

# ハイブリッドエマルジョン実験

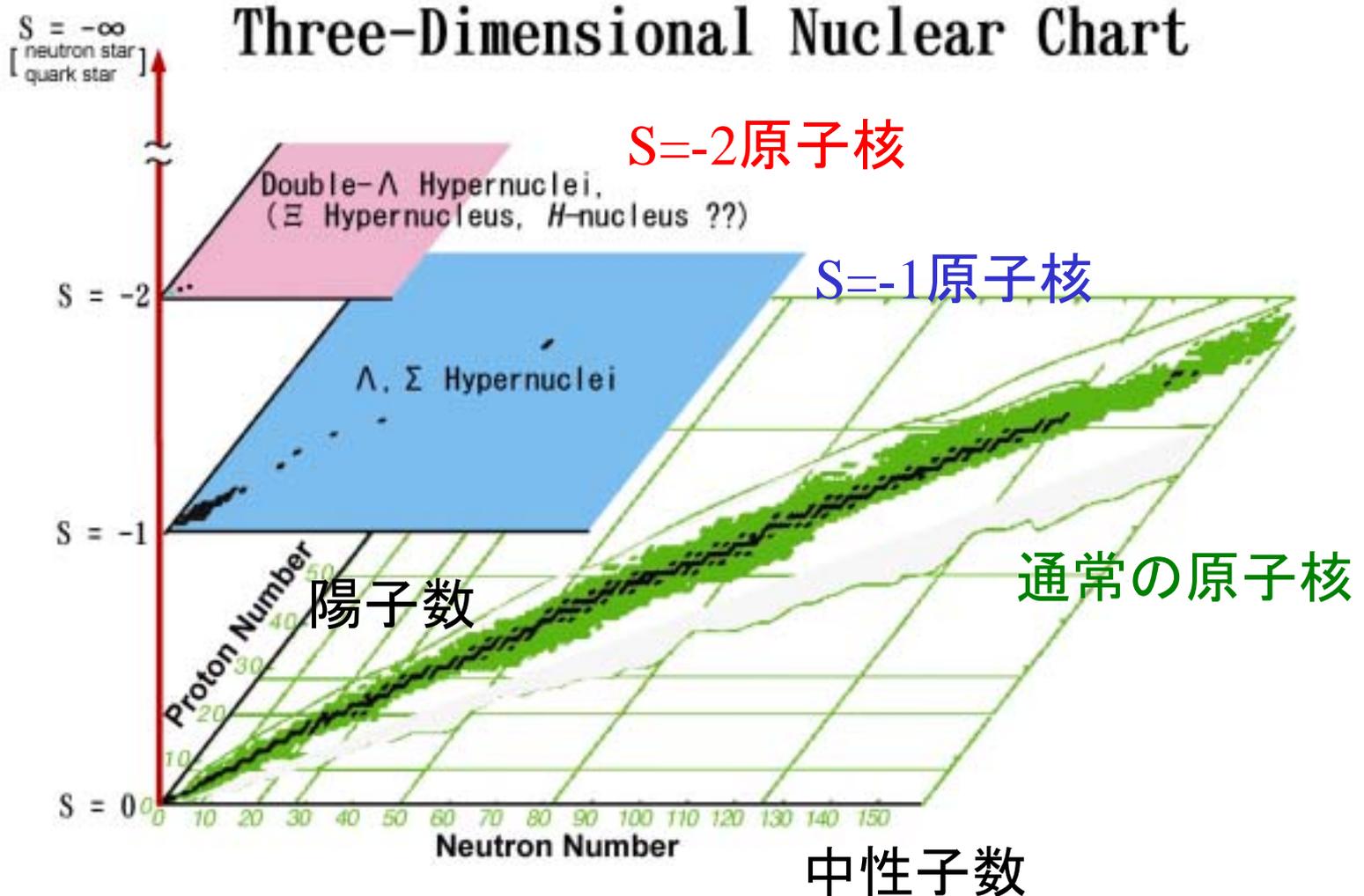
Study of  $S=-2$  Nuclear Systems  
by using Hybrid Emulsion Method

東邦大学理学部 渋谷 寛

- ・ $S=-2$  核の物理
- ・ハイブリッドエマルジョン法
- ・KEK-PS E176 & E373
- ・BNL-AGS E964
- ・J-PARCでの実験
- ・自動飛跡読み取り装置

# S=-2核の物理

ストレンジネス軸を加えた3次元原子核チャート



# S=-2核の物理

- $\Lambda\Lambda$  相互作用の情報を得るにはダブル $\Lambda$ ハイパー核の検出とその質量測定が必要不可欠

$$\begin{aligned}\Delta B_{\Lambda\Lambda}(^A_{\Lambda\Lambda}Z) &= B_{\Lambda\Lambda}(^A_{\Lambda\Lambda}Z) - 2B_{\Lambda}(^A_{\Lambda}Z) \\ &= 2M(^A_{\Lambda}Z) - M(^A_{\Lambda\Lambda}Z) - M(^A_{\Lambda}Z)\end{aligned}$$

- ダブル $\Lambda$ ハイパー核は、Hダイバリオン  
(6 quarks (uuddss)の束縛状態)と密接に関係している

$$M_H \geq 2m_{\Lambda} - B_{\Lambda\Lambda}$$

- $\Lambda\Lambda - \Xi N - \Sigma\Sigma$  混合

SU(3) flavor singlet状態:  $|H\rangle = \sqrt{\frac{1}{8}}|\Lambda\Lambda\rangle + \sqrt{\frac{4}{8}}|\Xi N\rangle - \sqrt{\frac{3}{8}}|\Sigma\Sigma\rangle$

# ハイブリッドエマルション法

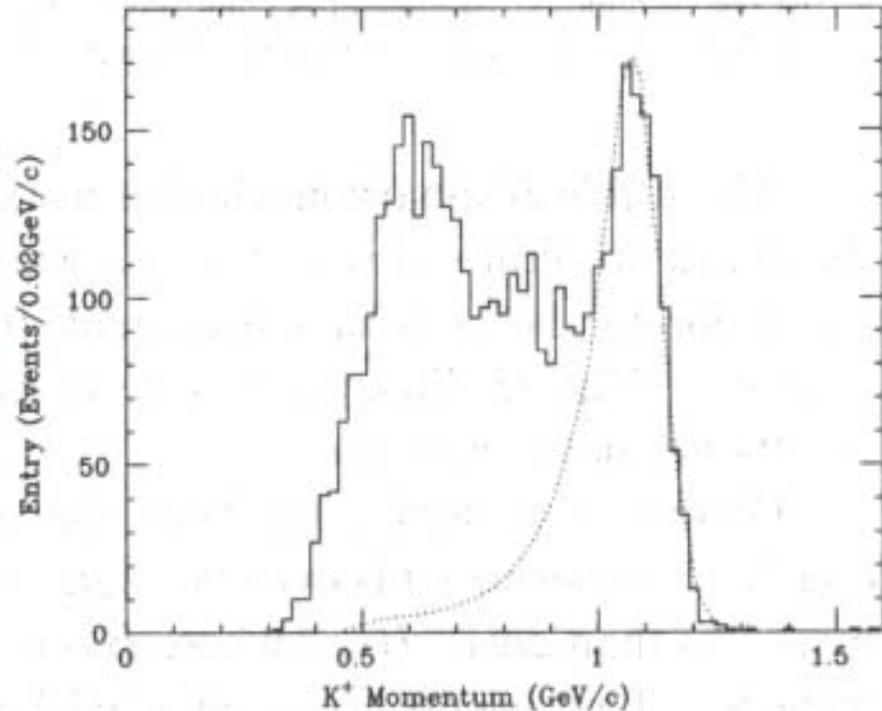
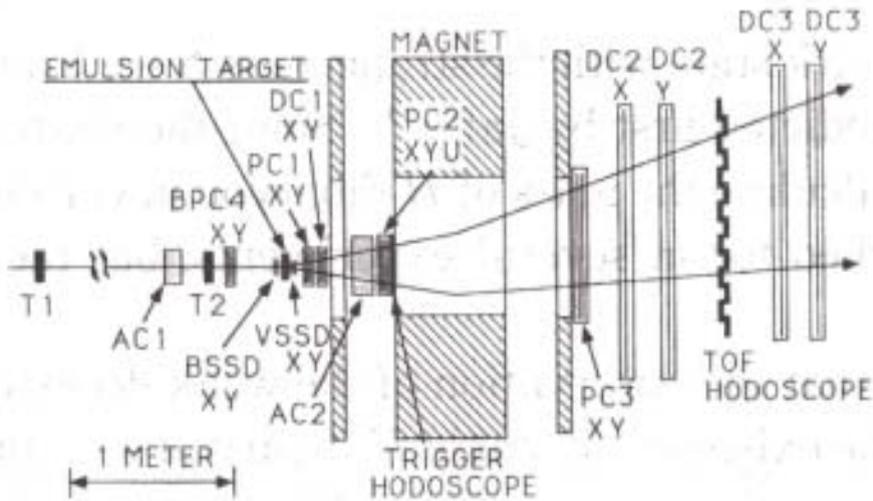
- 準自由反応  $K^- + p \rightarrow K^+ + \Xi^-$  により生成された  $\Xi^-$  粒子をエマルション中の原子核に静止吸収させると、その核内で  $\Xi^- + p \rightarrow \Lambda + \Lambda$  の反応がおこる。この2つの  $\Lambda$  を含むダブル  $\Lambda$  ハイパー核の連続的な弱崩壊を検出し、その質量を測定する。
  - 1) 準自由反応  $K^- + p \rightarrow K^+ + \Xi^-$  の選別  
(ACC, TOF, SSD, SciFi etc. = Electronic Detectors)
  - 2) ダブル  $\Lambda$  ハイパー核の連続弱崩壊の検出と質量の測定  
(Emulsion)

# KEK-PS E176



Total:  $10^9$   $K^-$  beam exposure  
 $10^8$   $K^-$  interactions  
 (1988, 1989)

6000 ( $K^-, K^+$ ) reactions  
 1500 ( $K^-, K^+$ ) reactions with  $P_{K^+} > 1$  GeV/c

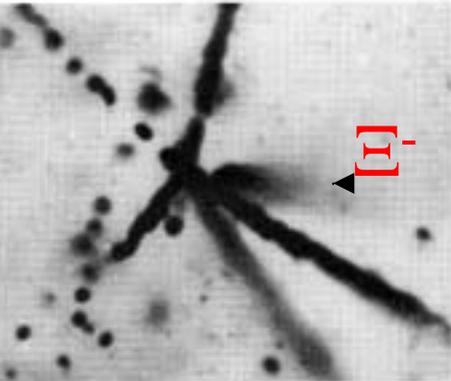


80  $\underline{E}^-$  stops in emulsion

$K^+$  momentum

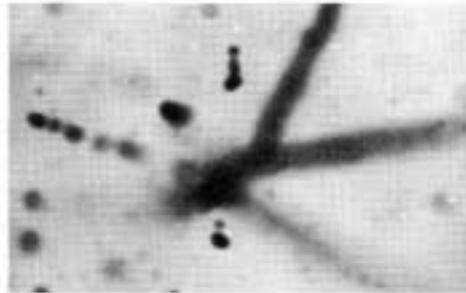
# KEK-PS E176

Viewed from  
the vertical direction



(a)

Viewed from  
the horizontal direction



(c)

The sequential weak decay  
of a double hypernucleus (DHN)  
was directly observed.

Range of DHN =  $3.9\mu\text{m}$

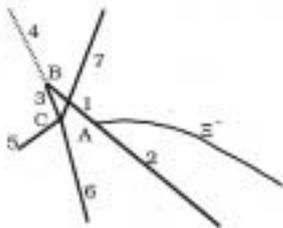
Range of SHN =  $1.9\mu\text{m}$

The DHN is assigned as  
either  ${}_{\Lambda\Lambda}^{10}\text{Be}$  or  ${}_{\Lambda\Lambda}^{13}\text{B}$ .

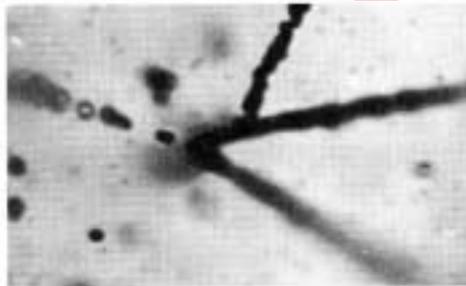
$$\Delta B_{\Lambda\Lambda} = 4.9 \text{ MeV for } {}_{\Lambda\Lambda}^{13}\text{B}$$

$$\Delta B_{\Lambda\Lambda} = -4.8 \text{ MeV for } {}_{\Lambda\Lambda}^{10}\text{Be}$$

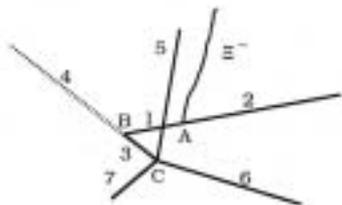
S. Aoki et al., Prog. Theor. Phys. 85(1991)1287



(b)



(d)



(f)



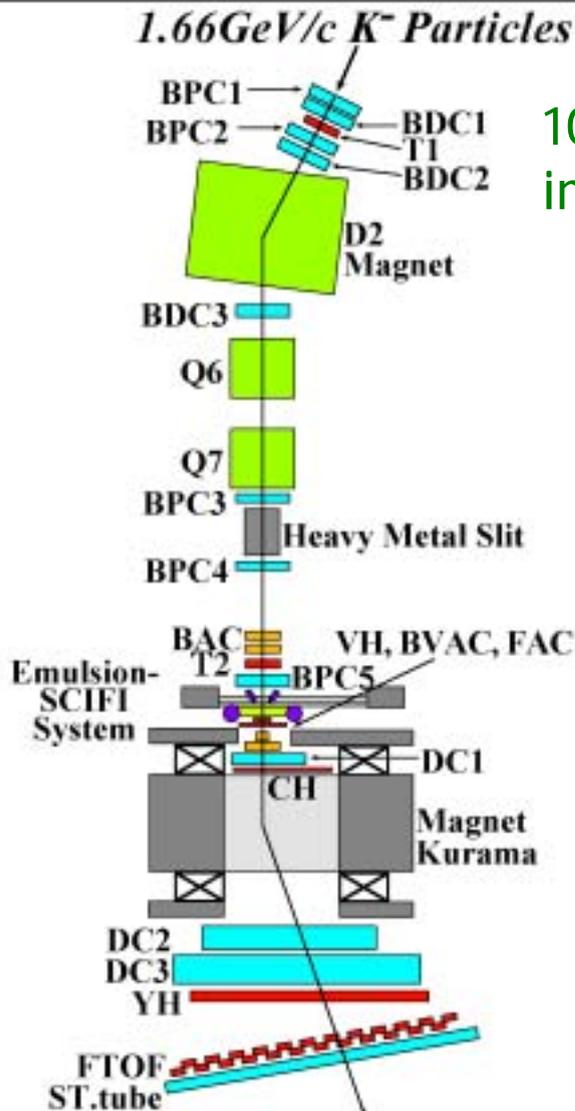
(e)

# KEK-PS E373

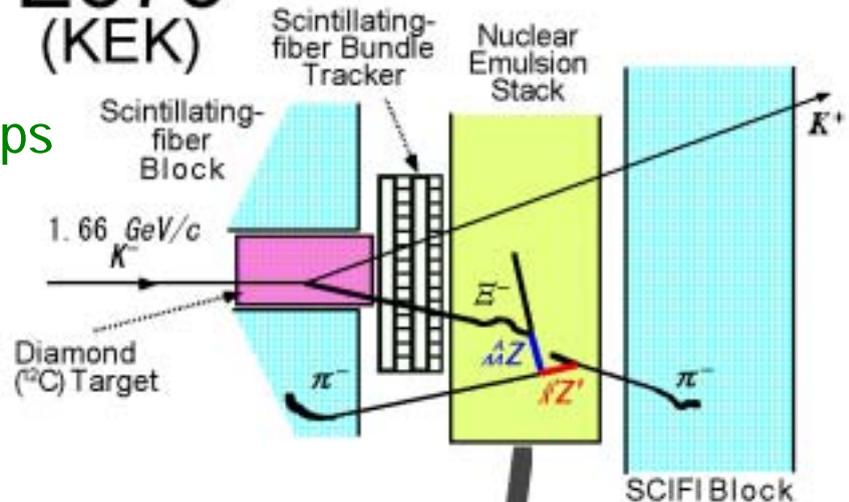
E176の10倍の統計を目指す  
 Total  $1.4 \times 10^{10}$   $K^-$  irradiated  
 (1998, 1999, 2000)

## E373 experimental setup

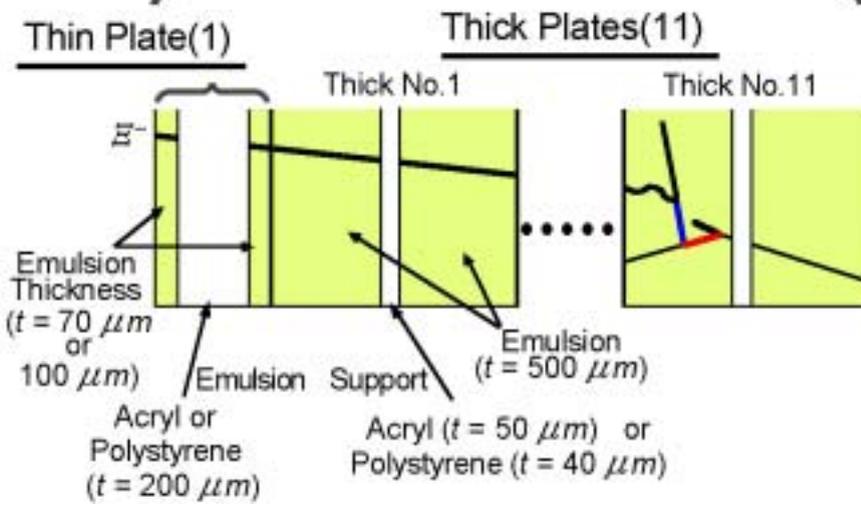
1000  $\Xi$  stops  
 in emulsion



## E373 (KEK)

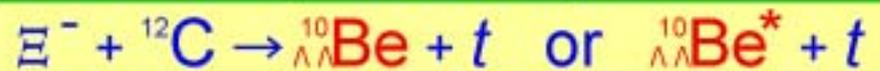


### Emulsion Stack



# Demachi-yanagi event

\* **two body** case at point A



$$\Delta B_{\Lambda\Lambda} : -1.14 \pm 0.19 \quad \text{or} \quad +1.86 \pm 0.19 \text{ MeV}$$

$$B_{\Lambda\Lambda} : 12.29 \pm 0.17 \text{ (励起状態) MeV}$$

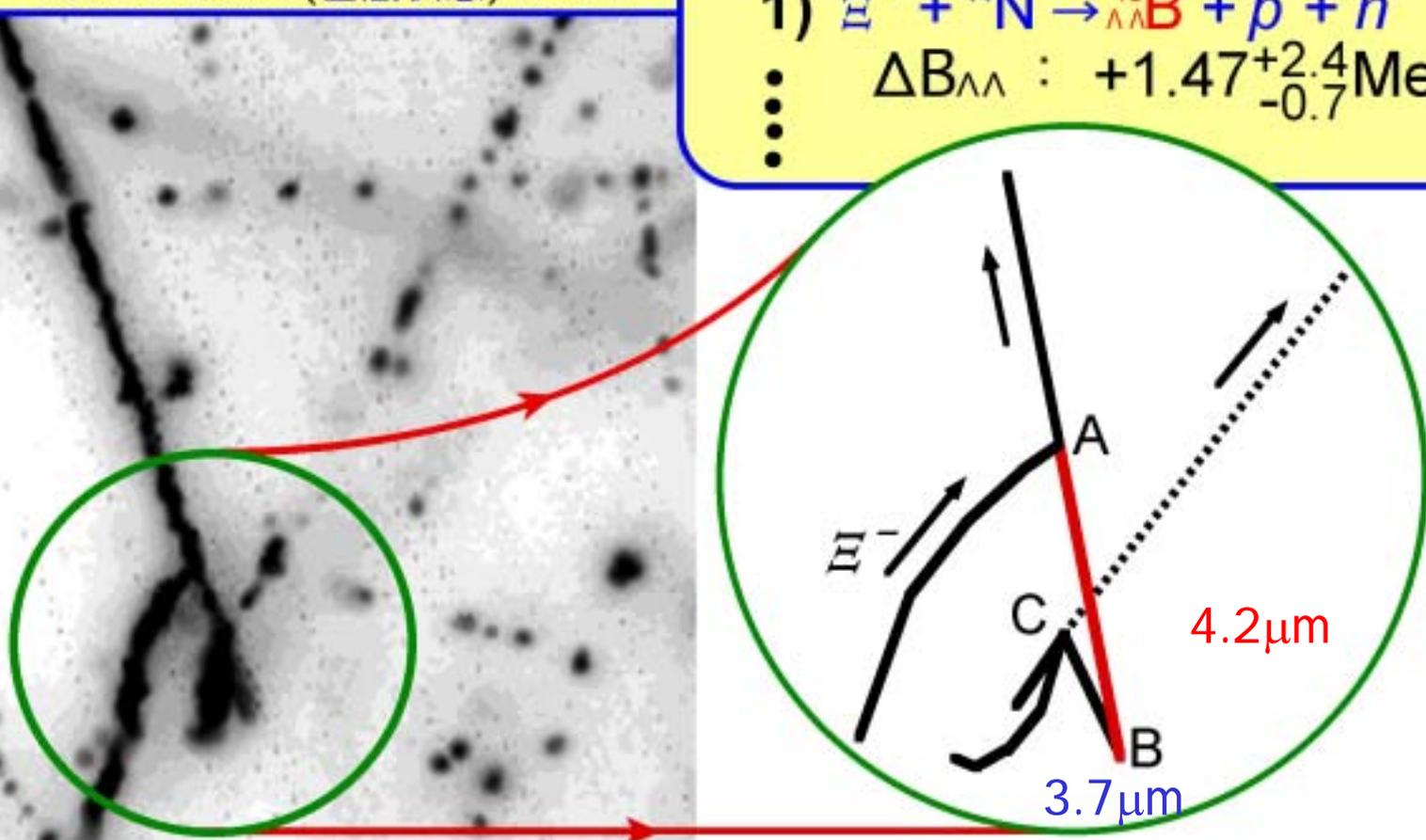
$$15.29 \pm 0.17 \text{ (基底状態) MeV}$$

\* **three body** case at point A



$$\vdots \quad \Delta B_{\Lambda\Lambda} : +1.47^{+2.4}_{-0.7} \text{ MeV}$$

$\vdots$



# NAGARA event

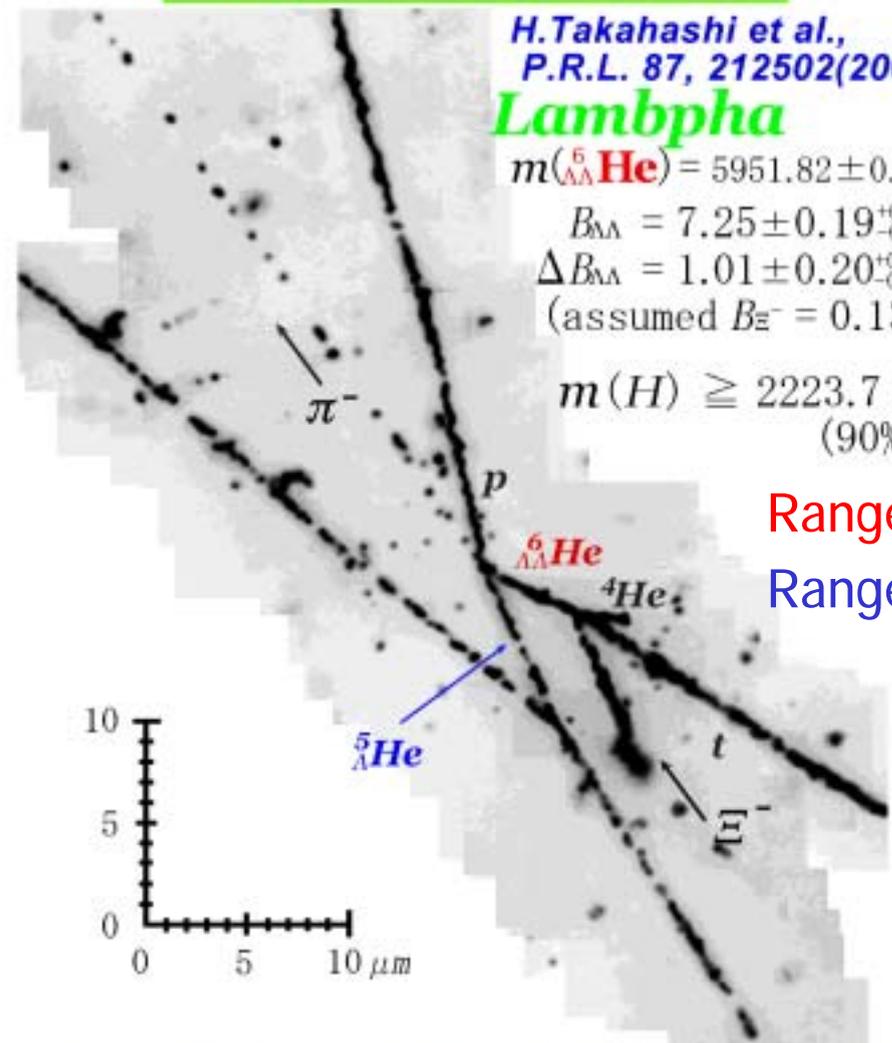
${}_{\Lambda\Lambda}^6\text{He}$  double-hypernucleus  
Unique interpretation!!



H. Takahashi et al.,  
P.R.L. 87, 212502(2001)

## Lambpha

$m({}_{\Lambda\Lambda}^6\text{He}) = 5951.82 \pm 0.54 \text{ MeV}$   
 $B_{\Lambda\Lambda} = 7.25 \pm 0.19_{-0.11}^{+0.18} \text{ MeV}$   
 $\Delta B_{\Lambda\Lambda} = 1.01 \pm 0.20_{-0.11}^{+0.18} \text{ MeV}$   
(assumed  $B_{\Xi^-} = 0.13 \text{ MeV}$ )  
 $m(H) \geq 2223.7 \text{ MeV}/c^2$   
(90% C.L.)

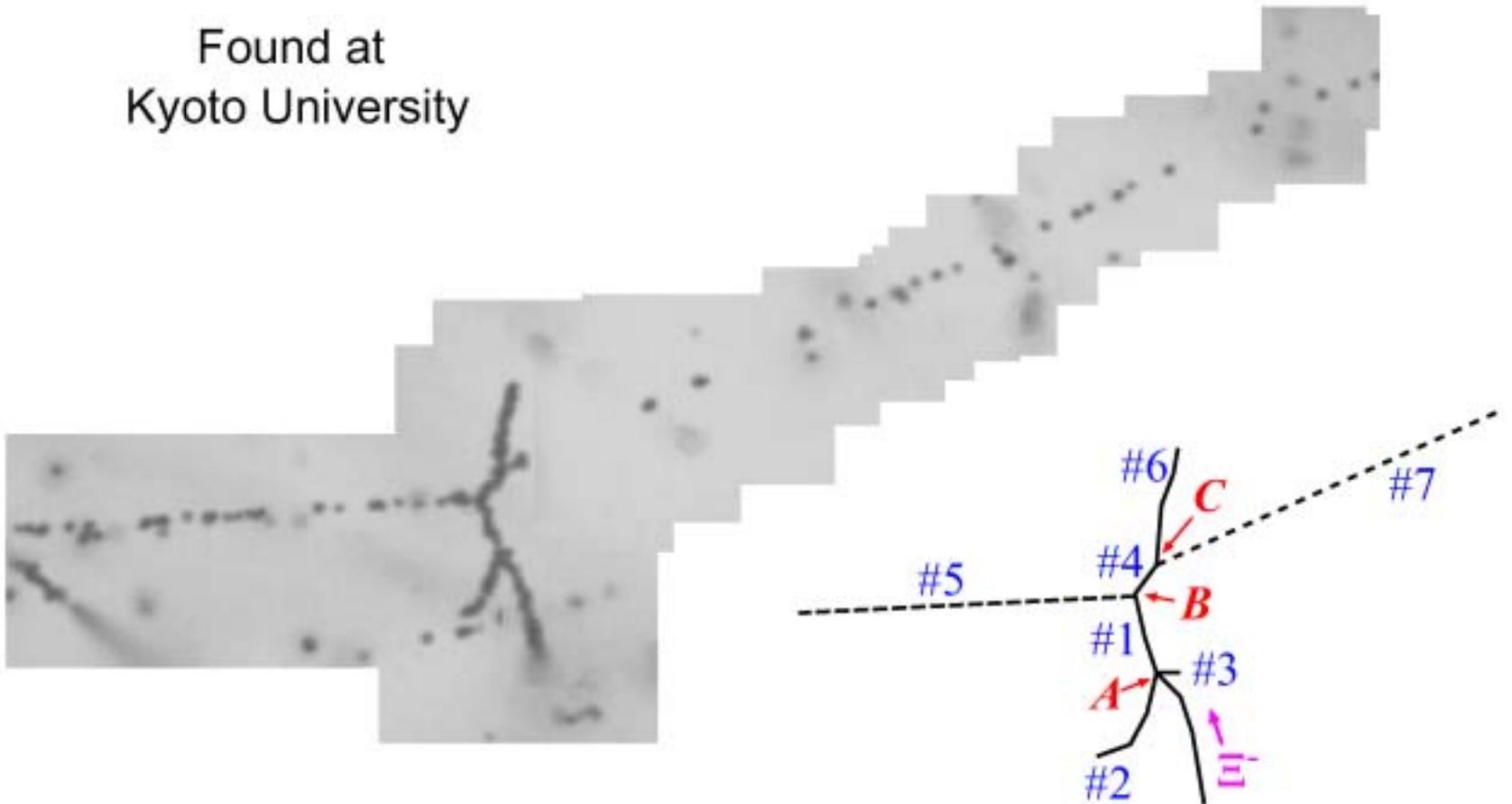


Range of DHN = 8.1 μm

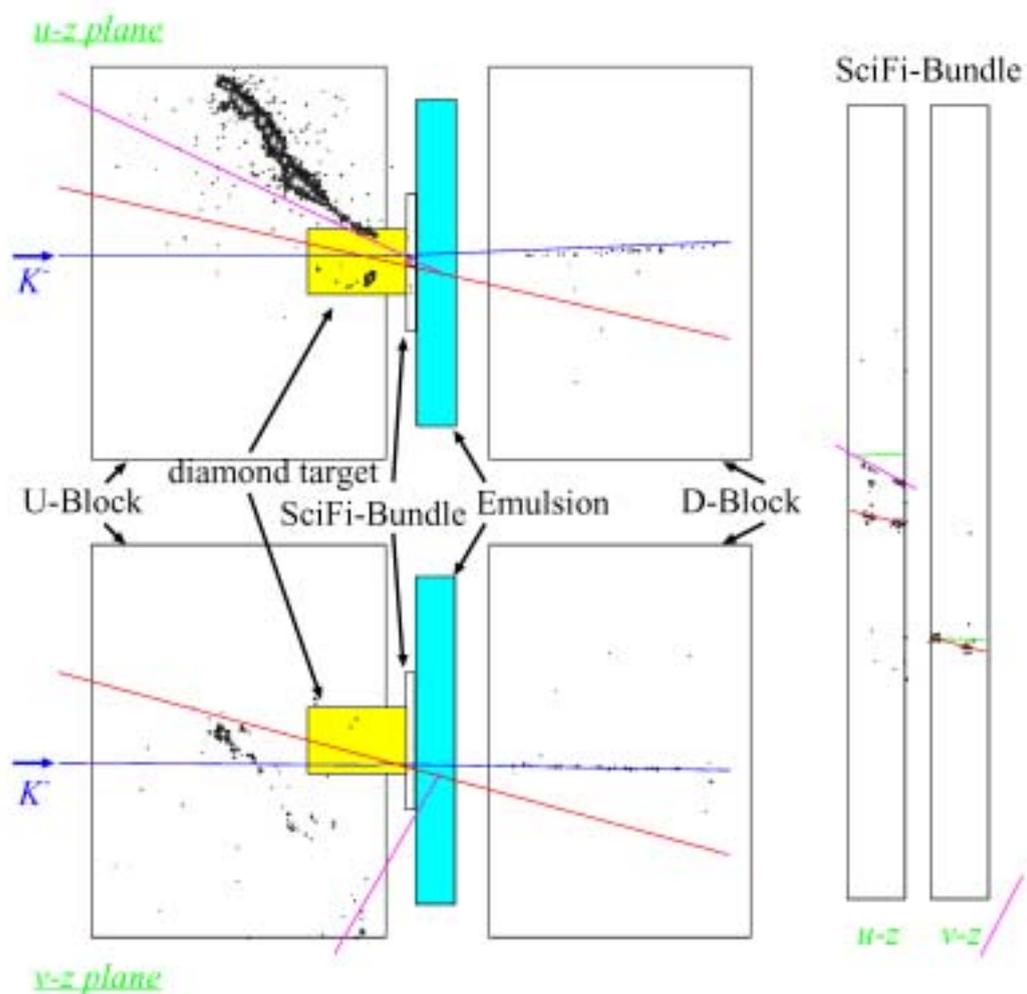
Range of SHN = 9.1 μm

# *New Double-Hypernucleus Event*

Found at  
Kyoto University

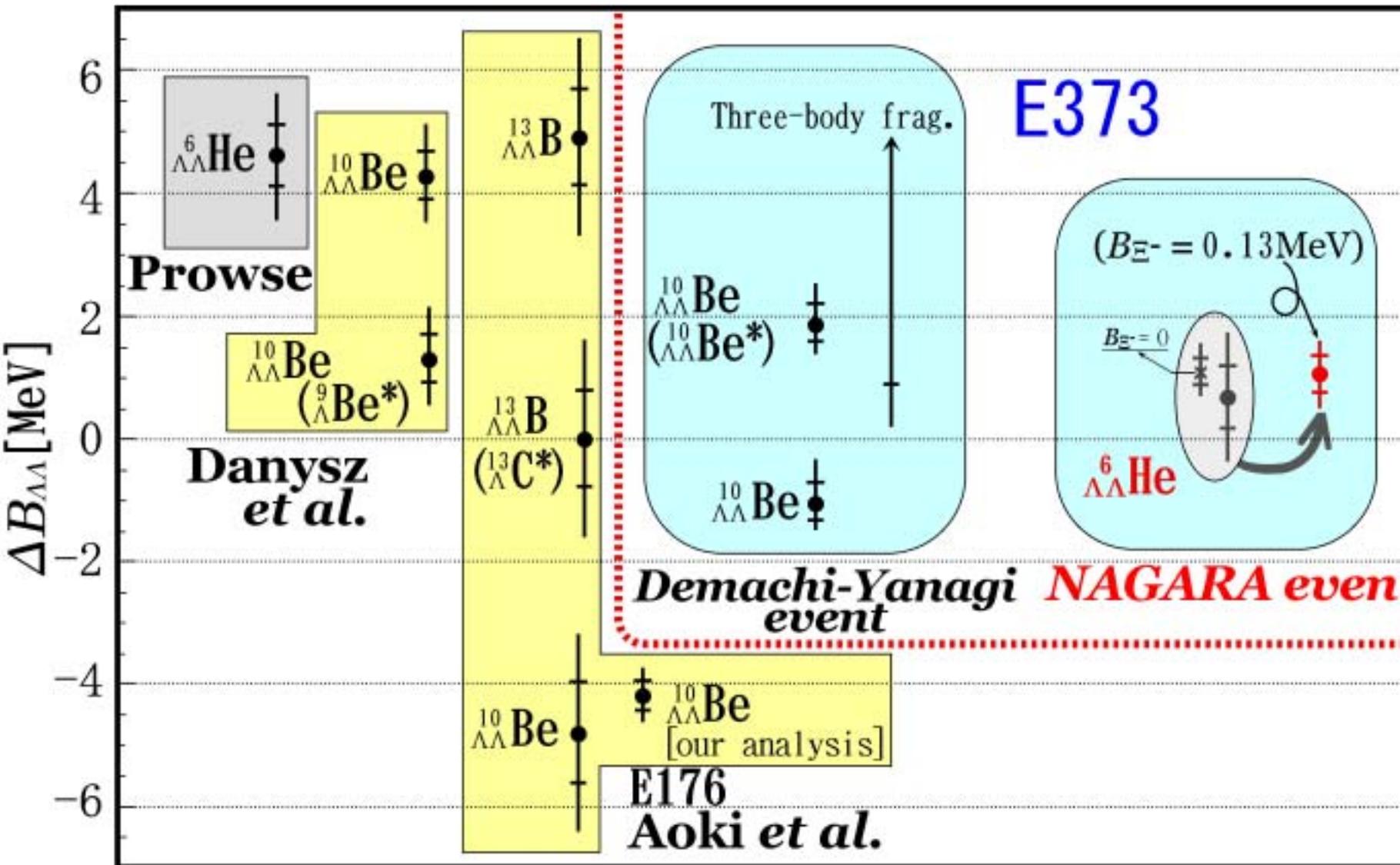


## Image of the SciFi detectors



- $K^-, K^+$  tracks measured by the spectrometer system
- $\Xi^-$  track measured by the SciFi-Bundle detector
- extrapolated line using the position and angle informations of track#7 in the emulsion stack

# Summary of $\Delta B_{\Lambda\Lambda}$



# BNL-AGS E964

## International collaboration

### AGS-E964(BNL)

Systematic Study  
of  
Double Strangeness System  
by  
an Emulsion-Counter Hybrid Method

#### AGS-E964 collaborators (now)

R. E. Chrien, H. Hotchi, M. May, P. Pile, A. Rusek (BNL, USA),  
H. Guo, Z. Liu, S. Lu, J. Zhou (CIAE, China),

G. B. Franklin (CMU, USA), K. Nakazawa, M. Mitsuhashi (Gifu, JPN),  
J. S. Song, C. S. Yoon (GNU, Korea),

Ed. Hungerford, K. J. Lan, Y. Cui, Song (Houston, USA),

H. Funahashi, K. Imai, M. Nakamura, N. Saito, M. Yosoi (Kyoto, JPN),

B. Bassalleck (New MX, USA), K. Yamamoto, T. Yoshida (OCU, JPN),

P. K. Saha (Osaka E-C, JPN), J. K. Ahn, S. J. Kim (Pusan, Korea),

K. Tanida (Riken, JPN), S. Ogawa, H. Shibuya (Toho, JPN),

Y. Miura, K. Mizunuma, H. Tamura, M. Ukai (Tohoku, JPN),

and  
Graduate Students

E373の10倍の統計を目指す

Preparation

2003~2004

Data taking

2005~2006

Analysis

2006~2007



- ◆ 100個以上の $S=-2$ 事象  
10個以上の確定
- ◆  $S=-2$ 核崩壊様式の測定
- ◆ 三原子X線の初の測定
- 
- 
-

# BNL-AGS E964

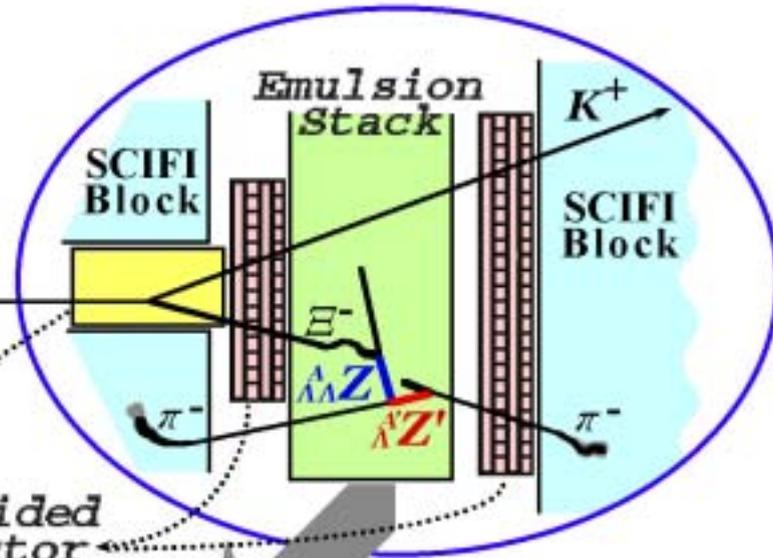
AGS-E964 (BNL)

## 実験の原理

Apparatus  
around  
the Target

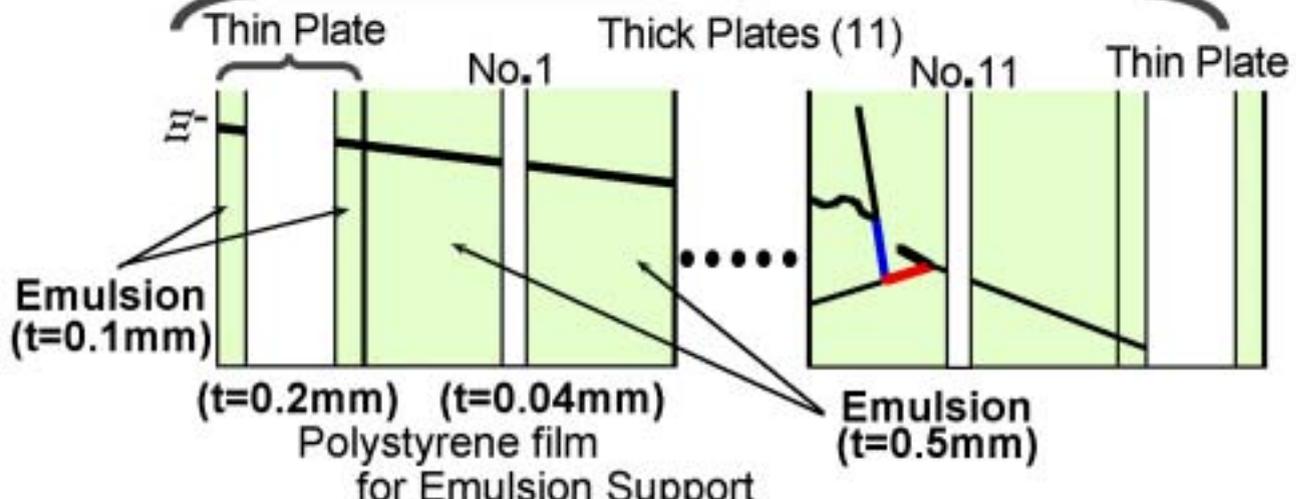
1.7 GeV/c

$K^-$   
Diamond  
( $^{12}\text{C}$ ) Target

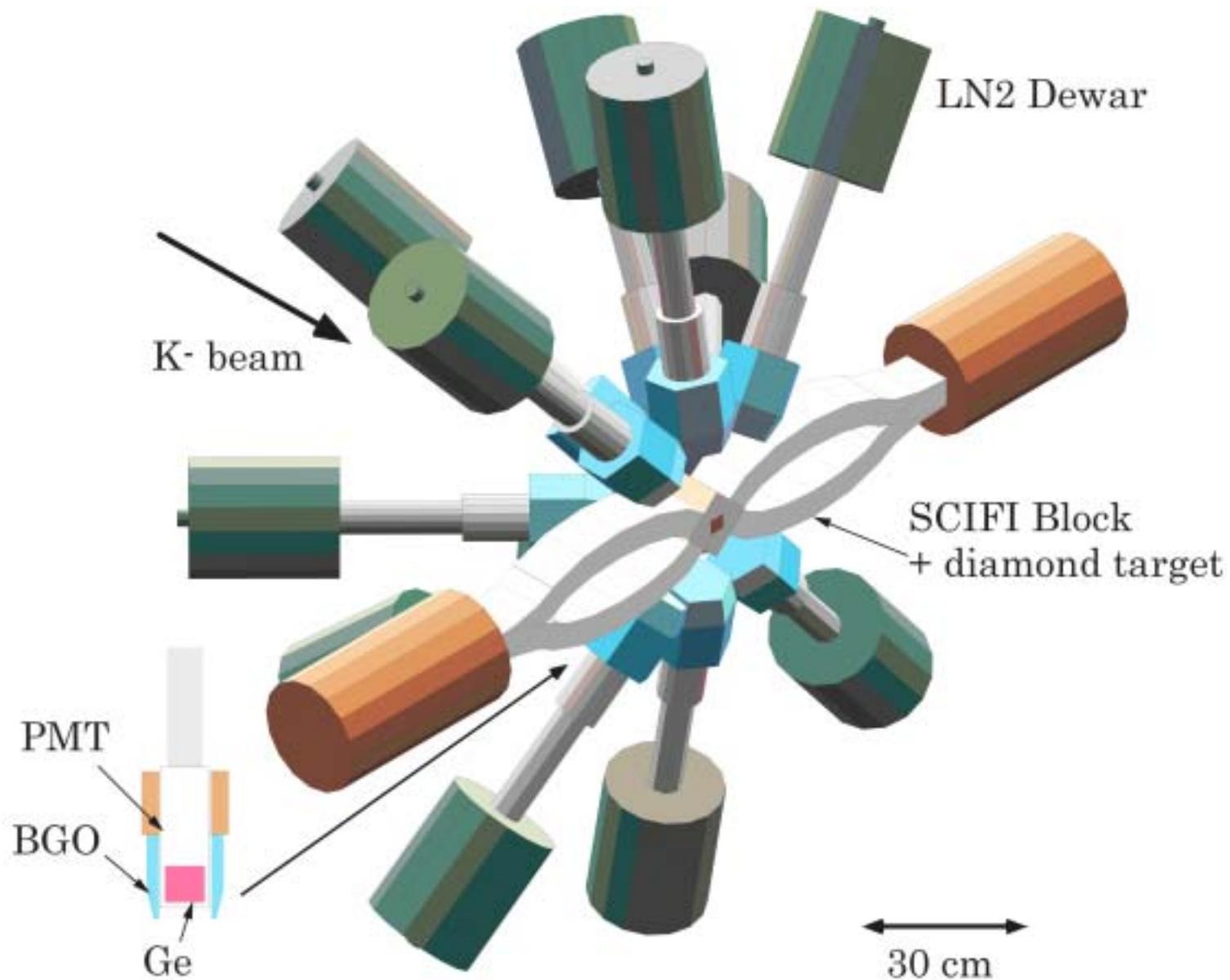


Double-Sided  
Si Detector  
(DSSD)

## Emulsion Stack

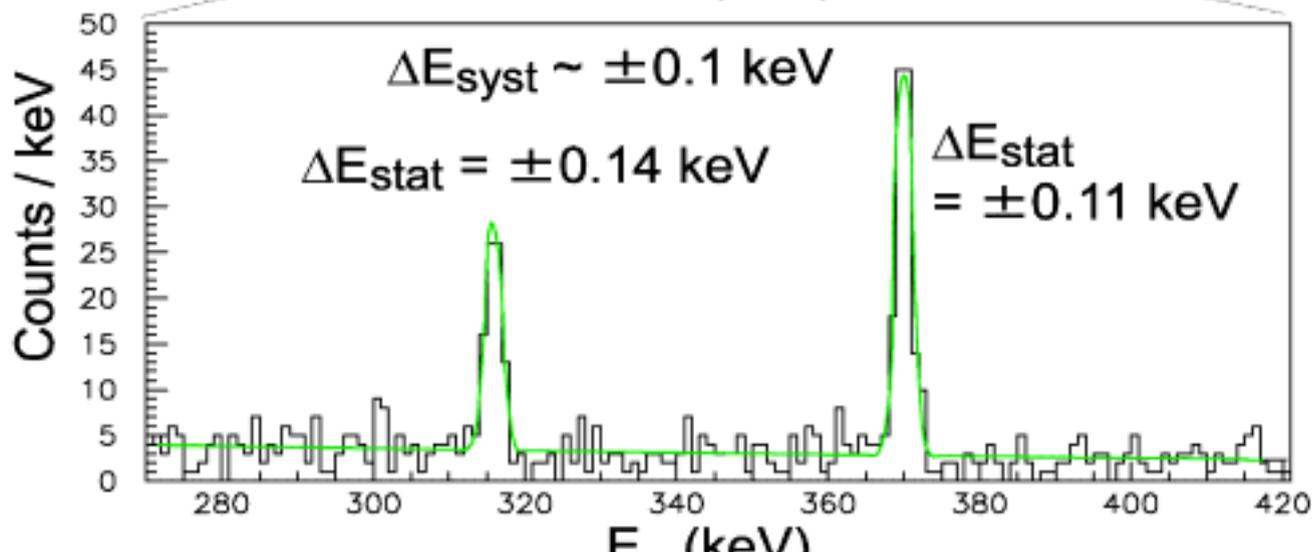
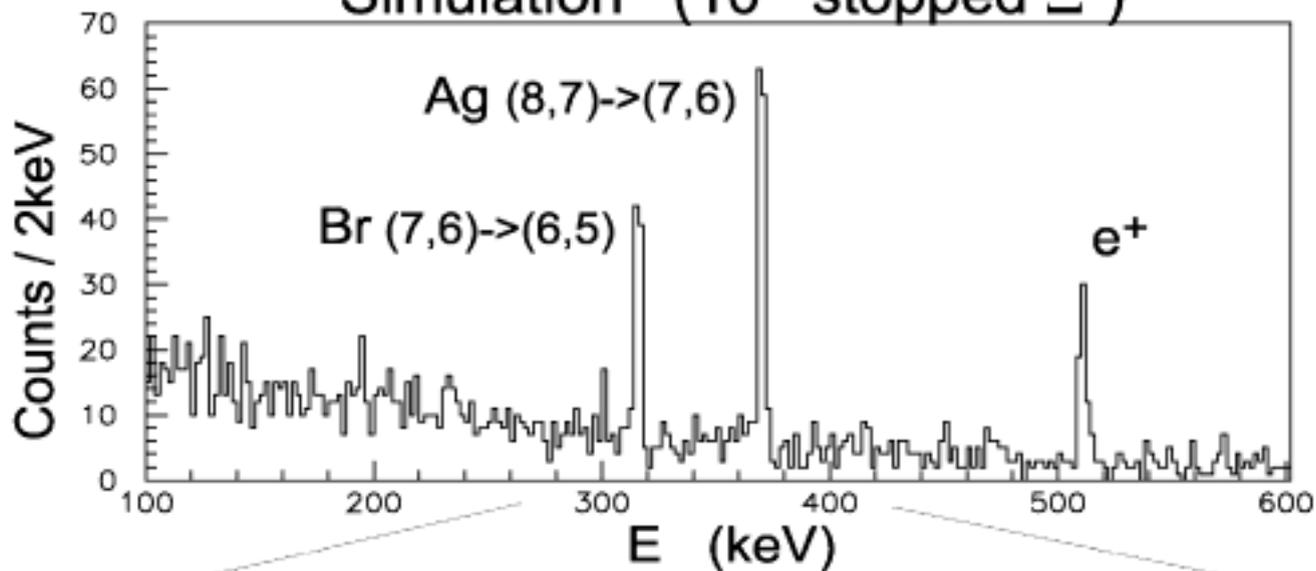


# BNL-AGS E964



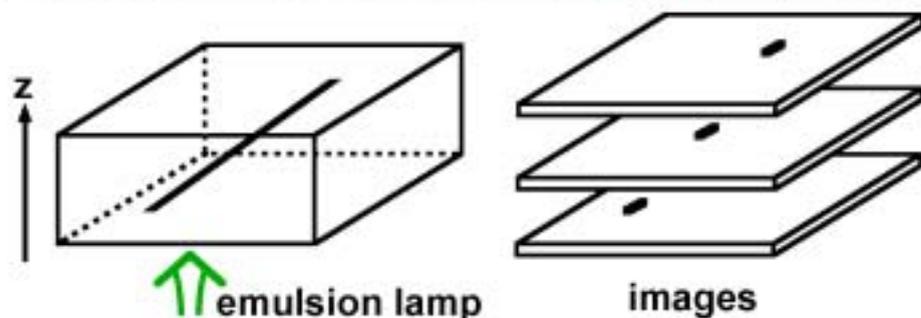
# Ξ原子のX線

Simulation ( $10^4$  stopped  $\Xi^-$ )



# Track Finding Algorithm

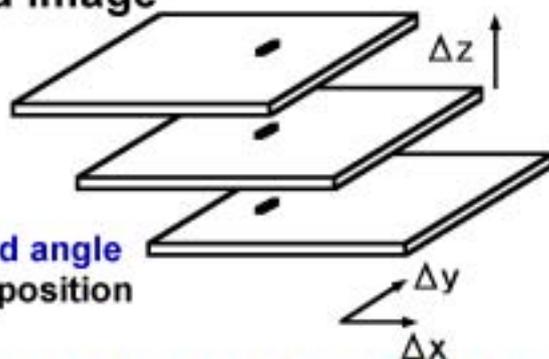
1) Take pictures at different  $z$ (focusing)position.



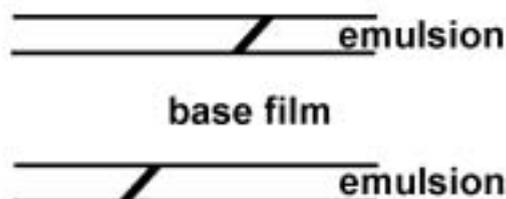
2) Make overlapped image  
shift each image  
by  $(-\Delta x, -\Delta y)$

$$\Delta x = dx/dz \times \Delta z$$
$$\Delta y = dy/dz \times \Delta z$$

$dx/dz, dy/dz$  : predicted angle  
 $\Delta z$  : step size of  $z$ -position



3) Search for the peak on both sides of the base.  
[calculate  $x, y, dx/dz, dy/dz$ ]



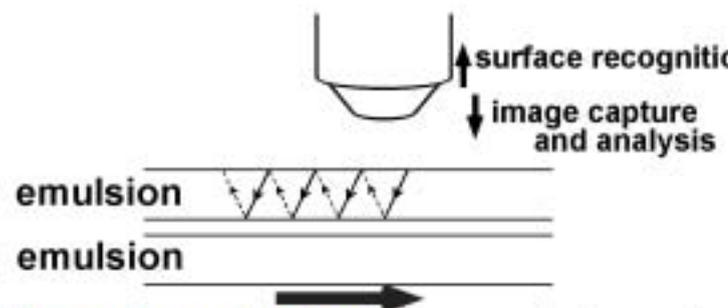
# Scanning Speed

○ KEK-E373

- stage drive : step-by-step
  - image capture : 30Hz
- ⇒ 1.5~2.0 sec / one view

◎ AGS-E964(BNL)

- stage drive : Non-Stop
  - image capture : 100Hz
- ⇒ ~0.2 sec / one view



Non-stop driving : speed~1mm/sec

~ 10 times faster

# 10<sup>3</sup> S=-2 核事象の検出は J-PARCで可能か

- Ξ<sup>-</sup> production

E964のさらに10倍の統計を目指す



Quasi-free (K<sup>-</sup>, K<sup>+</sup>) reaction



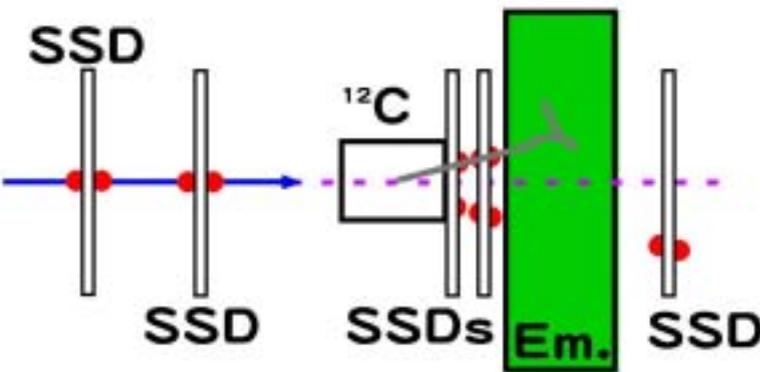
Ξ<sup>-</sup>生成断面積は約2.5倍



K<sup>+</sup>を要求しなければ約2倍



解析対象のΞ<sup>-</sup>数は、K<sup>-</sup> + p → Ξ<sup>-</sup> + K<sup>+</sup>のみに限らなければ約5倍になる



1) non trigger

=> (\*\*) 400ℓ Emulsion => (\*\*\*) ~10<sup>3</sup> s=-2 nuclei  
~2 years by 3 microscope stages

∴ 2.5 (cross section) × 2 (K<sup>+</sup> eff.) × 2 (Emulsion)

2) nul charge or ?????

3) Interaction (no-beam) Trigger (~10<sup>4</sup>/spill[?])

# エマルジョンコスト半減

## エマルジョン製造方法の変更

[従来]



[今後]



同じ価格でエマルジョン量2倍  
(交渉中)

# Beam Time の見積もり

- Repetition Time: 3.4 s (spill of 0.7 s)
- K-/beam > 0.9
- Total number of K- s to be exposed:  $2.98 \times 10^{11}$  K- s  
size                      stacks                      density

$$(35\text{cm} \times 35\text{cm}) \times 270 \times (9 \times 10^5 \text{ beams/cm}^2) = 2.98 \times 10^{11} \text{ K- s}$$

In case of  $1 \times 10^6$  K-/spill with K-/beam > 0.9

$$\text{Beam Time} = 2.98 \times 10^{11} / (1 \times 10^6) \times 3.4 = 1.0 \times 10^7 \text{s} = 120 \text{ days}$$

In case of  $2 \times 10^6$  K-/spill with K-/beam > 0.9

$$\text{Beam Time} = 2.98 \times 10^{11} / (2 \times 10^6) \times 3.4 = 0.5 \times 10^7 \text{s} = 60 \text{ days}$$

# S=-2核事象の数(期待値)

Experiment	E176	E373	E964	J-PARC
K <sup>-</sup> /beam	1/4	1/5	0.9	0.9
# of K <sup>-</sup> beams (per spill)	$1 \times 10^9$ $3 \times 10^3$	$1 \times 10^{10}$ $1 \sim 2 \times 10^4$	$1 \times 10^{11}$ $2 \times 10^5$	$3 \times 10^{11}$ $1 \sim 2 \times 10^6$
Beam time (hr.)	640	1800	1400	1500 ~ 3000
Trigger	(K <sup>-</sup> , K <sup>+</sup> )	(K <sup>-</sup> , K <sup>+</sup> )	(K <sup>-</sup> , K <sup>+</sup> )	(K <sup>-</sup> , )
# of $\Xi^-$ stops	80	$10^3$	$10^4$	$10^5$
Em. Volume (ℓ)	30	70	210	400
# of S=-2 nuclei	1	10	100	1000

# 自動飛跡読み取り装置

名古屋大グループ (courtesy of Dr. Nakano)

1973年 断層映像を重ね合わせる  
手法の考案(名大:丹羽氏)

1980年 半導体メモリーによる  
Track Selectorの実現  
(名大:鳥居氏、青木氏)

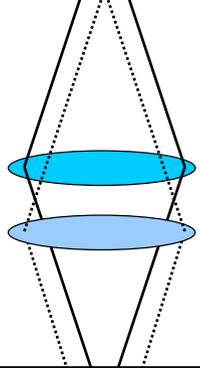
顕微鏡  
Z軸

CCD  
カメラ

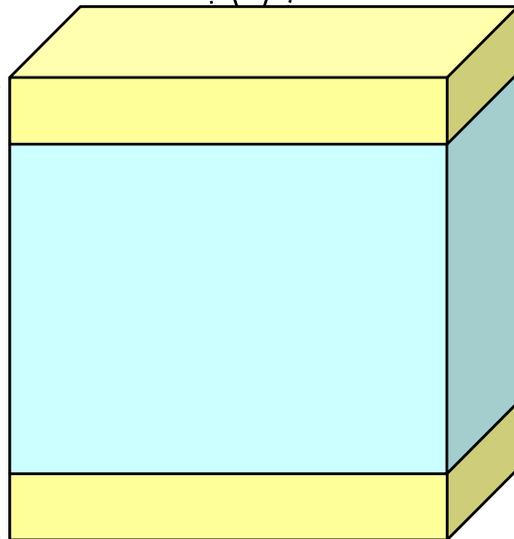
画面解像度  
512x512  
pixels

CCD  
カメラ

視野の大きさ  
 $150 \times 120 \mu\text{m}^2$   
対物レンズ x50  
~3 $\mu\text{m}$  被写界深度



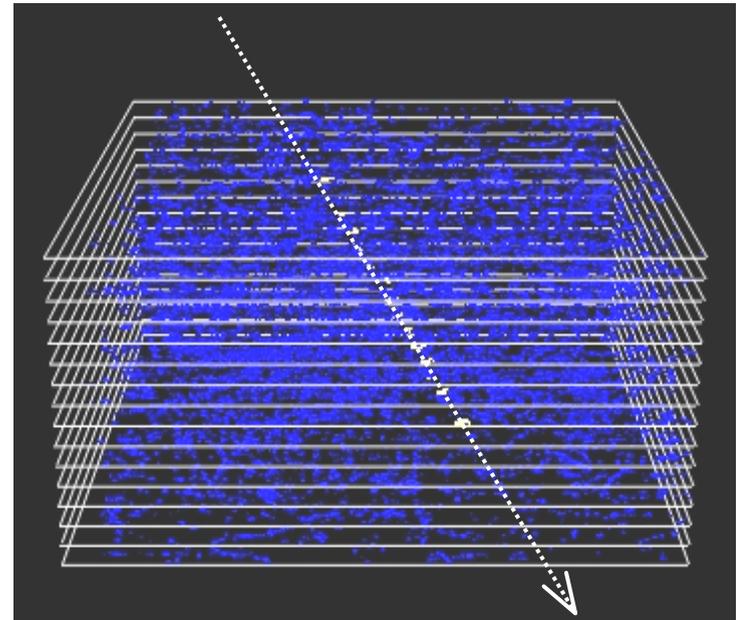
3次元断層映像  
1視野あたり16枚

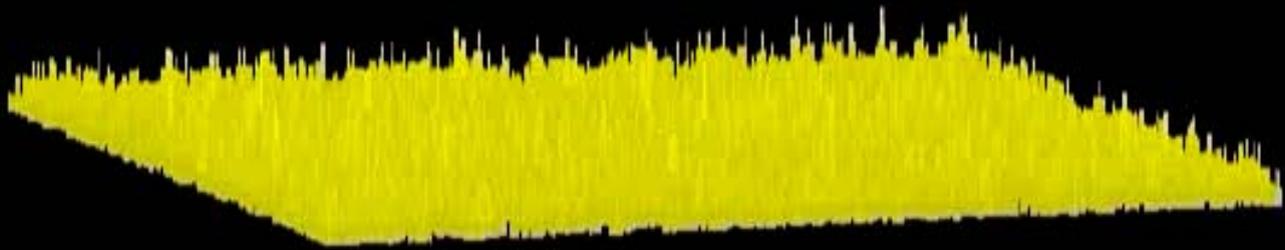
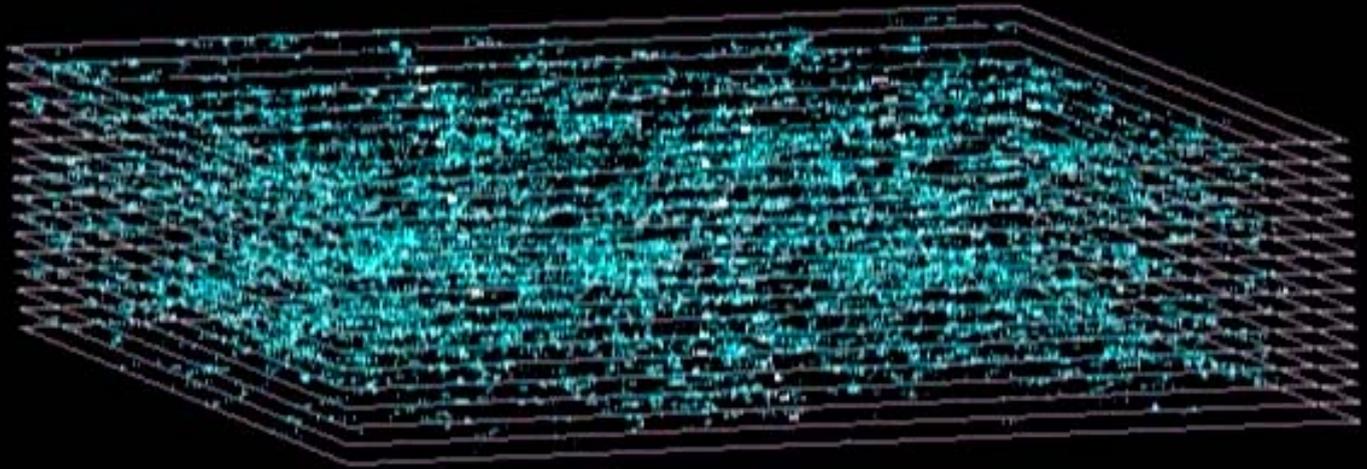


乳剤層(表)  
50~550  $\mu\text{m}$

フィルムベース  
70~800 $\mu\text{m}$

乳剤層(裏)  
50~550  $\mu\text{m}$





重ねあわせによる飛跡認識

# Track Selectorの高速化

初代TS→TS→NTS→UTS

名古屋大グループ (courtesy of Dr. Nakano)

- 断層映像撮影

撮像管 ⇒ CCD ⇒ Progressive CCD

(EIA RS-170)

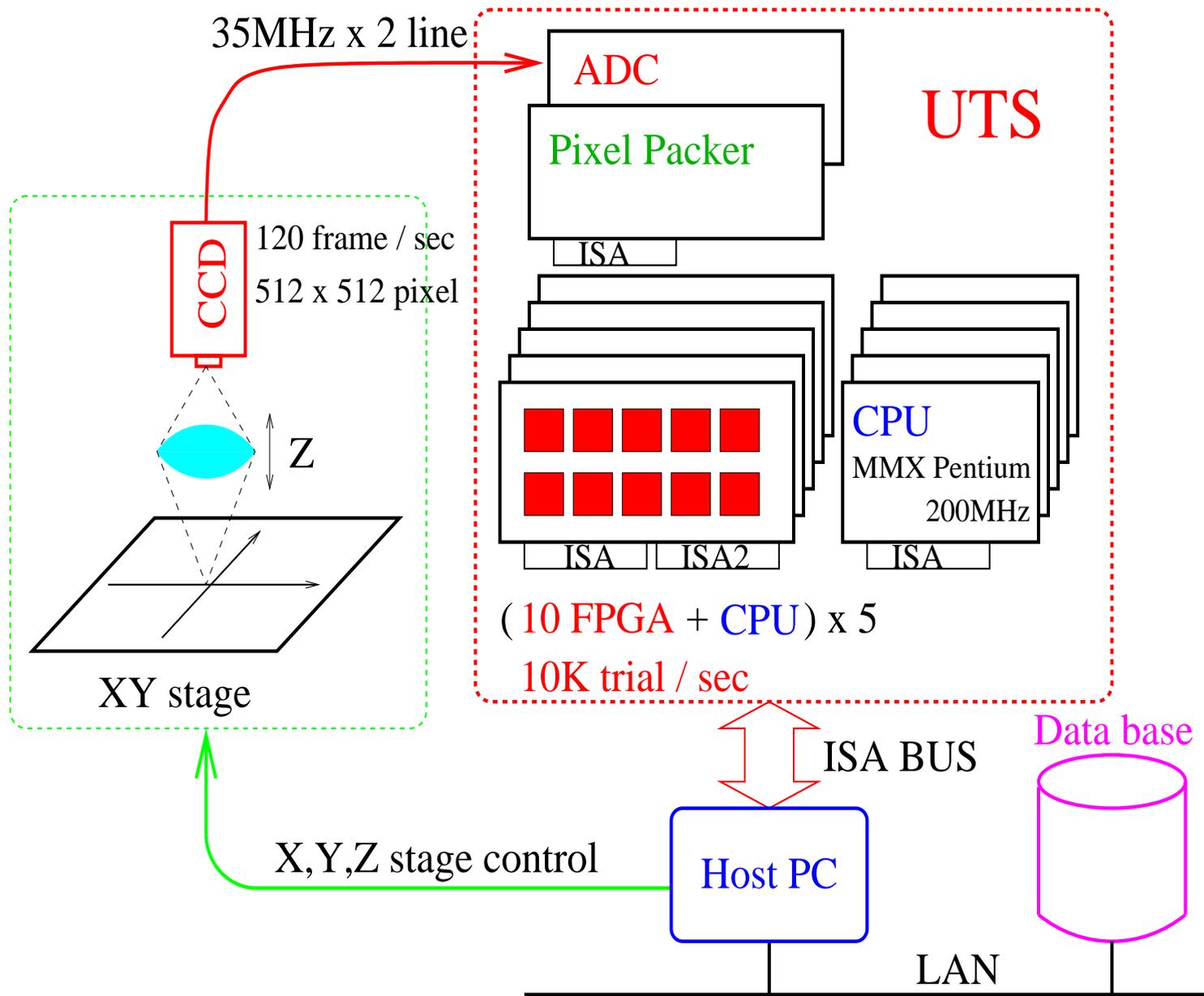
(120fps)

- ステージ制御

DCサーボモーター ⇒ マイクロステップモーター

- 重ね合わせ処理の高速化

TTL (10MHz) ⇒ PLD (20MHz) ⇒ FPGA (120MHz)





# UTS

1cm<sup>2</sup>/h@tanθ<0.4

10k trials/sec

NIKON stage + NTS: 2台

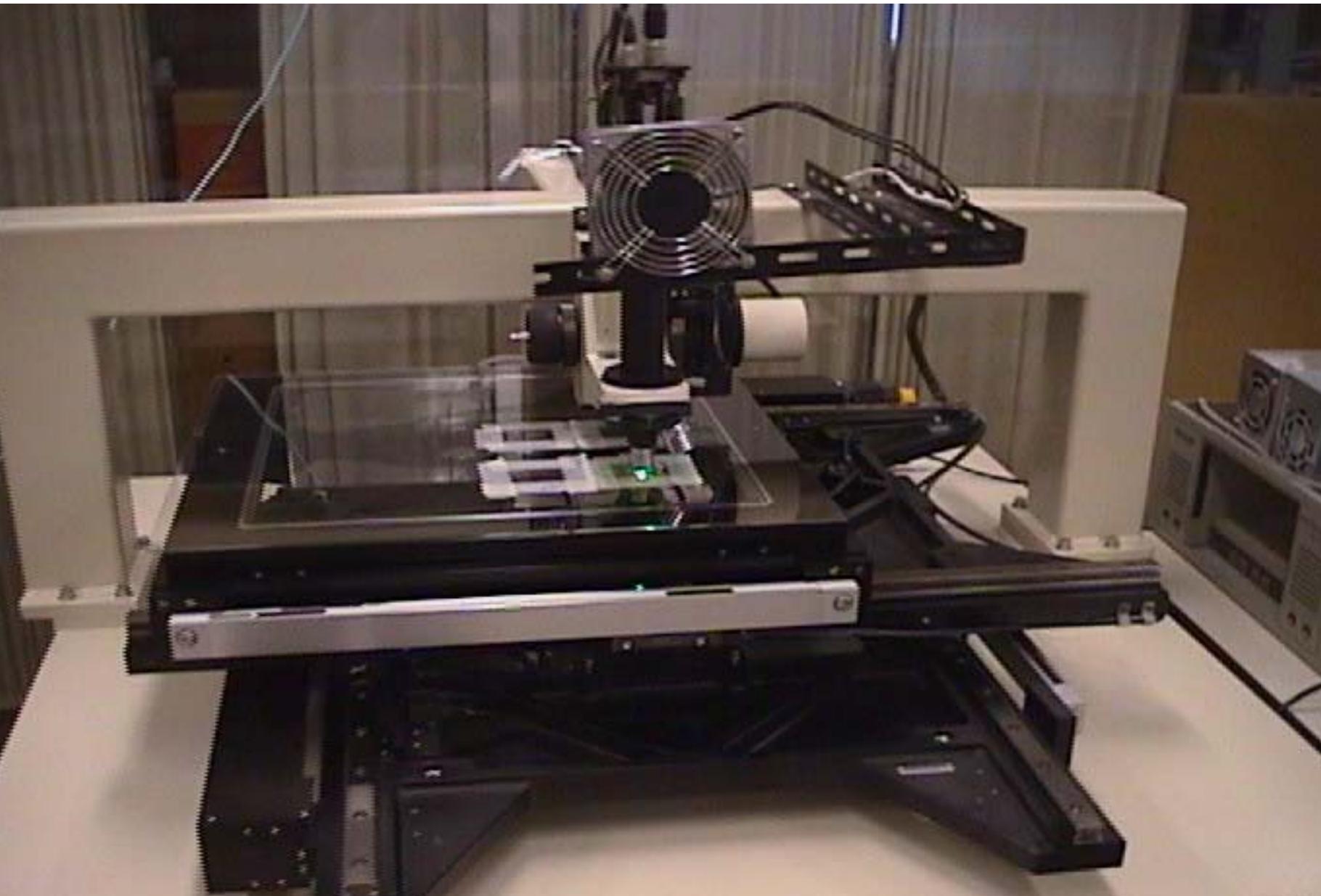
NIKON stage + UTS: 1台

東邦大学理学部



UTS Processors

# Ultra Track Selector (Toho Univ.)





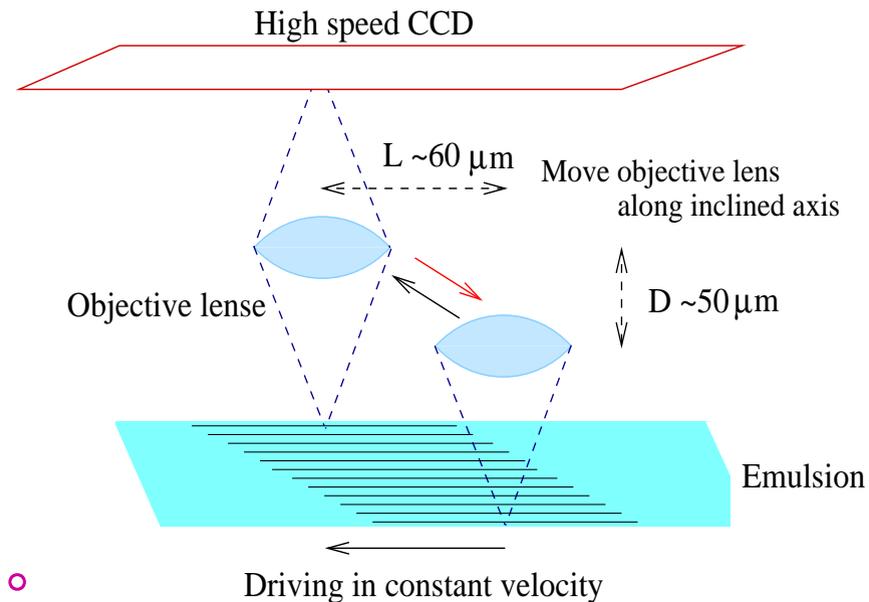
UTSによるスキャン(3視野/秒)

# 断層映像取り込み時間の高速化 (名古屋大)

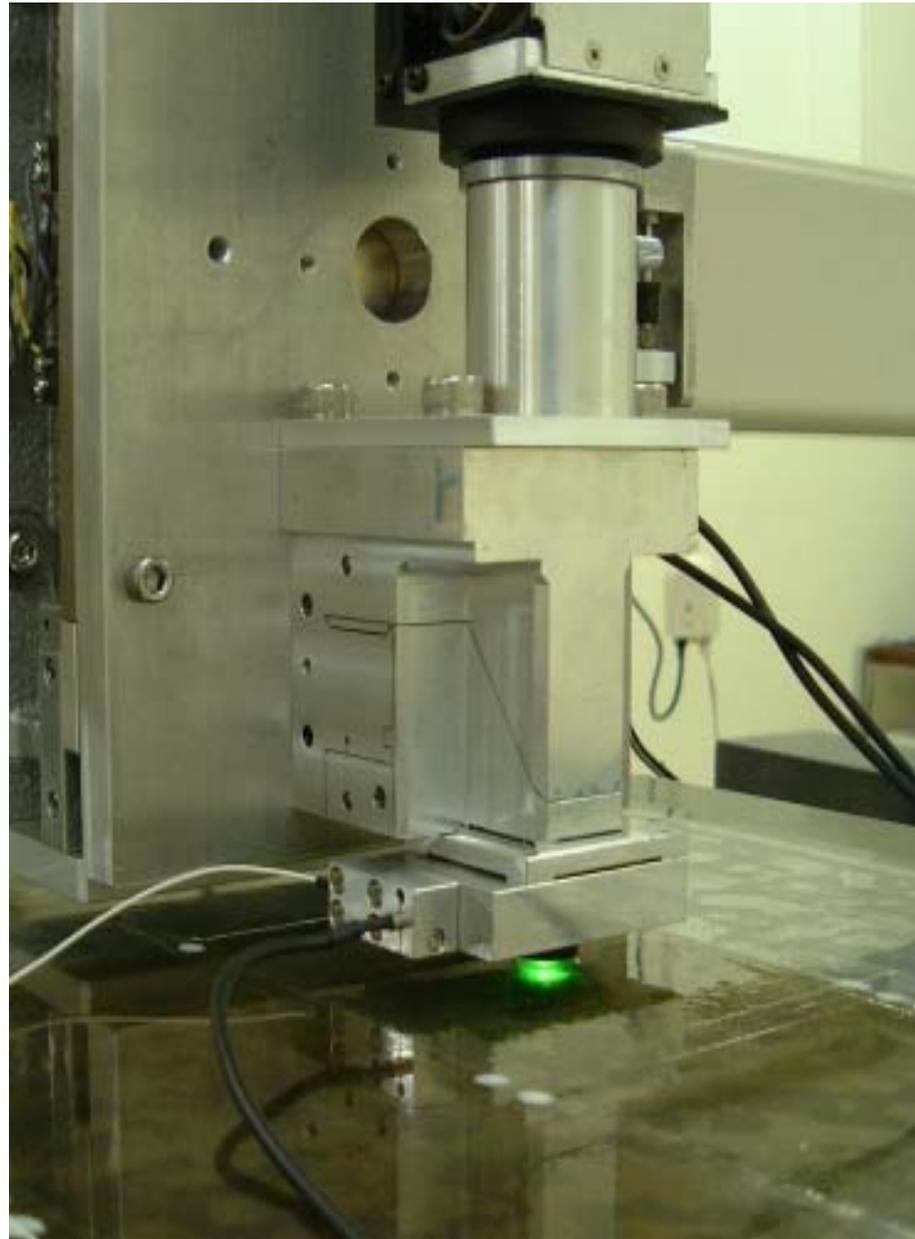
30cm<sup>2</sup>/h 以上の読み出し速度を目標

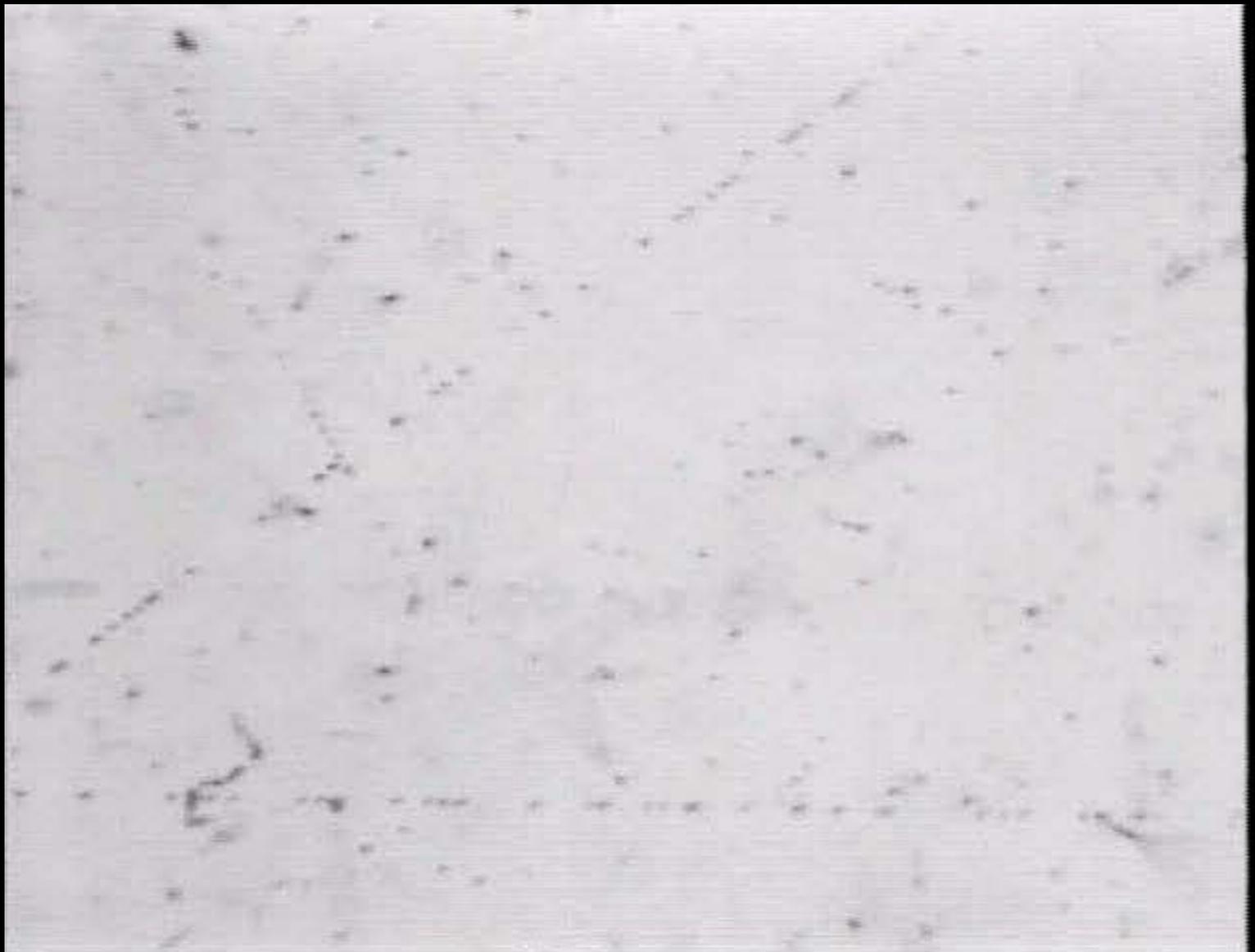
(courtesy of Dr. Nakano)

- より高速なカメラ
  - 毎秒3000フレームが可能なカメラの採用。  
→ 最大 100視野/秒
- 流し撮りによる撮影
  - No go-stop operation によりステージの応答時間によらない。
  - レンズの駆動はピエゾ素子により  $f_{res} > 2\text{kHz}$  が可能。

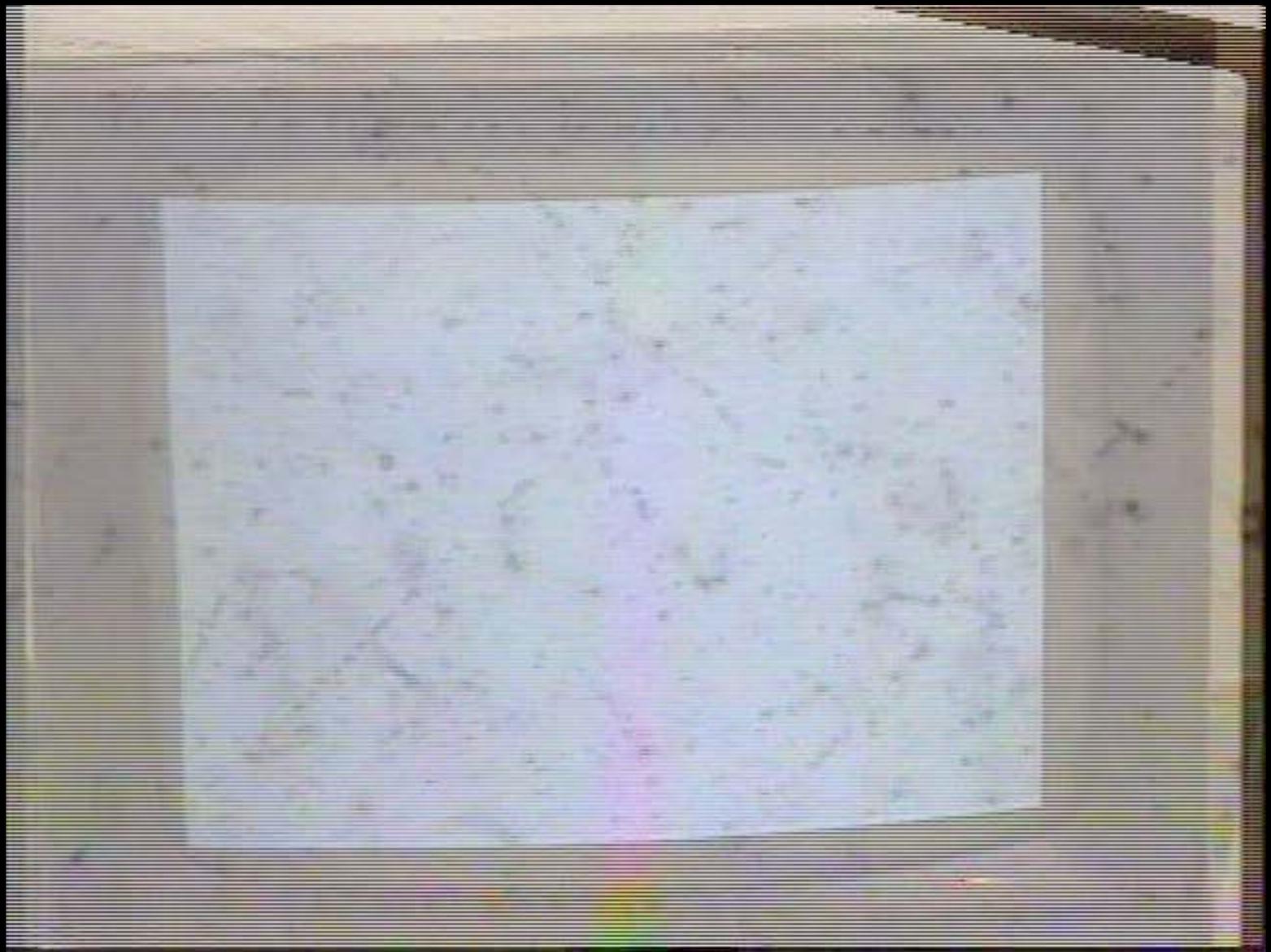


# 高速顕微鏡対物レンズ 駆動ユニット(名大理: 中野氏)





流し撮りによる断層映像の取り込み



流し撮りによる飛跡認識テスト(12視野/秒)

# まとめ

- J-PARCではハイブリッドエマルジョン法で  $10^3$ 個のS=-2核事象の検出を目指す。

- S=-2 nuclear chart を作る
- $\Lambda\Lambda$ 相互作用エネルギー  $\Delta B_{\Lambda\Lambda}$  の系統的な理解  
およびその核種依存性
- ダブル $\Lambda$ 核の崩壊様式、励起エネルギー
- 三原子からのX線

## 新型の自動飛跡読み取り装置の開発と実用化

- 三飛跡追跡の高速化
- 三吸収点の解析