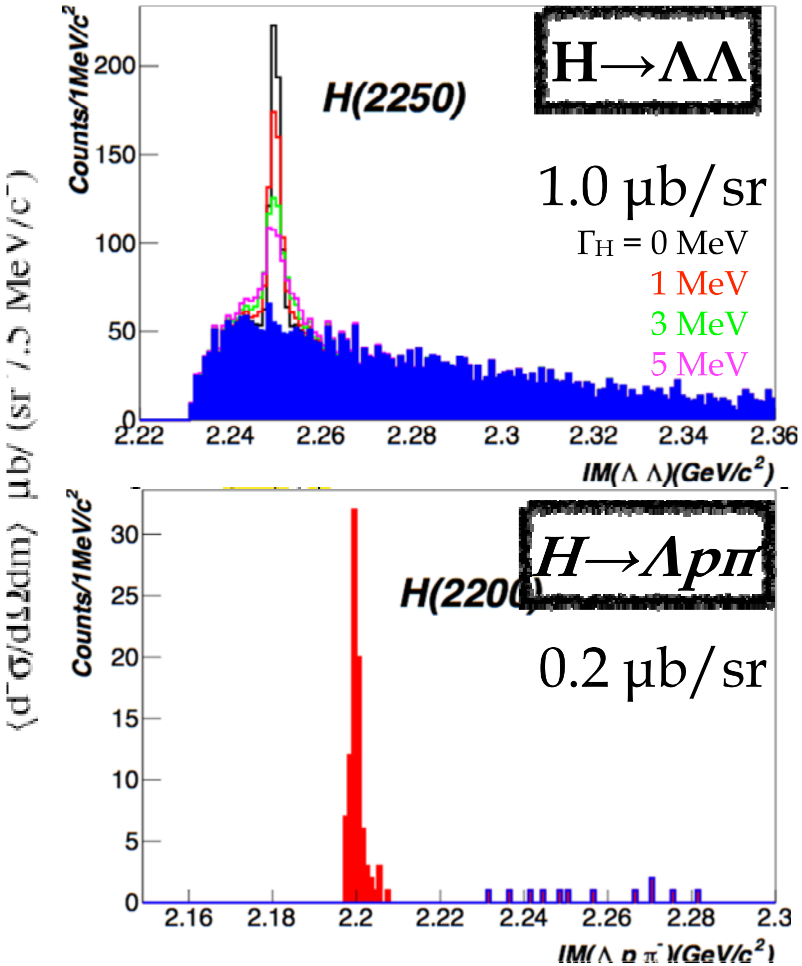
Group A01

H-Particle Search with Hyp-TPC (J-PARC E42)

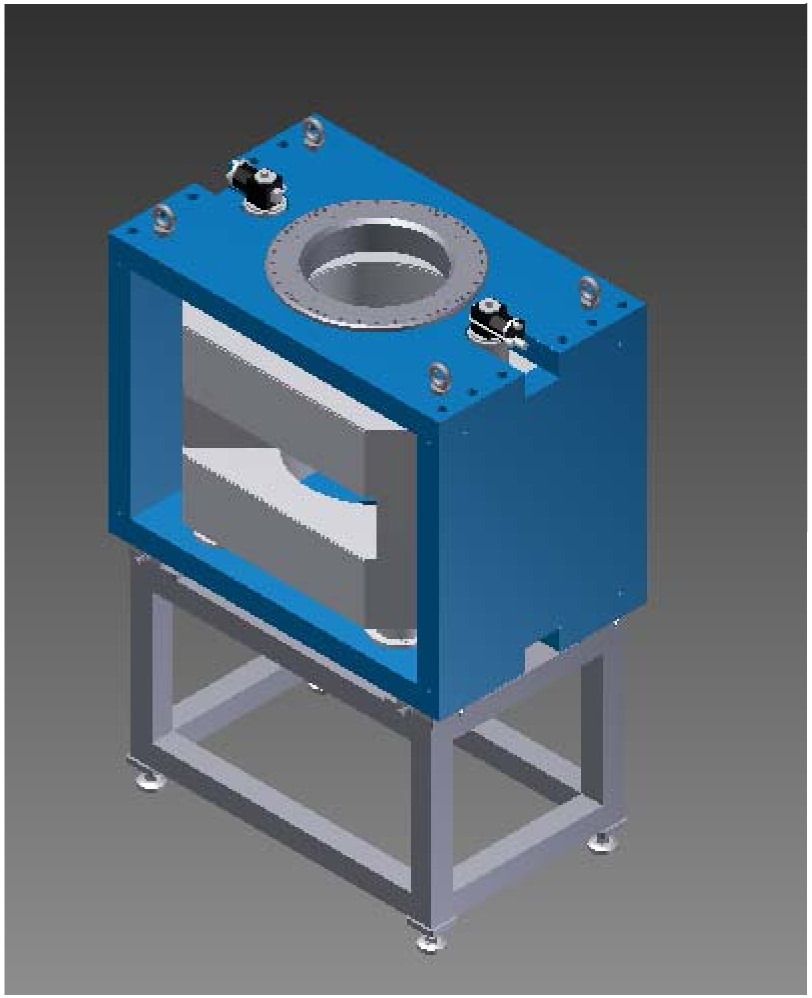
Most stable spin and isospin singlet with 6-quarks (uuddss) compose was predicted by R. L. Jaffe. We search for H→ΛΛ→π⁻π⁻pp and H→Λπ⁻p→π⁻π⁻pp with Hyperon Time-Projection-Chamber HypTPC), Yield : 11000 *ΛΛ*



- Large Acceptance
- Target is inside TPC
- High resolution (~1 MeV/c^2) .



SC Helmholtz magnet

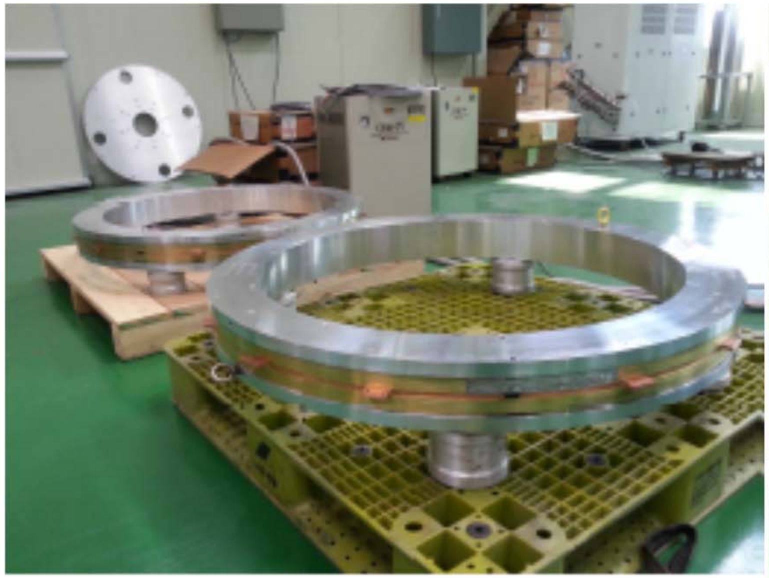


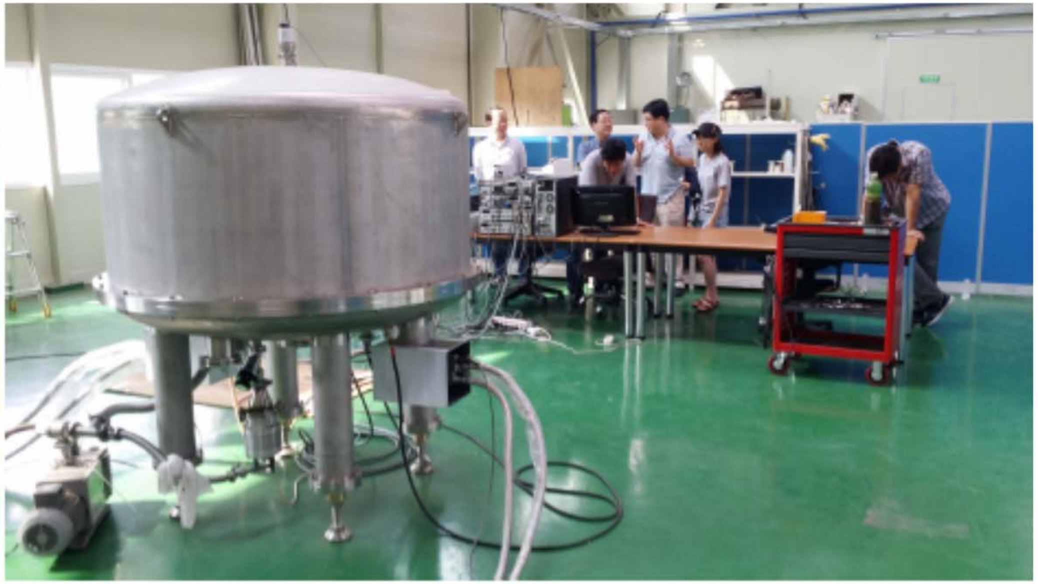
- Magnetic field at center : 1.5 T
- Conduction cooling with two GM refrigerators
- Coil diameter : 1000 mm
- Conductor : ϕ 0.77 mm, Cu/SC=2.4, PVA insulation
- Number of turns : 7259.5/ coil (78×96)
- 1 Coil length : 23.4 km
- Operation current : 99.9 A
- Total inductance : 251 H with yoke
- Weight : 10 ton (the yoke thickness of 125 mm)

（一様）磁場領域　500mmϕ× 500mm
検出器領域　800mmϕ×1000mm

under fabrication by KR-tech, Deagu, Korea

Single coil test in August

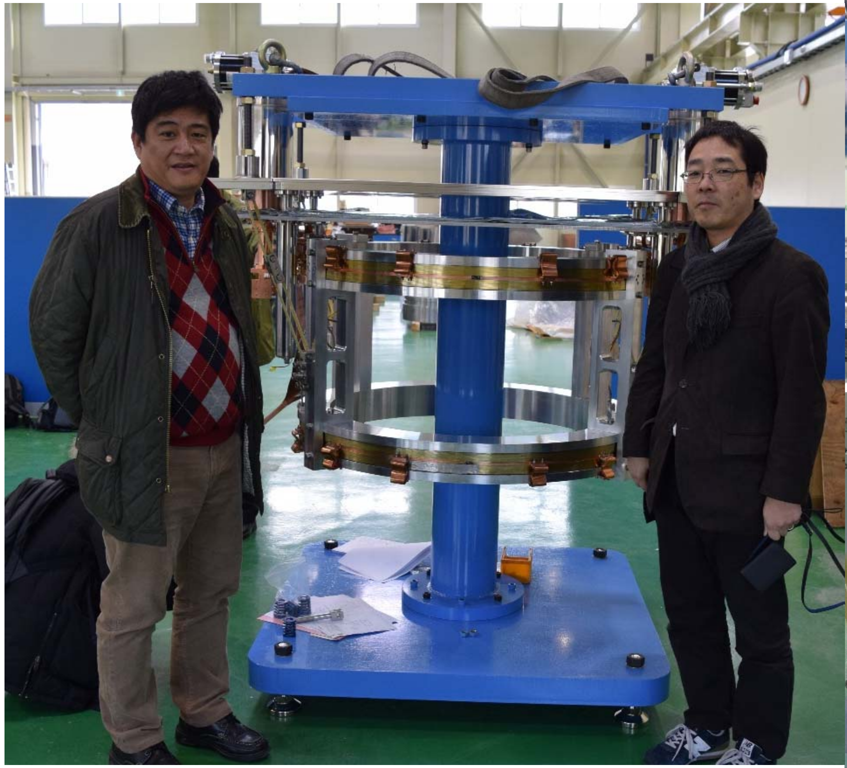




Test chamber + 2 GM coolers
100 A 通電成功
100A/2.5 h のramping speedで 1Kの温度上昇

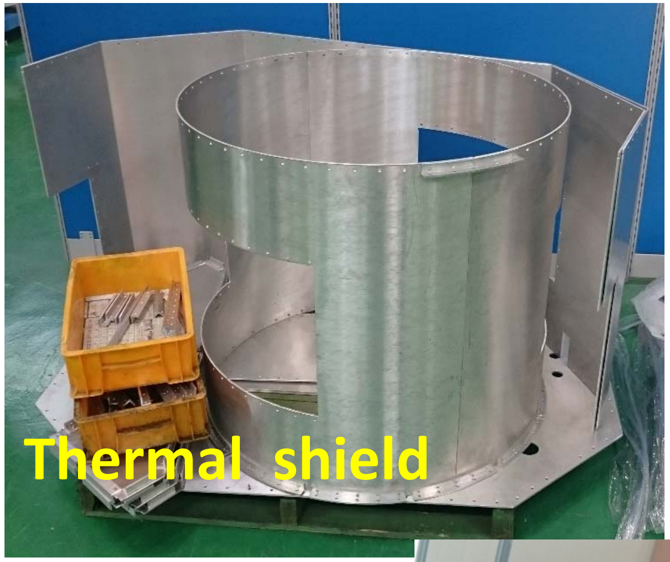
Coil Assembly (Nov.30)

Kevlar belt support

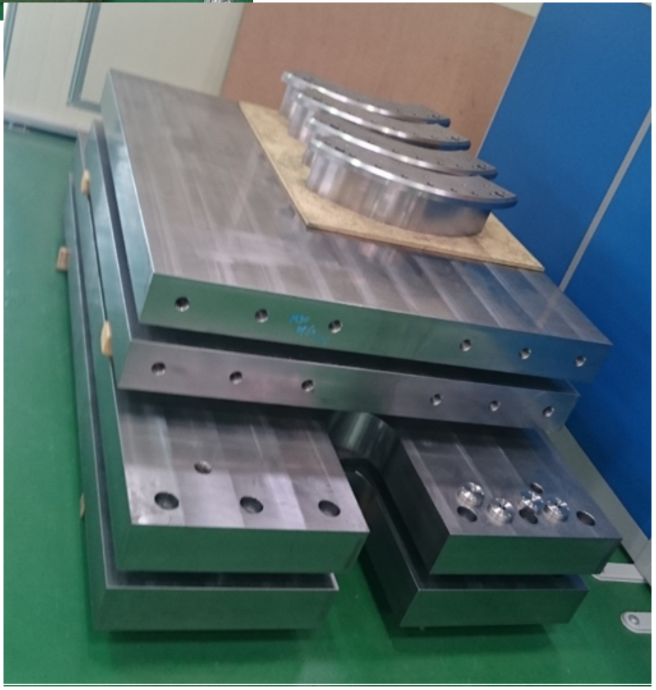


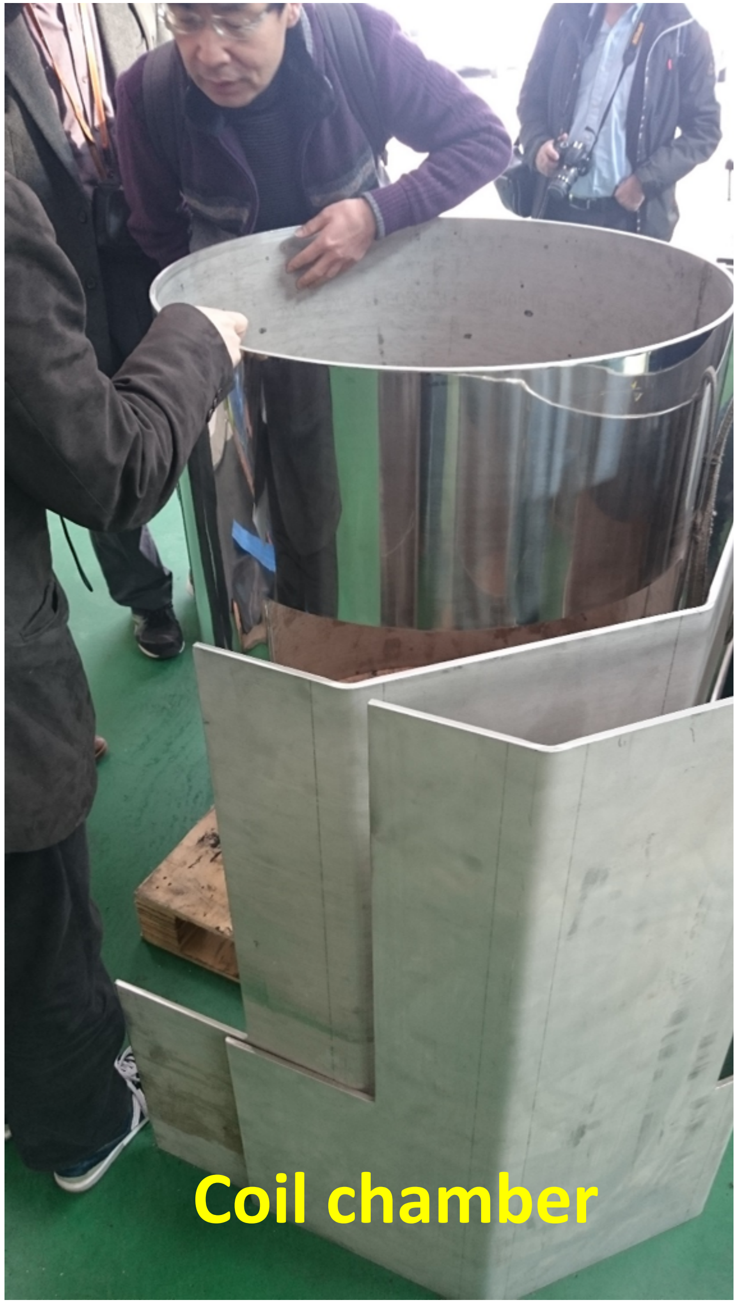
HTC current leads

Others (Nov.30)



Yoke
1010 steel





Schedule

As of August 31, 2015

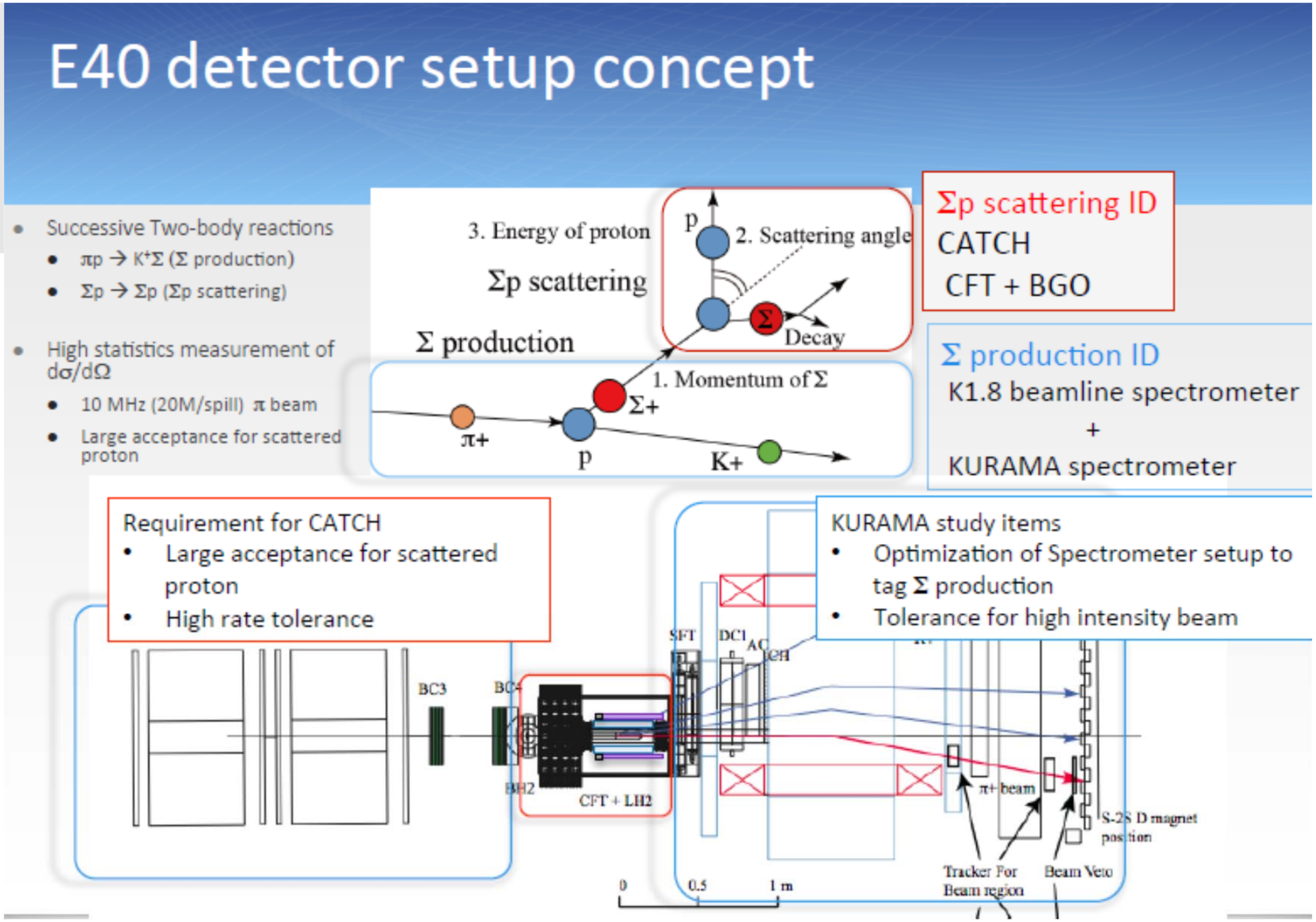
Month	9	10	11	12	1	2	3
Cryocooler		→					
Cryostat/Yoke	→	→	→				
Assembling			→	→			
Magnet Test					→	⇒ →	
Magnet Inspection					→	⇒	
Delivery						→	→

We need 2 compressors (air-cooled) and
power supply
as well as storage/test space in J-PARC/Tsukuba

Group A02

Σ-p scattering Exp. at J-PARC (E40)

$\Sigma^+ p$ (= $\Sigma^- n$)
$\Sigma^- p$
$\Sigma^- p \rightarrow \Lambda n$



using high-intensity (~10MHz) π beam

Summary

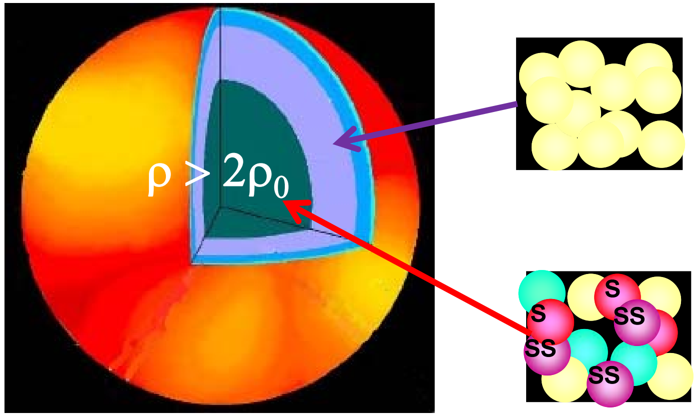
- SKSの第２ステージ(SKS@J-PARC K1.8)が終了
  - 5 experiments,　>7 papers,　6 (+5) Ph.D
- Double-strangeness systemの研究本格化
  - 500k K^-/spill, K:pion= 1:1 beam at 40kW
  - SKS → KURAMA spectrometer (2016/2 —)

J-PARCハドロン実験の１つのマイルストーンを達成

- KURAMA Spectrometerを用いての実験
  - Emulsion 実験 E07
    - SSD-Emulsion位置合わせ　　OK
    - Emulsionの潜像蓄積　　調査中
    - KURAMA Spectrometer　　Installation待ち
  - H search E42 using Hyperon Spectrometer (Hyp-TPC)
  - ΣN散乱実験 E40

backup

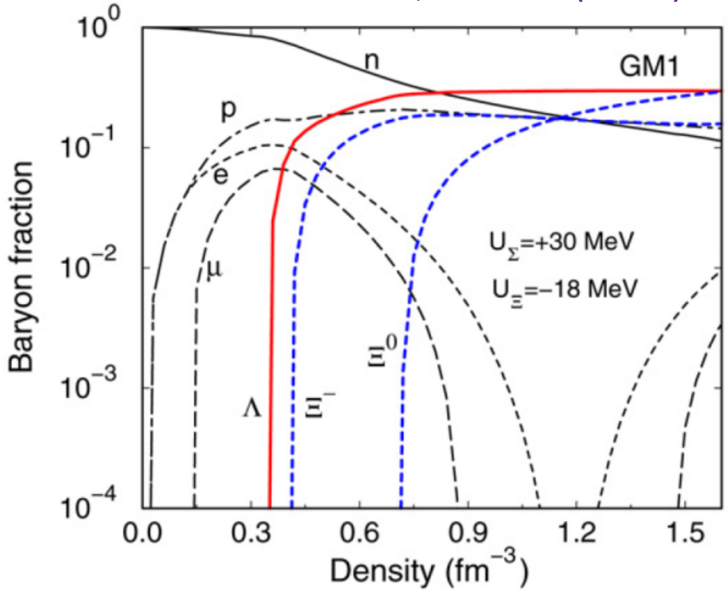
Strangeness in the Core of N-Stars



Neutron matter

Nuclear matter with Strangeness (hyperons,Y)

J.Schaffner-Bielich, NPA804(2008)309



Hyperons emerge at high density ($\rho > 2\rho_0$?)

Detail depends on the potential (interaction).

$$\mu_Y = m_Y + \frac{k_F^2}{2m_Y} + U_Y(k_F)$$

Soften of EOS

Inconsistent!?

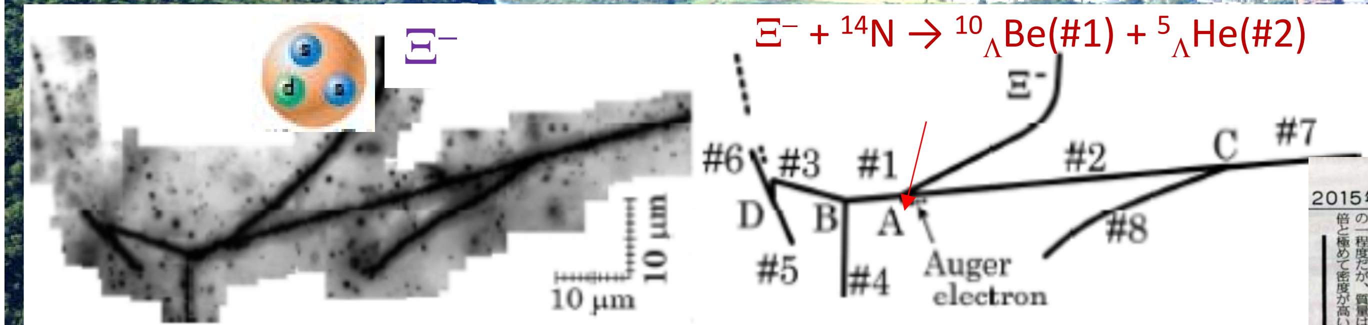
Observation of $2M_{\odot}$ N-stars

Repulsive at high-ρ
Quark phase
…

Experimental determination of
YN/YY interactions
Y potential
at ρ_0 / in vacuum

Discovery of Ξ-Nucleus for the first time
– KISO Event –

In the test application of Overall Scanning Method, which is under R&D for incoming E07 Experiment, to the emulsion sample irradiated before, we found the event in which Ξ^- is deeply bound in ^{14}N. This is the first evidence of Ξ-nucleus



Newspaper
（2015/1/19）


2015年（平成27年）1月19日（月曜日）　中 日

岐大、宇宙創生の謎に一歩

中性子星に「グザイ」存在

岐阜大の仲沢和馬教授（実験物理学）と日本原子力研究開発機構（茨城県）などのグループは、恒星の最終形態である中性子星に含まれていると推定されている素粒子「グザイ」の性質を解明した。中性子星にグザイが存在することをほぼ確定する成果で、宇宙創生の秘密に迫る一歩として注目される。（松野穂波）

仲沢和馬教授

結果は、日本物理学会などがインターネットで発表する学術論文誌に近く掲載される。

中性子星は、寿命が尽きた恒星が爆発した後に残る星。大きさは太陽の百万分の一程度だが、質量は約二倍と極めて密度が高い。このため、素粒子のうち陽子や中性子より重い「ラムダ」「シグマ」「グザイ」のいずれかが存在すると考えられた。

仲沢教授は二〇〇一年、通常は陽子と中性子でできている原子核に、ラムダを結合した超原子核を作製。陽子、中性子とラムダが結び付くことが分かり、中性子星に存在する可能性が高まった。シグマは原子核と反発する関係と判明し、残るグザイの性質を解き明かすことが、中性子星を知る最後の鍵と位置付けられていた。グザイは、中性子星より低密度の地球では百億分の一秒で崩壊してしまうため、地球上に存在しないとみられる。このため、仲沢教授らは高エネルギー加速器研究機構（茨城県）で、K中間子という粒子の放射線をダイヤモンドに照射することで、人工的にグザイ粒子を生成。特殊な写真乾板に当てて顕微鏡で撮影した。約八百万枚の画像を分析した結果、窒素の原子核にグザイが吸収された超原子核を発見した。

超原子核内の引力を測定すると、原子核とグザイが互いの電磁力の三千倍の強さで引き合っていた。グザ

中性子星
大きさは太陽の100万分の1だが重さは2個分
重い素粒子が存在?
太陽
太陽
○=陽子　△=中性子　●=グザイ、ラムダなどの重い素粒子

Binding energy of Ξ^-

> 1.11±0.25 MeV　c.f. 0.17 MeV（atomic orbit）

4.38±0.25MeV if $^{10}_{\Lambda}Be$ is in ground state.

Attractive ΞN interaction has been established.

In E07, ~100 double-strangeness events will be observed.

⇒　detailed information on S=-2 interaction