

# Черенковский свет ШАЛ как инструмент изучения массового состава первичного космического излучения

Галкин В.И., Джатдоев Т.А.

Физический ф-т МГУ / НИИЯФ МГУ

06.04.2010

# Особенности ЧС ШАЛ

## Преимущества ЧС ШАЛ:

- ◆ Малый черенковский угол ( $< 1,5$  град), т.е. свет сохраняет направление излучающей его частицы, что позволяет изучать пространственно-угловые характеристики ливневых частиц.
- ◆ Число черенковских фотонов в десятки-сотни тысяч раз больше, чем число заряженных частиц ливня ( $N_{\text{cherenk}} \sim 3 \times 10^{10}$ ,  $N_{\text{charged}} \sim 3 \times 10^5$  для вертикального протонного ливня с энергией  $10^{15}$  эВ, уровень наблюдения 1 км, 300-660 нм), что позволяет исследовать дифференциальные распределения ЧС.
- ◆ Пролет до рассеяния оптического фотона в атмосфере может достигать многих километров, т.е. черенковский свет несет информацию обо всем ливне, в отличие от заряженных частиц.

# Особенности ЧС ШАЛ

## Недостатки ЧС ШАЛ:

- ◆ Черенковские вспышки от ШАЛ можно регистрировать только безлунными безоблачными ночами, время наблюдения обычно составляет  $\sim 10\%$  календарного времени.
- ◆ Направленность ЧС ШАЛ не позволяет видеть ливень сбоку, т.е. на больших расстояниях  $R$  от оси до детектора.

### Ultra high energy gamma-rays

176

#### Emission of Cerenkov Radiation by Electrons in Earth's Atmosphere

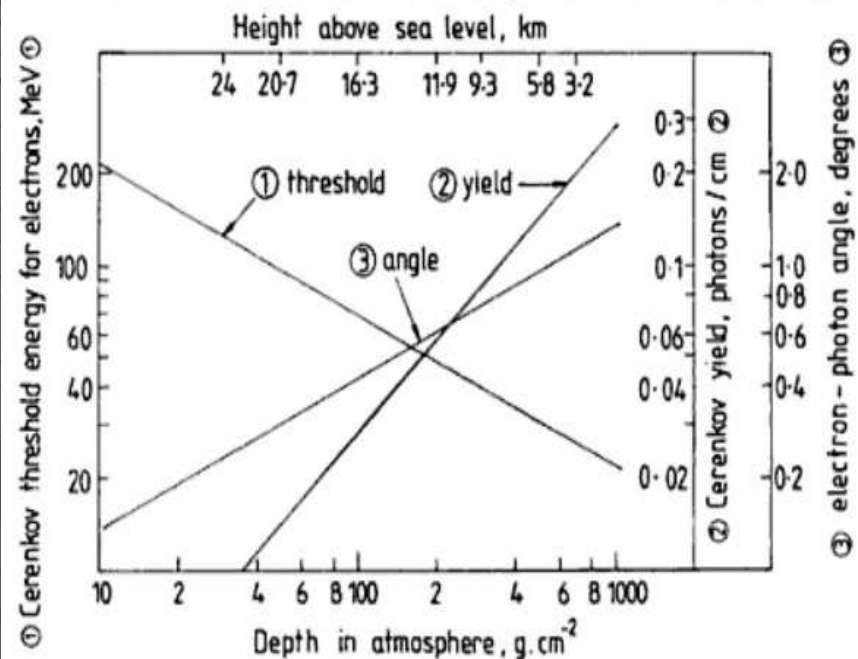


Figure 5.1. Variation with depth in the terrestrial atmosphere of: (1) threshold energy for electrons to emit Cerenkov radiation; (2) intensity of emission; and (3) angle of emission of Cerenkov radiation. For electromagnetic cascades the depth region  $100-400 g \cdot cm^{-2}$  in the atmosphere is the most relevant.



# Немного истории ЧС ШАЛ

- ◆ первая идея о черенковском фоне в атмосфере --- Блэкетт  
*Blackett, P. M. S., Phys. Soc. London Gassiot Committee Report, 34 (1948)*
- ◆ первая регистрация ШАЛ --- Гэлбрейт и Джелли  
*Galbraith W., Jelley J. V., 1953, Nature, 171, 349*
- ◆ первое измерение поперечного распределения --- Чудаков и Нестерова  
*Нестерова Н.М., Чудаков А.Е., О наблюдении черенковского излучения, сопровождающего широкие атмосферные ливни космических лучей, ЖЭТФ, 28, 384 (1955)*
- ◆ регистрация формы импульса --- Фомин и Христиансен, итальянцы  
*Фомин Ю.А., Христиансен Г.Б. О форме импульса черенковского излучения широкого атмосферного ливня, ЯФ, 1971, т. 14, | 3, с. 642-646.*

*E Bohm et al 1977 J. Phys. A: Math. Gen. **10** 441*

# Начало черенковской $\gamma$ -астрономии

Современная черенковская  $\gamma$ -астрономия очень высоких энергий (50 ГэВ – 1 ТэВ) основывается на **форме углового распределения ЧС**.

Характерная постановка задачи: выделить сигнал от точечного  $\gamma$ -источника с заданными угловыми координатами на преобладающем (в  $10^3$ - $10^4$  раз больше) фоне событий от космических ядер.

В 60х годах прошлого века А.Е. Чудаков (*Chudakov, A.E., Dadykin, V.L., Zatsepin, V.I., and Nesterova, N.M., A Search for Photons with Energy  $10^{13}$  eV from Local Sources of Cosmic Radiation, 1964. Proc. of P. N. Lebedev Phys. Inst., 26, 118*) искал  $\gamma$ -кванты с энергией  $\sim 1$  ТэВ от Крабовидной туманности с помощью простого черенковского телескопа, но не нашел его.

**Сигнал был выделен** в 80х в обсерватории Whipple путем **детального анализа углового распределения ЧС ШАЛ** (*Weekes, T. C., et al. 1989, ApJ, 342, 379*) **на основании реалистичных расчетов**.



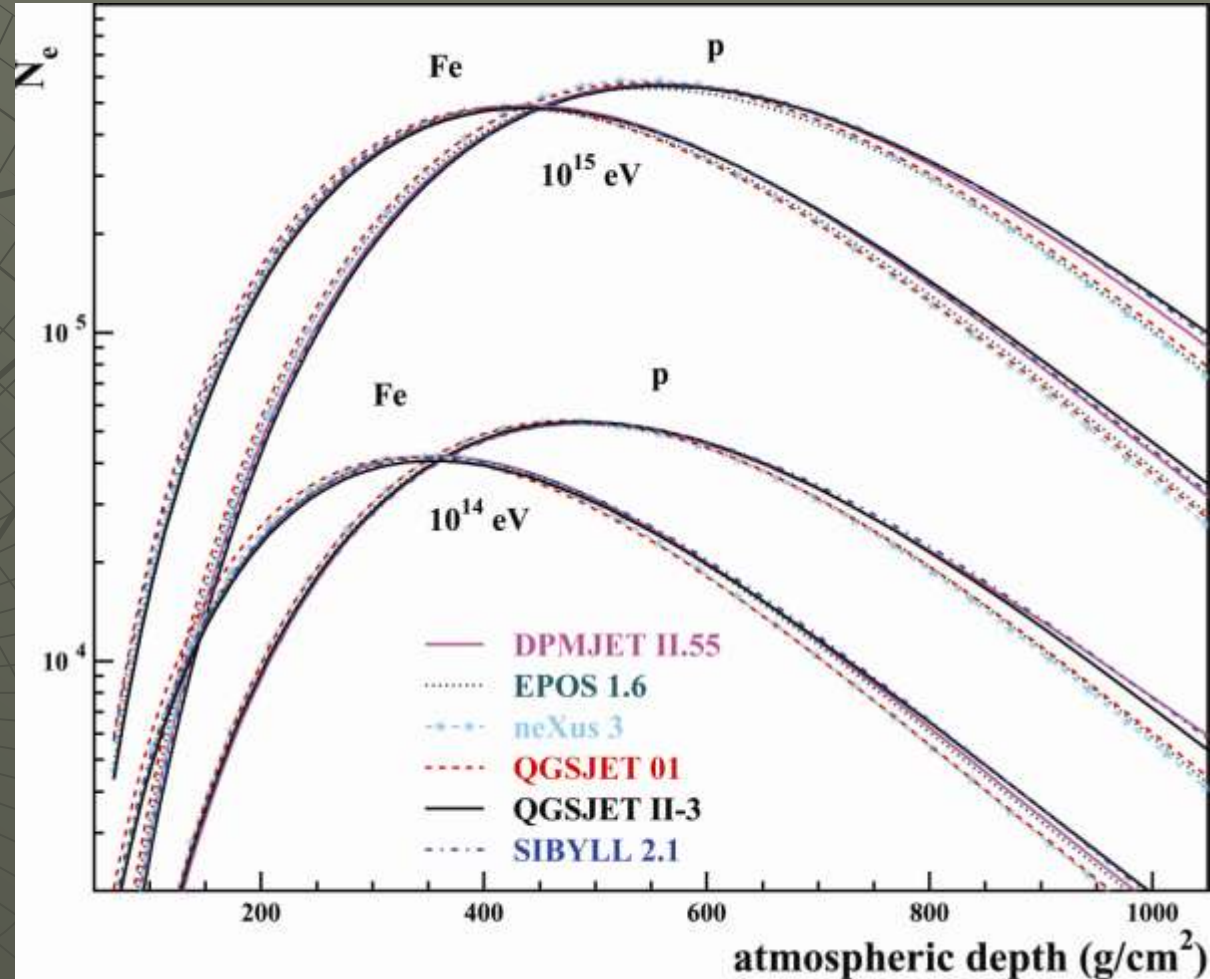
# Возможности изучения продольного развития ШАЛ по ЧС

## Продольное развитие ШАЛ

(каскадная кривая) определяется

- моделью ядерного взаимодействия
- первичной энергией
- массой первичной частицы

Чаще всего продольное развитие характеризуют положением максимума ливня  $X_{\max}$ .



# Черенковские меры продольного развития ШАЛ

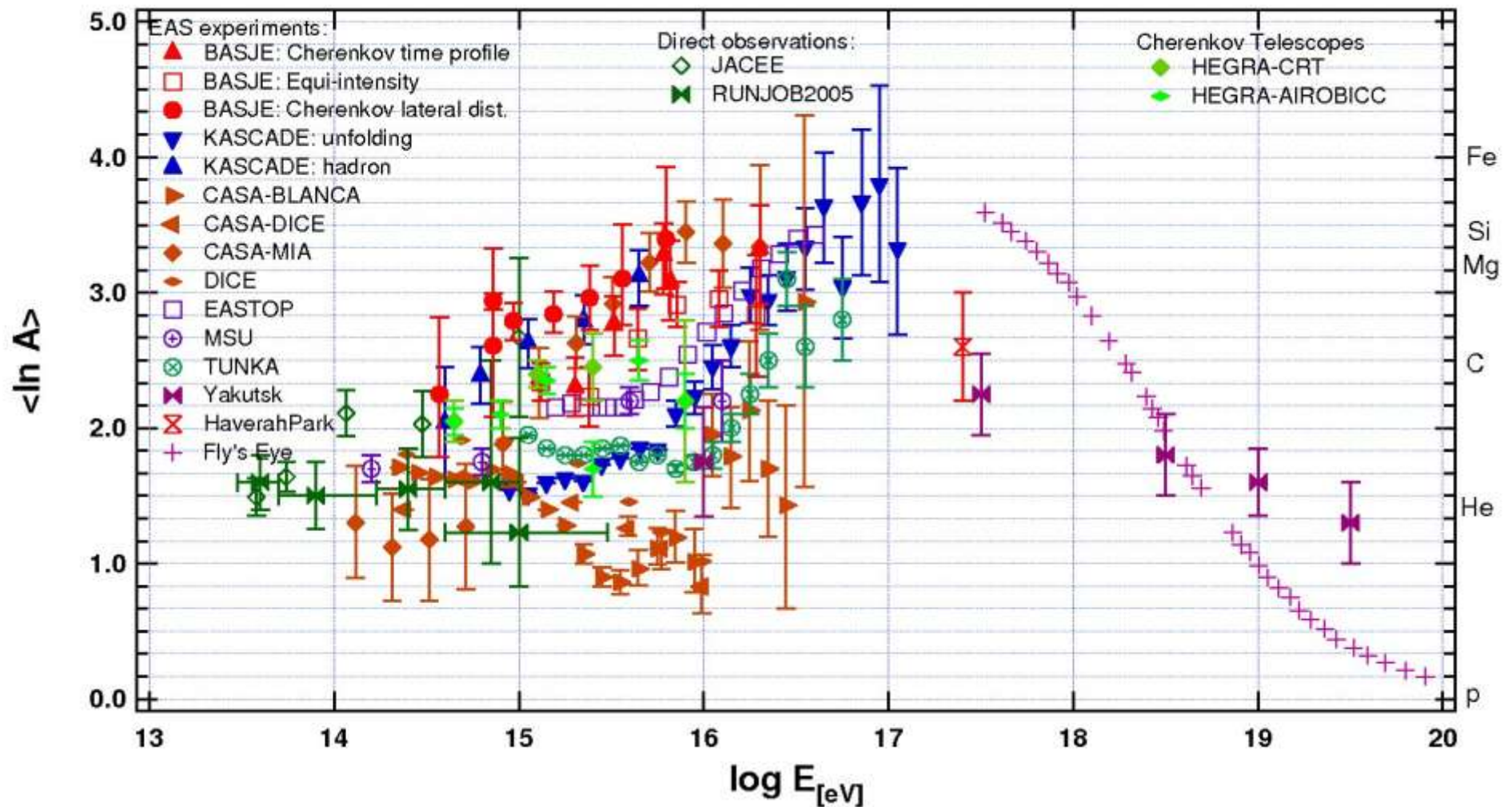
- ◆ Характеристики формы поперечного распределения ЧС ШАЛ  $dQ/dR$ , в частности, крутизна.  $R$  --- расстояние от точки падения оси ливня до детектора.
- ◆ Характеристики формы временного распределения ЧС ШАЛ  $dQ/dT$ , в частности, полуширина.  $T$  --- временная задержка чер.фотонов.
- ◆ Характеристики формы углового распределения ЧС ШАЛ  $d^2Q/d\theta_x d\theta_y$ , в частности, моменты распределения.

Обычный подход к изучению массового состава ПКЛ по ЧС ШАЛ:

одновременная оценка  $X_{\max}$  (по крутизне поперечного распределения или полуширине импульса)  
и  $E_0$  (по плотности фотонов на  $R=150-200$  м).



# Мировые данные по $\langle \ln A \rangle$



- Данные по  $A$  в области колена различаются раз в 10.
- Seriously отличаются данные, полученные одготипными методами (например, по Ne—N $\mu$ , по крутизне ФПР ЧС).



# Вероятные причины большой неопределенности в $\langle \ln A \rangle$

- Большой ( $\sim 10$  раз) разброс мировых данных по среднему логарифму массового числа (простейшая мера массового состава)  $\langle \ln A \rangle(E_0)$  при **маленьких декларируемых методических ошибках** скорее всего говорит о **переоцененности возможностей используемых методов**.
- **Дополнительную ошибку** вносит использование промежуточного параметра  $X_{\max}$ : от измеренных характеристик каскада переходят к  $X_{\max}$ , **теряя при этом часть информации о массе первичной частицы** (продольное распределение ШАЛ не исчерпывается  $X_{\max}$ ), а затем определяют эту массу по  $X_{\max}$ .

# Эффективные подходы к проблеме массового состава ПКЛ

- Анализ поперечного распределения ЧС ШАЛ (крутизна и другие характеристики формы): доказана возможность выделения известной доли чистых протонов с помощью черенковского телескопа типа СФЕРА-2, позволяющего провести детальный анализ формы поперечного распределения, и наземных установок с частой сеткой оптических детекторов.
- Анализ пространственно-углового распределения ЧС ШАЛ (традиционные и вновь введенные характеристики формы углового распределения ЧС ШАЛ на разных расстояниях от оси до детектора): показано, что можно анализировать массы первичных частиц с высоким разрешением с помощью набора угловых телескопов с диаметром поля зрения не менее 20 град и размером пикселей 0,5-1,0 град при поддержке сетки быстрых оптических детекторов (формы и амплитуды) с шагом  $\sim 30$  м.

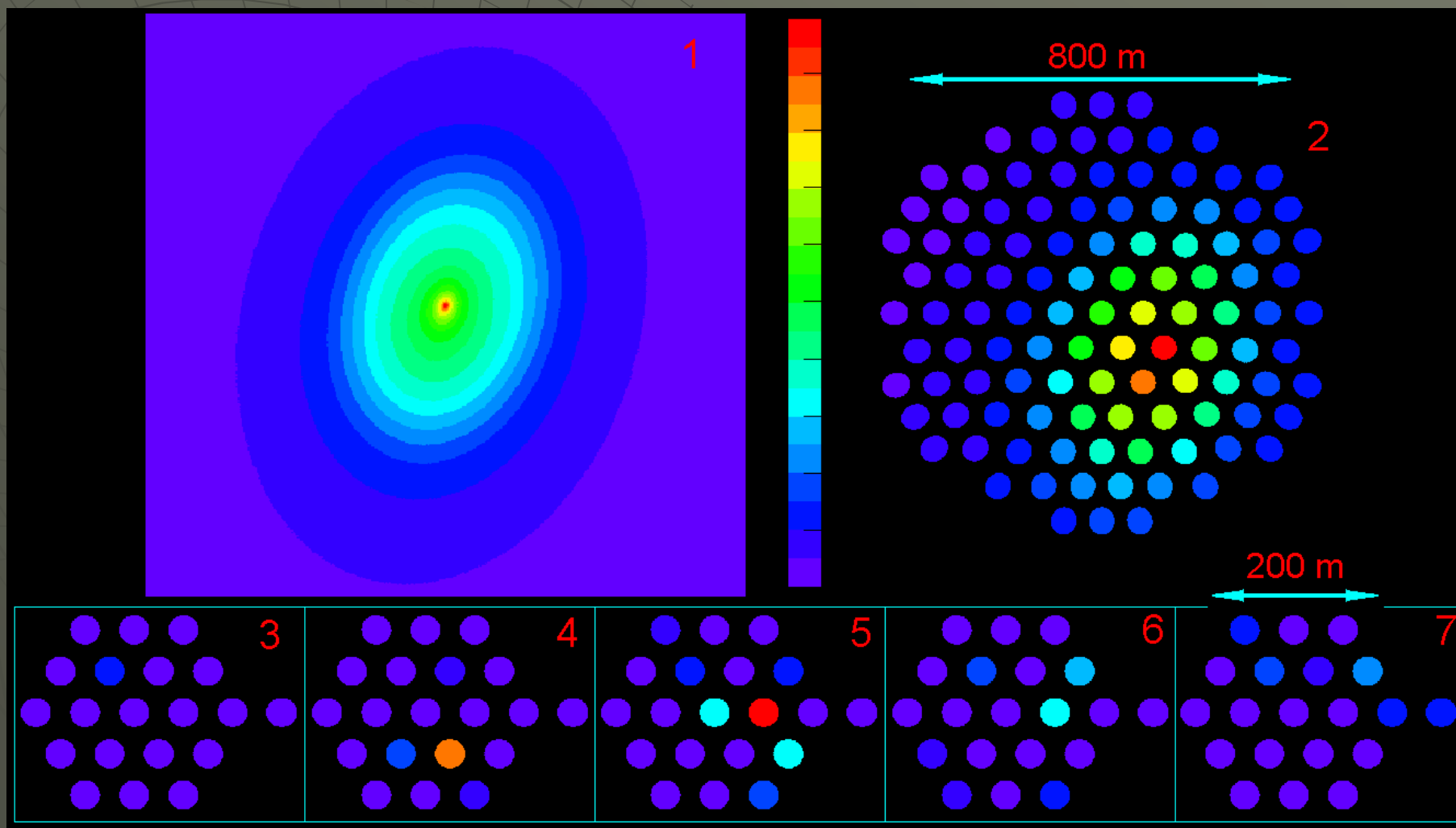


# Телескоп СФЕРА-2

**СФЕРА-2** – черенковский телескоп, подвешиваемый к аэростату и регистрирующий свет, отраженный от заснеженной поверхности Земли. Зеркало диаметром 1,5м, R=94см, 109 ФЭУ в фокусе, полный угол зрения 52°, диафрагма перед зеркалом. Каждый ФЭУ видит участок поверхности диаметром 70м (для H=1км).

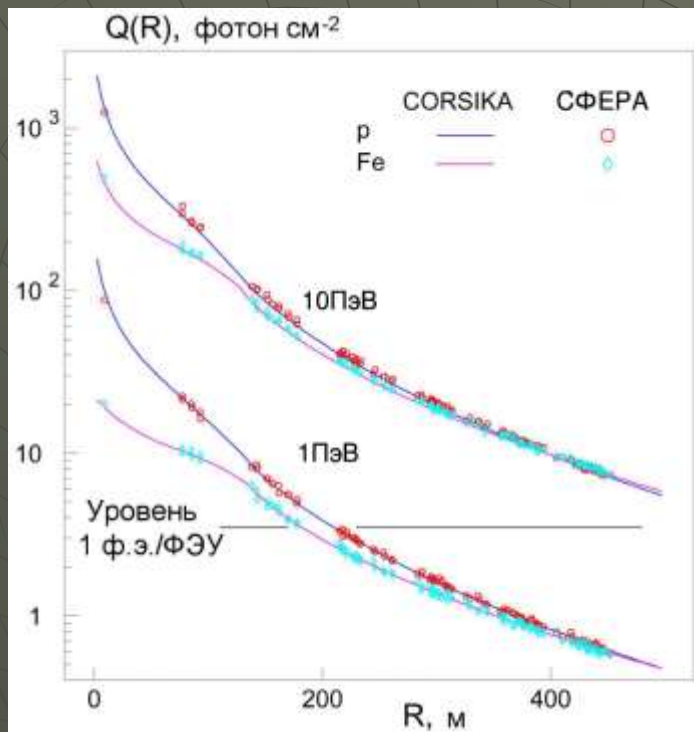
Искусственный ливень от протона,  $E=10^{16}$  эВ

Так его увидит СФЕРА-2

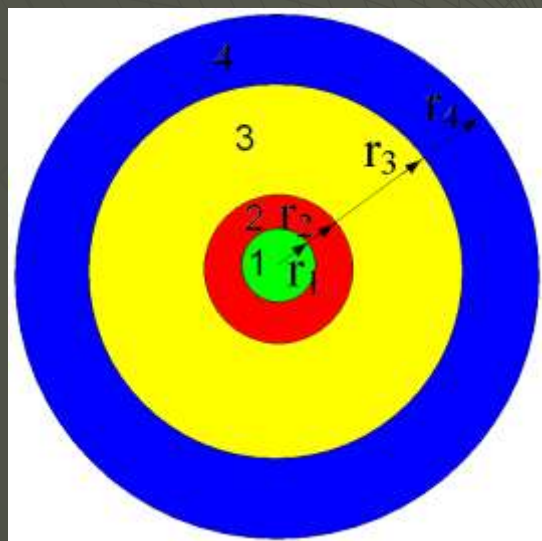
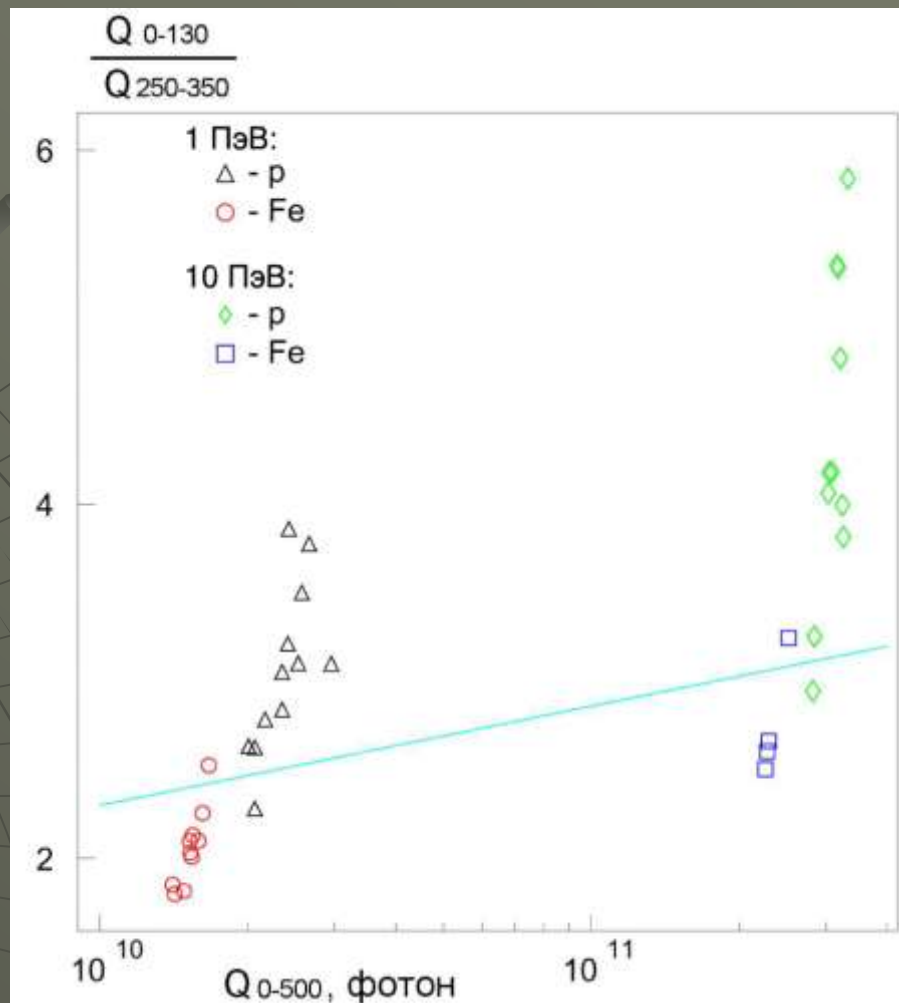


↑ Реальное событие, увиденное неполной камерой в марте 2008 г. (кадры по 25нс)

# Метод разделения первичных ядер по поперечному распределению ЧС ШАЛ



← Индивидуальные ФПР ЧС от почти вертикальных ШАЛ, CORSIKA/QGSJET1, уровень оз. Байкал



←  $\eta$  - мера крутизны ФПР ЧС

$$\eta(r_1, r_2, r_3, r_4) = \frac{\int_{r_1}^{r_2} 2\pi r \cdot \rho(r) dr}{\int_{r_3}^{r_4} 2\pi r \cdot \rho(r) dr}$$

$r_4 \geq r_3 + \delta r, \quad r_3 \geq r_2, \quad r_2 \geq r_1 + \delta r$

События от вертикальных  $p$  и  $Fe$  разделяются в переменных  $Q_{0-500} - Q_{0-130}/Q_{250-350}$  с ошибкой 10%



# Метод выделения первичных протонов для СФЕРА-2:

регистрируем только протоны, лежащие правее  
правого края распределения He

QGSJET-I

QGSJET-II

66 He

$Q_{0-130}/Q_{250-350}$

66 p

66 He

$Q_{80-160}/Q_{240-400}$

66 p

82 He

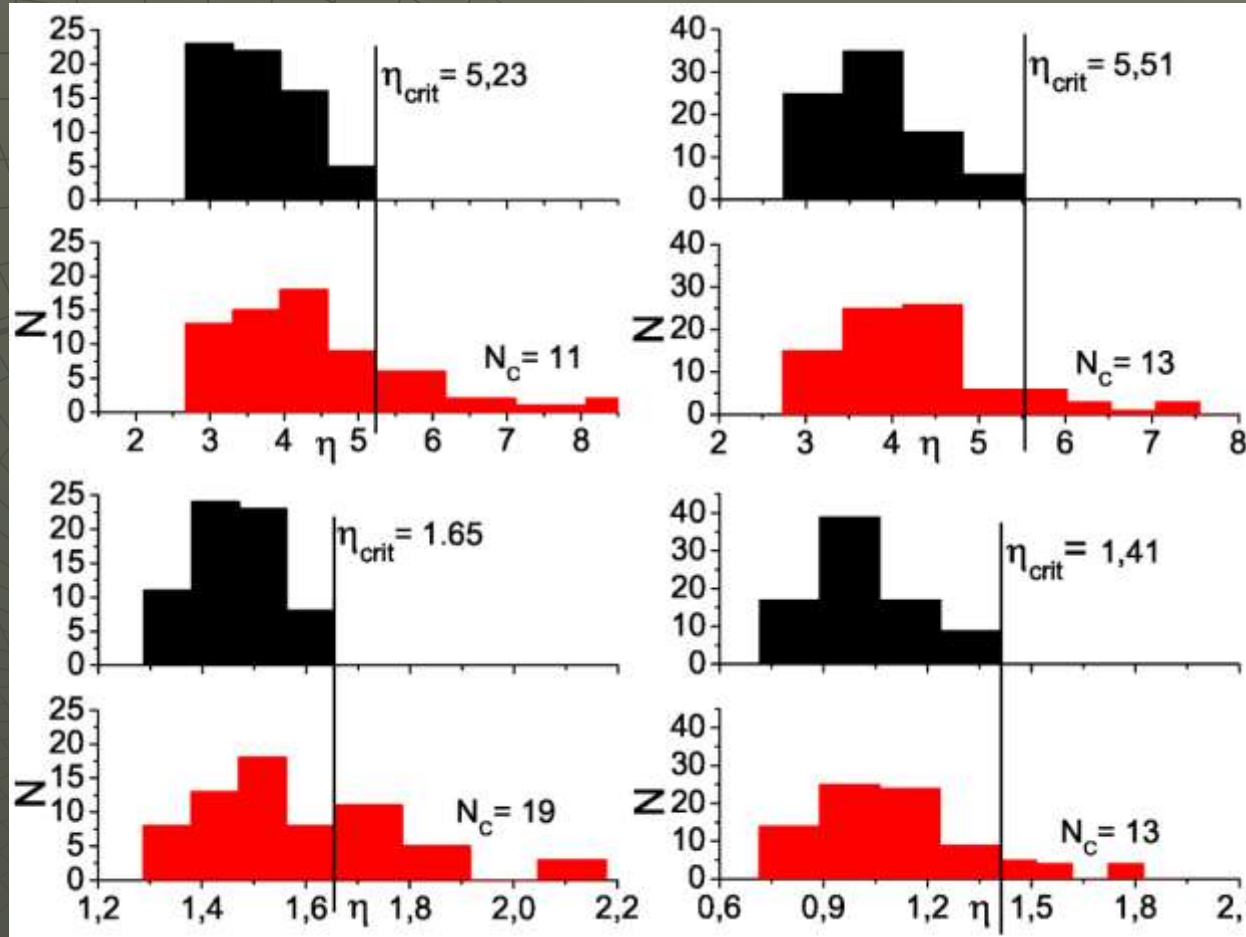
$Q_{0-130}/Q_{250-350}$

85 p

82 He

$Q_{0-80}/Q_{80-160}$

85 p

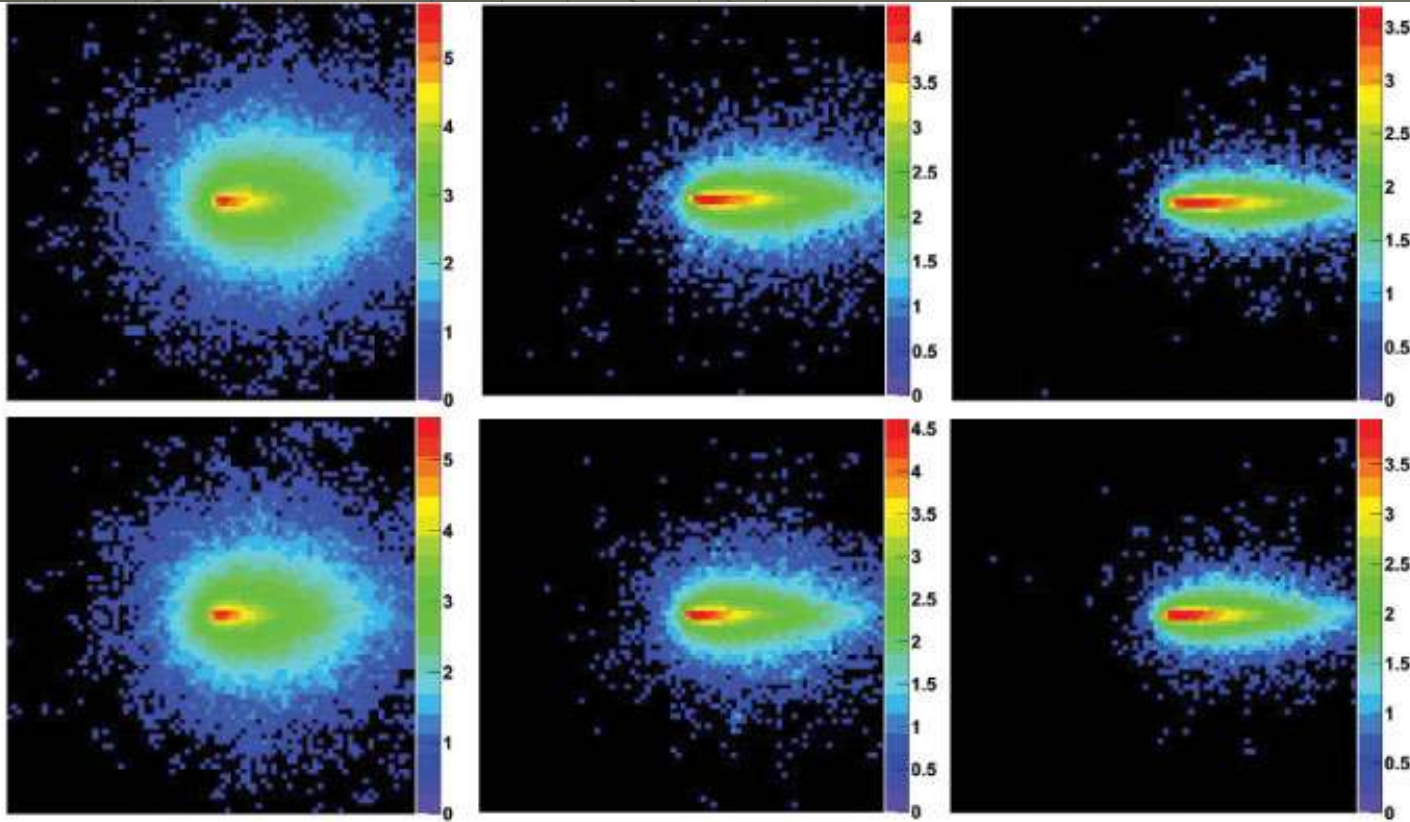


- Выводы:**
- построенные критерии позволяют выделять известную долю потока протонов
  - доля составляет не менее 10% и зависит от модели
  - граничное значение критерия от модели не зависит (зависит от критерия)

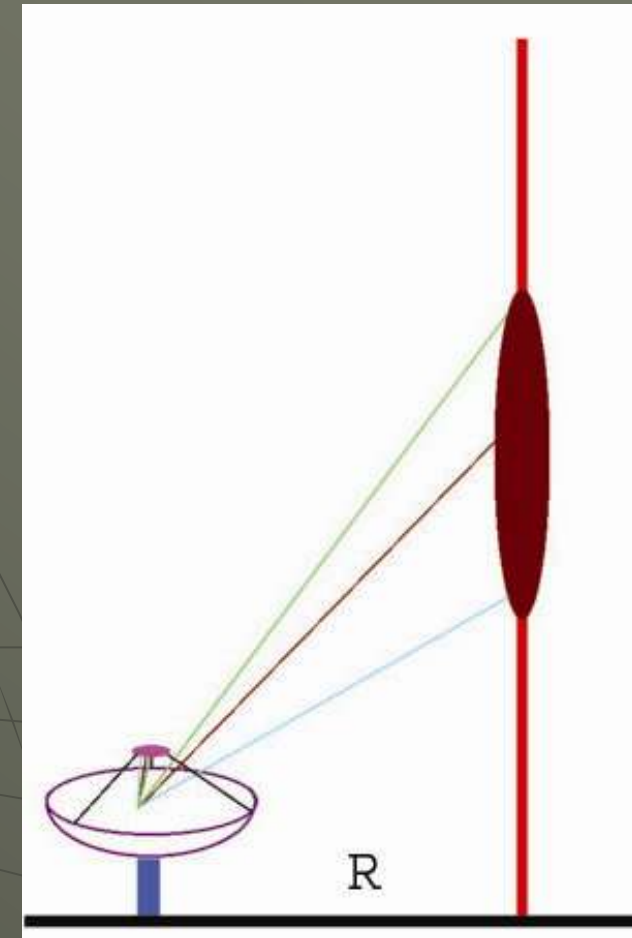
# Угловое распределение ЧС ШАЛ от различных ядер

Искусственные угловые образы

Схема сбора света детектором



Угловые распределения излучения Вавилова-Черенкова двух индивидуальных ШАЛ с первичной энергией 10 PeV. По осям двумерной гистограммы отложены углы так, что центр поля зрения соответствует направлению в зенит. Верхний ряд- угловые распределения от первичного протона, нижний ряд- от ядра азота. Слева- угловые распределения на расстоянии 40 m от оси, в центре- 120 m, справа- 200 m



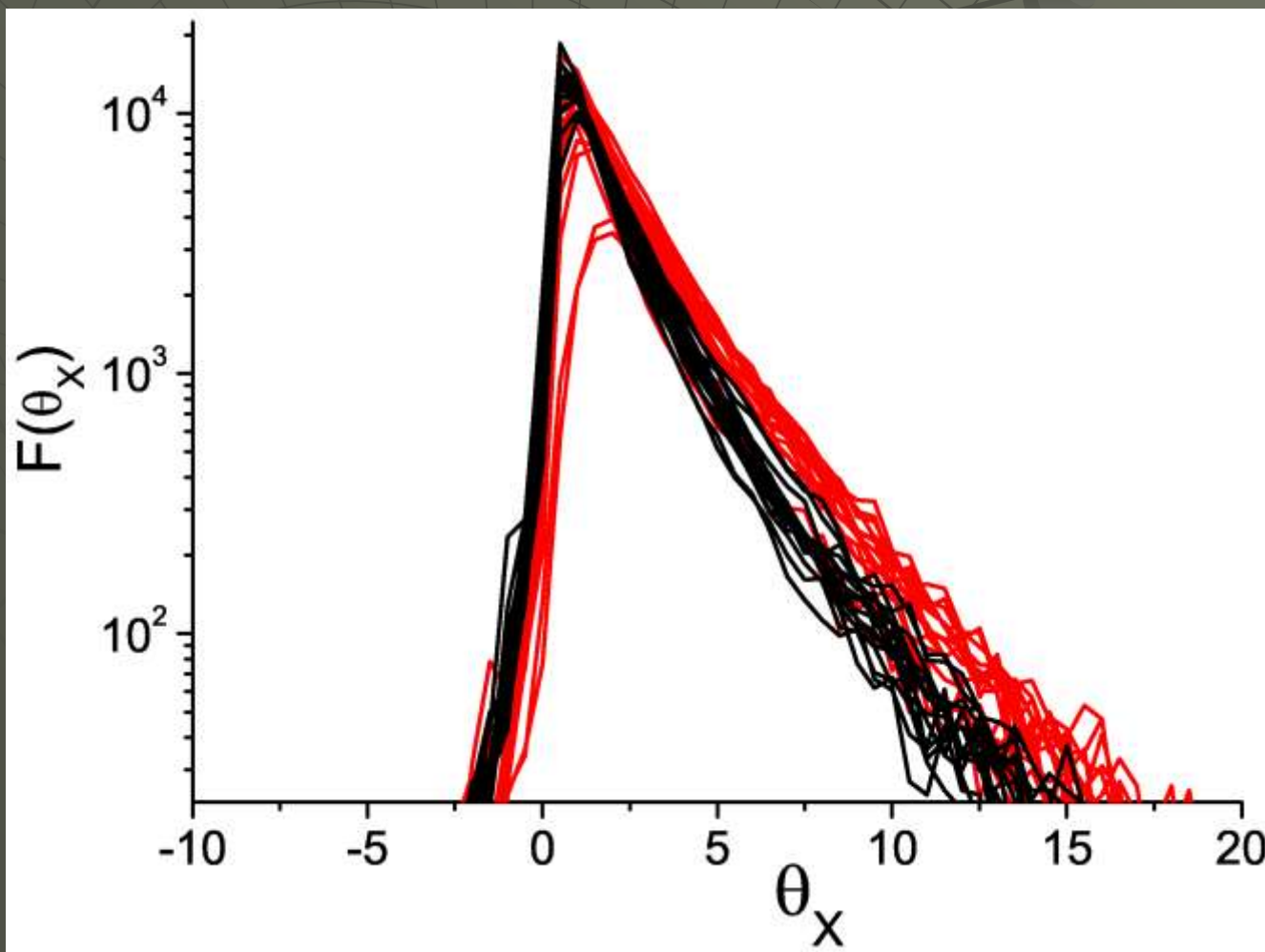
Уровень наблюдения --- 1км



# Особенности угловых распределений ЧС ШАЛ с энергиями $10^{15}$ - $10^{16}$ эВ

- С точки зрения эксперимента ПУР ЧС ШАЛ можно представить как совокупность угловых образов одного и того же ливня (одновременно зарегистрированных несколькими угловыми телескопами)
- Характерные угловые масштабы, на которых проявляются различия угловых образов ЧС ШАЛ от разных первичных  $\sim 0,5$  град
- Чем выше уровень наблюдения, тем больше угловые размеры образов (несколько градусов).  
Большие угловые размеры образов требуют большого поля зрения телескопов: как минимум,  $20 \times 20$  град при умеренном размере пиксела (от  $0,5$  до  $1,0$  град, в зависимости от уровня наблюдения)
- Для эффективного использования угловых образов для определения  $A$  направление прихода ливня и точка падения оси должны быть известны с хорошей точностью ( $\sim 0,1$  град и  $\sim$ нескольких метров, соответственно)
- Для восстановления энергии, направления и положения оси естественно использовать пространственно-временное распределение ЧС, хотя направление может быть неплохо восстановлено и по самим угловым образам

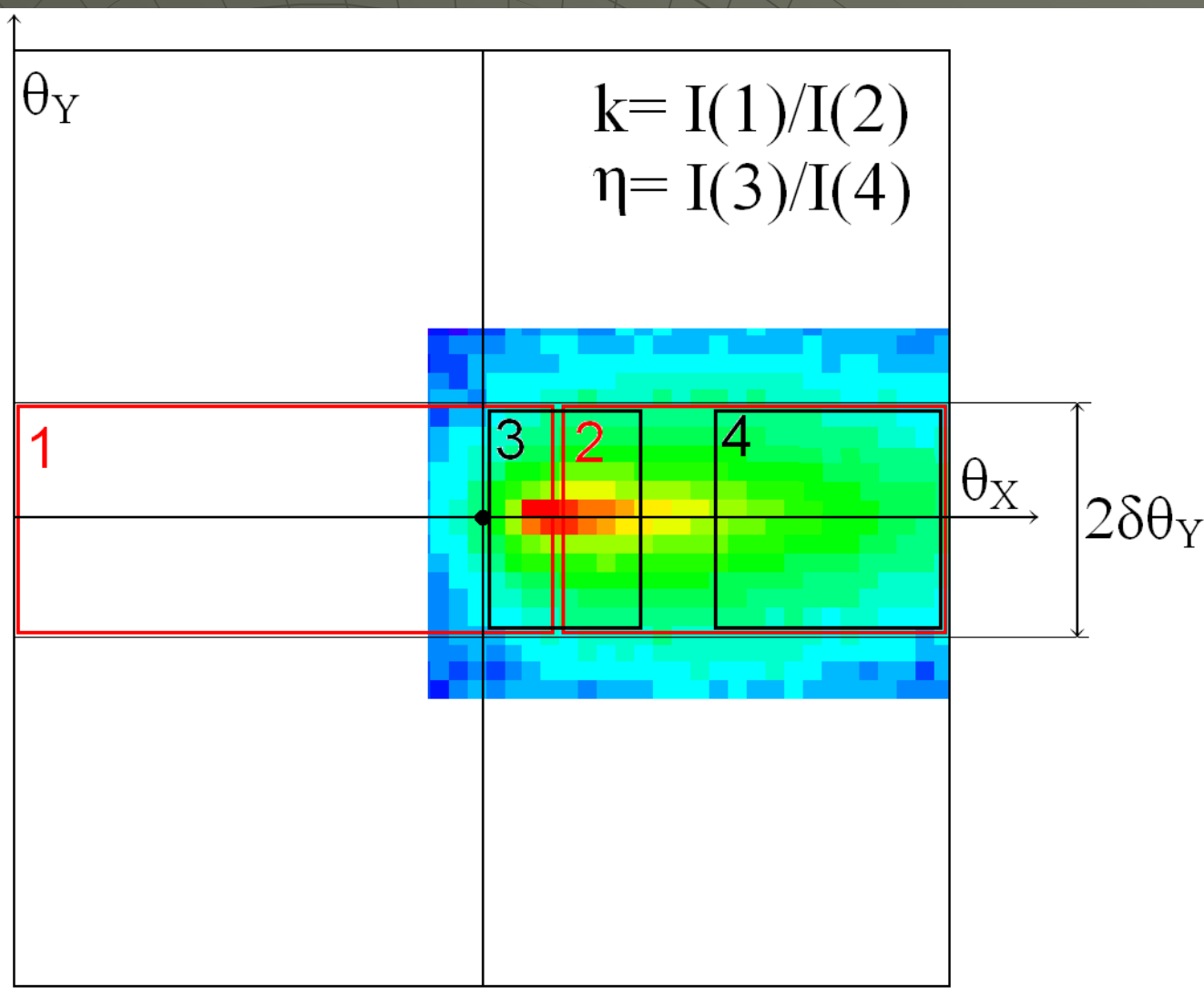
Индивидуальные угловые распределения ЧС  
нескольких ШАЛ на расстоянии 100 м от оси,  
проинтегрированные вдоль короткой оси  
(по  $\theta_y$  в интервале от  $-\delta\theta_y$  до  $+\delta\theta_y$ )



черные кривые-  
протоны,  
красные кривые-  
ядра азота,  
 $\delta\theta_y = 1.5$  град

# Новые параметры угловых образов

асимметрия  $k$  и крутизна  $\eta$  продольного профиля  
углового распределения ЧС ШАЛ



$$k = \frac{\int_{-20}^{1.5} F_x(\theta_x) d\theta_x}{\int_{1.5}^{20} F_x(\theta_x) d\theta_x}$$

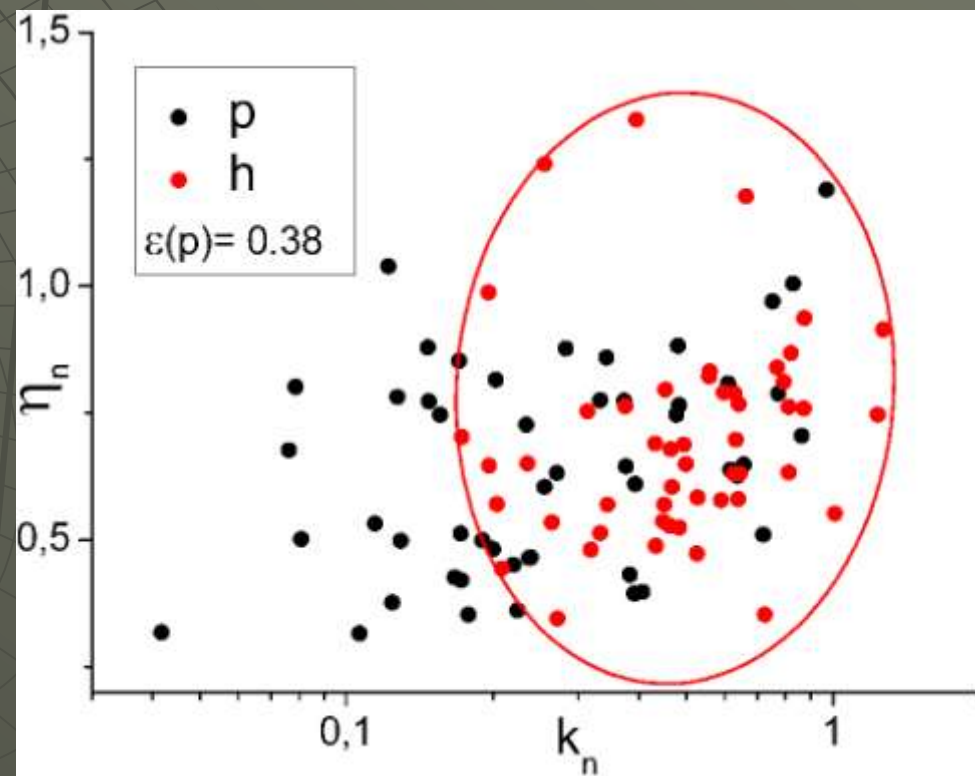
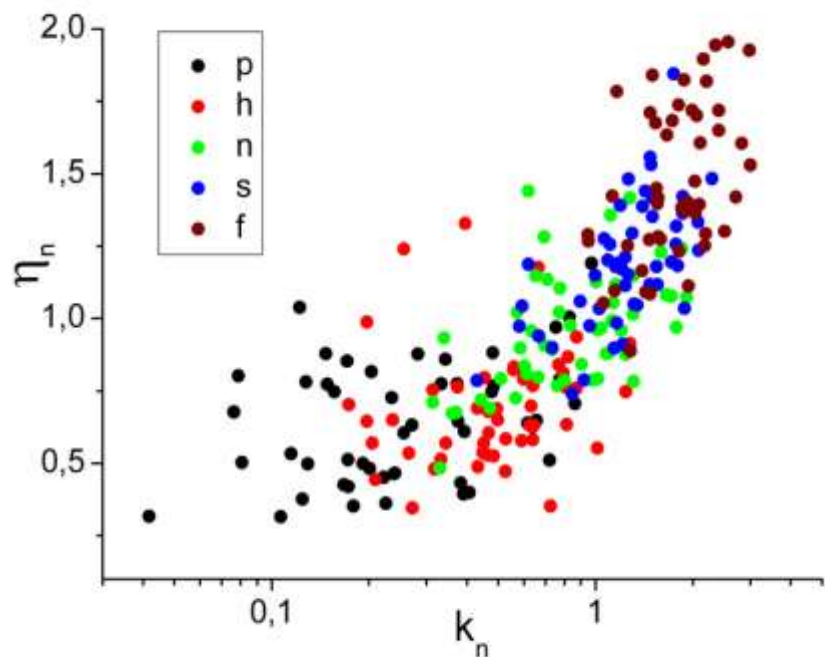
$$\eta = \frac{\int_0^{2.5} F_x(\theta_x) d\theta_x}{\int_5^{20} F_x(\theta_x) d\theta_x}$$



# Разделение ядер по $k$ и $\eta$ (асимметрии и крутизне продольного профиля углового образа)

По 50 событий от протонов, ядер гелия, азота, серы и железа с энергией 1 ПэВ показаны в координатах  $k$  и  $\eta$ .  
Даже по двум параметрам можно разделять протоны и азот с ошибкой  $\sim 10\%$ .

Можно поставить задачу выделения некоторой доли чистых протонов от He (как это было сделано по ФПР). Доля чистых протонов составляет  $\sim 38\%$  против  $\sim 10\%$  по ФПР, что говорит о большей чувствительности ФУР к  $A$ .



# Результаты многомерной классификации 16 параметров = 4 признака (D, L, W, Conc) × 4 расстояния (R=50, 100, 150, 200 м)

Истинная масса →

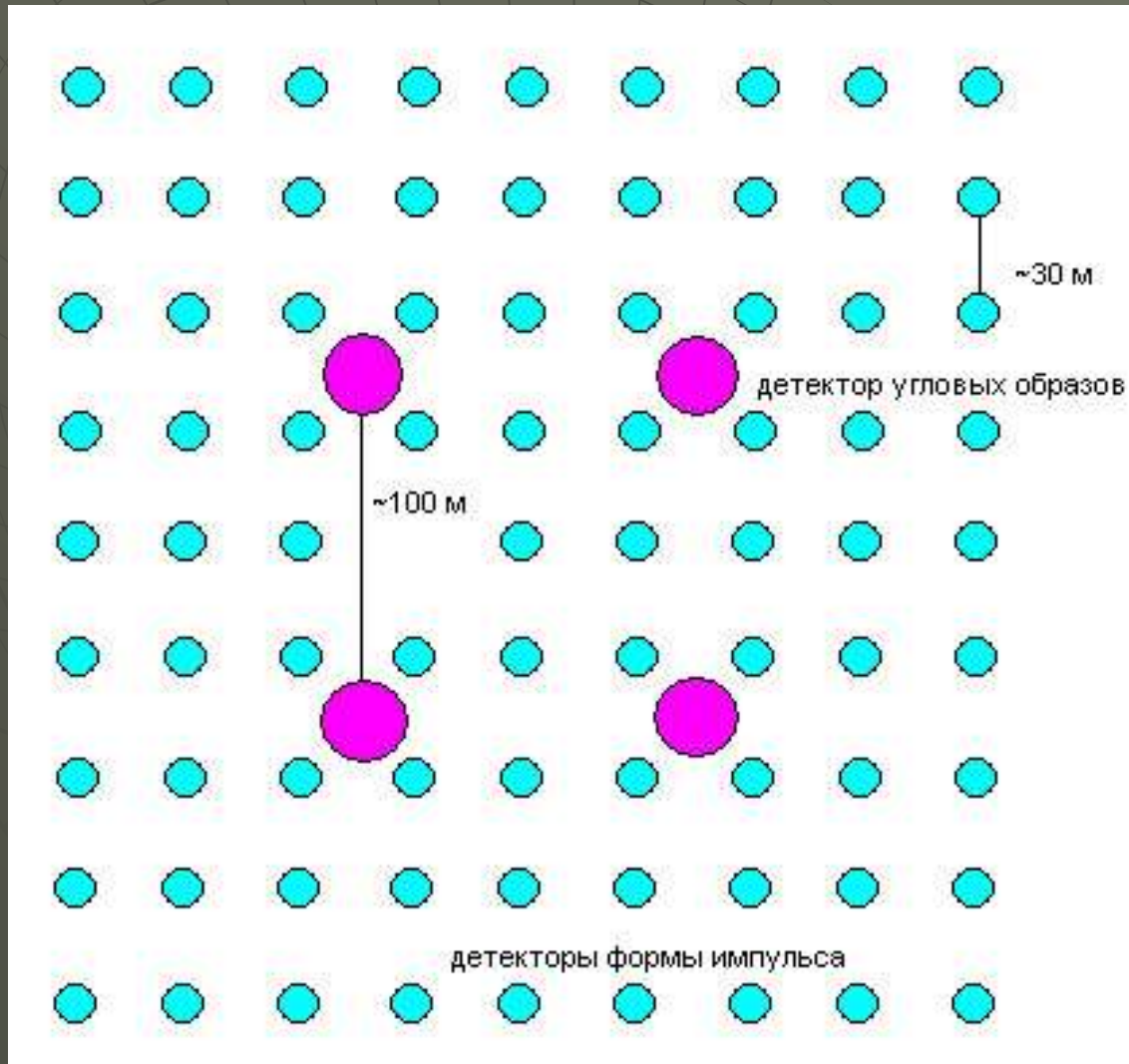
Изме-  
ренная  
масса  
↓

| N= 16 | $p \rightarrow p$ | $p \rightarrow h$ |      |      |      |
|-------|-------------------|-------------------|------|------|------|
|       | p                 | h                 | n    | s    | f    |
| p     | 0.74              | 0.26              | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| h     | 0.00              | 0.90              | 0.06 | 0.00 | 0.00 |
| n     | 0.00              | 0.06              | 0.92 | 0.02 | 0.00 |
| s     | 0.00              | 0.00              | 0.04 | 0.90 | 0.06 |
| f     | 0.00              | 0.00              | 0.00 | 0.00 | 1.00 |

$s \rightarrow f$

$E_0 = 1$  ПэВ. Ядра: **p** - протоны, **h** - гелий, **n** - азот, **s** - сера, **f** - железо.  
Статистика: 5 × 50 ливней

# Общие черты установки для изучения массового состава ПКЛ по пространственно-угловому распределению ЧС ШАЛ



Использование **одновременно пространственно-углового и пространственно-временного** распределений ЧС ШАЛ позволяет рассчитывать на максимальную делимость событий от разных первичных ядер.

**Телескопы** с зеркалами  $\sim 2-4\text{ м}^2$  регистрируют **угловое распределение света**, **быстрые детекторы** определяют **направление прихода**, **точку падения оси** и **энергию ливня** и позволяют анализировать **пространственное распределение ЧС**



# Выводы

- ◆ ЧС ШАЛ --- самая богатая информацией и многообещающая компонента ШАЛ с точки зрения анализа массового состава ПКЛ в диапазоне энергий  $10^{14}$ - $10^{17}$  эВ
- ◆ Использование предлагаемых подходов позволит существенно уточнить массовый состав ПКЛ в этом диапазоне

