

Разделение групп ядер ПКЛ
с энергиями 10^{15} – 10^{16} эВ
с помощью пространственно-углового
распределения черенковского света ШАЛ

В.И. Галкин^{1,2}, Т.А. Джатдоев^{1,2} *

^{1,2} Физический факультет МГУ

^{1,2} НИИЯФ МГУ

*Работа выполнена при финансовой поддержке
Федерального агентства по науке и инновациям,
госконтракт номер 02.740.11.5092

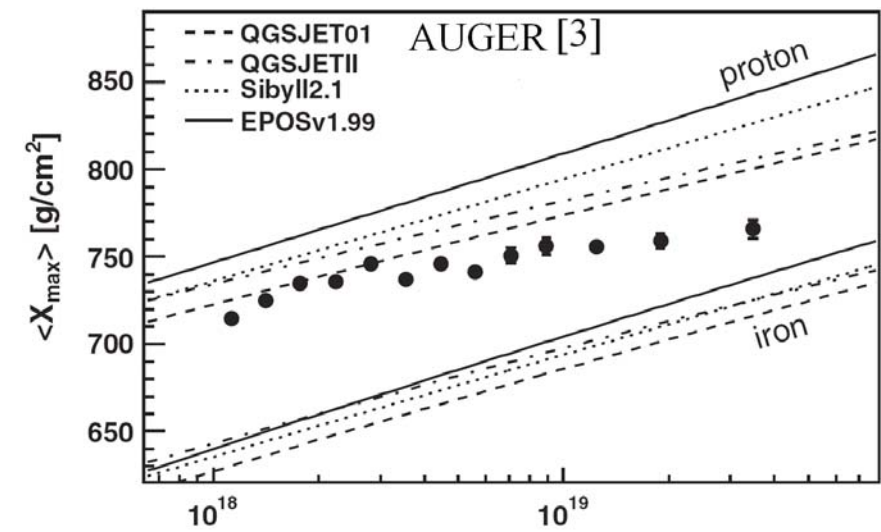
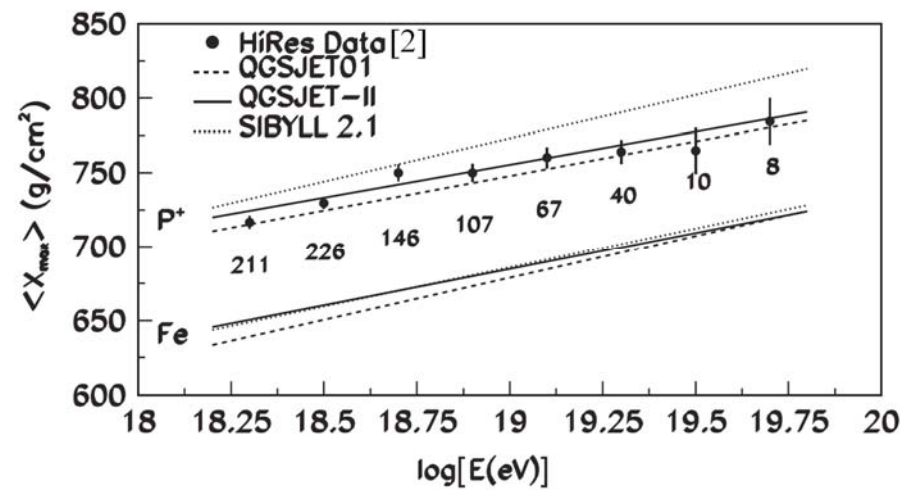
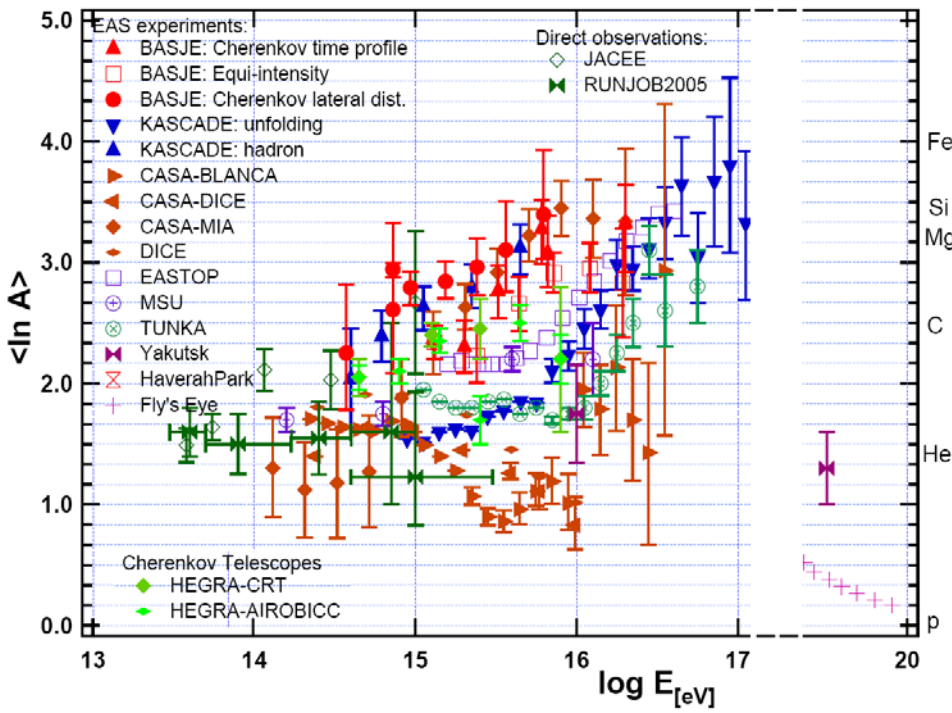
Содержание

1. Проблема массового состава космических лучей сверхвысоких энергий
2. Методы, использующие пространственно-угловое распределение черенковского света широких атмосферных ливней (ШАЛ)
3. Особенности предлагаемой методики
4. Результаты многомерной классификации: разделение групп первичных ядер
5. Новые параметры угловых образов черенковского света (ЧС) ШАЛ
6. Результаты классификации с использованием предложенных параметров
7. Оптимизация параметров угловых образов ЧС ШАЛ
8. Выводы

1. Проблема массового состава космических лучей сверхвысоких энергий

Измеренное среднее массовое число ПКЛ
(Y.Tsunesada, et al. (BASJE Collaboration),
Proc. 30th ICRC, HE1, 127 (2007))

Результаты экспериментов
HIRES (сверху) и AUGER
(снизу)



Эксперимент	Интервал энергий, эВ	Количество событий	Ссылка
KASCADE	$10^{14} - 10^{17}$	$6.9 \cdot 10^5$	[1]
HIRES	$10^{18} - 10^{19}$	690	[2]
HIRES	$10^{19} - 10^{20}$	125	[2]
AUGER	$> 10^{19}$	243	[3]
HIRES	$5 \cdot 10^{19} - 10^{20}$	18	[2]

- 1- T. Antoni et al., APh, **24**, 1 (2005)
- 2- R.U. Abbasi et al., Phys. Rev. Lett., **104**, 161101 (2010)
- 3- Abraham et al., Phys. Rev. Lett., **104**, 091101 (2010)

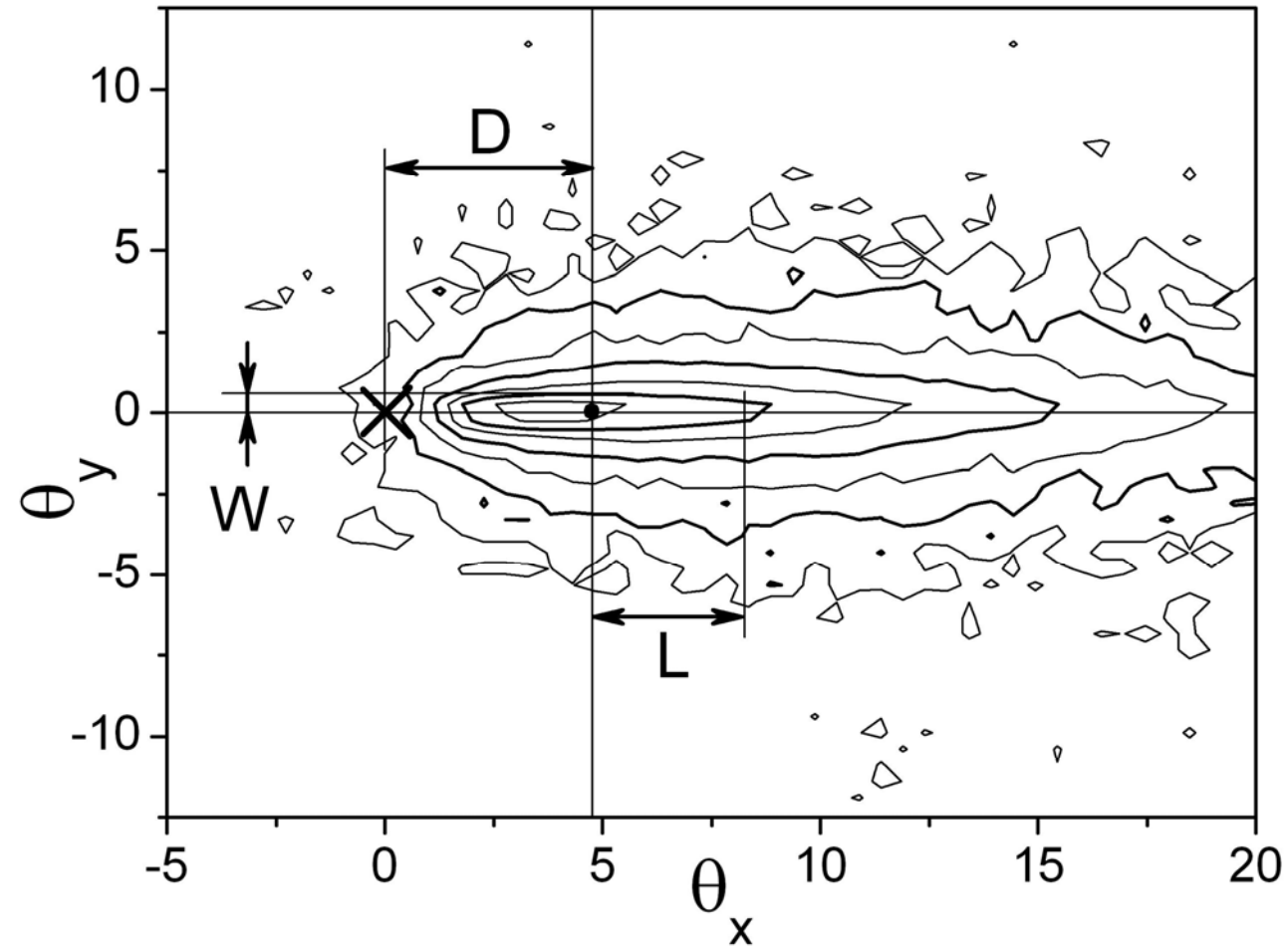
Гипотеза настоящей работы: параметры, используемые для измерения массового состава ПКЛ, недостаточно чувствительны к массе первичного ядра и/или недостаточно устойчивы к систематическим ошибкам экспериментов

Цель работы: поиск новых параметров ШАЛ, чувствительных к массе первичного ядра

Как правило, в экспериментах прошлого не было возможности указать принадлежность конкретного ливня определенному первичному ядру или группе ядер с достаточно высокой вероятностью (например, 0.99)

Для построения методики разделения групп ядер ПКЛ в настоящей работе использовано пространственно-угловое распределение черенковского света широких атмосферных ливней, дающее такую возможность

2. Методы, использующие пространственно-угловое распределение черенковского света широких атмосферных ливней



“параметры Хилласа”:

D-
расстояние “центра тяжести” образа от центра поля зрения
L-
среднеквадратичная полудлина пятна
W-
среднеквадратичная полуширина пятна
Conc=
 $(\text{Max} + \text{Max}2) / I$,
I- интеграл по площади пятна

Измерение состава первичных космических лучей (ПКЛ) с помощью пространственно-углового распределения излучения Вавилова-Черенкова ШАЛ

- 1. K. Boothby, et al., ApJ, **491**, 35 (1997)- измерение $\langle X_{\text{Max}} \rangle$
- 2. S.P. Swordy & D.B. Kieda, APh, **13**, 137 (2000)- многомерный подход (несколько компонент ливня)
- 3. A. Haungs, et al., APh, **12**, 145 (1999)- непараметрический подход к разделению классов ядер
- 4. A.V. Plyasheshnikov, et al., J. Phys. G, **24**, 653 (1998)- одномерные классификаторы на основе “параметров Хилласа”
- **5. F.A. Aharonian, et al., Phys. Rev D 59, 092003 (1999)- измерение спектра протонов в области энергий 1.5-3 ТэВ по методике [4]**
- **6. F.A. Aharonian, et al., NIMP B, 201, 1, 217 (2003)- непараметрическая методика разделения групп ядер по угловому распределению черенковского света ШАЛ**

3. Особенности предлагаемой методики

Моделирование ливней

полное прямое моделирование методом Монте-Карло
CORSIKA-6500 [1], QGSJET-(II-03) [2]+GHEISHA [3]
E= 1, 10 PeV

записанный сигнал = квантовая эффективность (≈ 0.1)*ФПР фотонов:

- I. Пространственно-угловое распределение- 250x250 пространственных бинов 2.0x2.0 m x 80x80 угловых бина 0.5x0.5 °
- II. Пространственно- временное распределение- 250x250 пространственных бинов 2.0x2.0 m x 102 временных бина 2 ns

Общая статистика: 500 ливней ($\theta= 0$ deg)

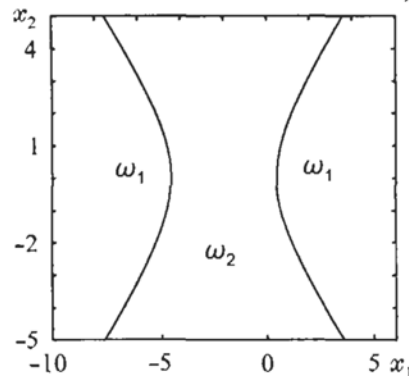
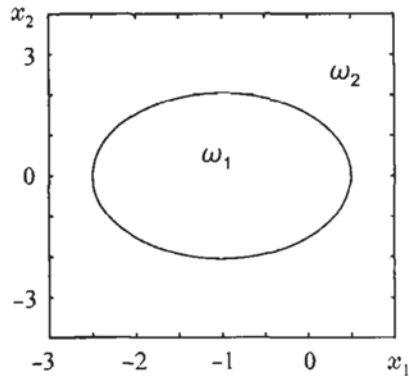
E= 1 ПэВ 1 km: (p,h,n,s,f) — по 50 ливней; 4 km: (p,h,n,c,f) — по 50 ливней

- 1- Heck D., et al., Forschungszentrum Karlsruhe Report FZKA 6019. 1998
- 2- Ostapchenko S., Nucl. Phys. Proc. Suppl. B. 2006. 151. P. 143
- 3- Fesefeldt H.C., Technical Report No. PITNA 85-02 RWTH. 1985

Метод распознавания образов: байесова классификация в предположении о многомерном нормальном распределении параметров (S. Theodoridis & K. Koutroumbas, Pattern Recognition, Elsevier (2003))

$$P(\omega_i|x) = \frac{p(x|\omega_i)P(\omega_i)}{p(x)}$$

$$p(x) = \sum_{i=1}^M p(x|\omega_i)P(\omega_i)$$



$$p(\mathbf{x}) = \frac{1}{(2\pi)^{l/2} |\Sigma|^{1/2}} \exp\left(-\frac{1}{2}(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu})^T \Sigma^{-1}(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu})\right)$$

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \sigma_{12} & \cdots & \sigma_{1l} \\ \sigma_{21} & \sigma_2^2 & \cdots & \sigma_{2l} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{l1} & \sigma_{l2} & \cdots & \sigma_l^2 \end{bmatrix}$$

$$\sigma_i^2 = E[(x_i - \mu_i)^2]$$

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ji} = E[(x_i - \mu_i)(x_j - \mu_j)]$$

$$p(\mathbf{x}) \rightarrow p(\mathbf{x}|\omega_i)$$

$$g_i(\mathbf{x}) = -\frac{1}{2}\mathbf{x}^T \Sigma_i^{-1} \mathbf{x} + \frac{1}{2}\mathbf{x}^T \Sigma_i^{-1} \boldsymbol{\mu}_i - \frac{1}{2}\boldsymbol{\mu}_i^T \Sigma_i^{-1} \boldsymbol{\mu}_i + \frac{1}{2}\boldsymbol{\mu}_i^T \Sigma_i^{-1} \mathbf{x}$$

$$+ \ln P(\omega_i) + c_i$$

$$\text{Решающее правило: } p(\mathbf{x}|\omega_1) \geq p(\mathbf{x}|\omega_2)$$

4. Результаты многомерной классификации (16 параметров (D,L,W,Conc) (50,100,150,200)).

Строки: тип первичной частицы.

Столбцы: результат классификации

N= 16	$p \rightarrow p$	$p \rightarrow h$	n	s	f
	p	h			
p	<u>0.74</u>	<u>0.26</u>	0.00	0.00	0.00
h	0.02	0.90	0.06	0.02	0.00
n	0.00	0.06	0.92	0.02	0.00
s	0.00	0.00	0.04	0.90	<u>0.06</u>
f	0.00	0.00	0.00	0.00	<u>1.00</u>

$s \rightarrow f$

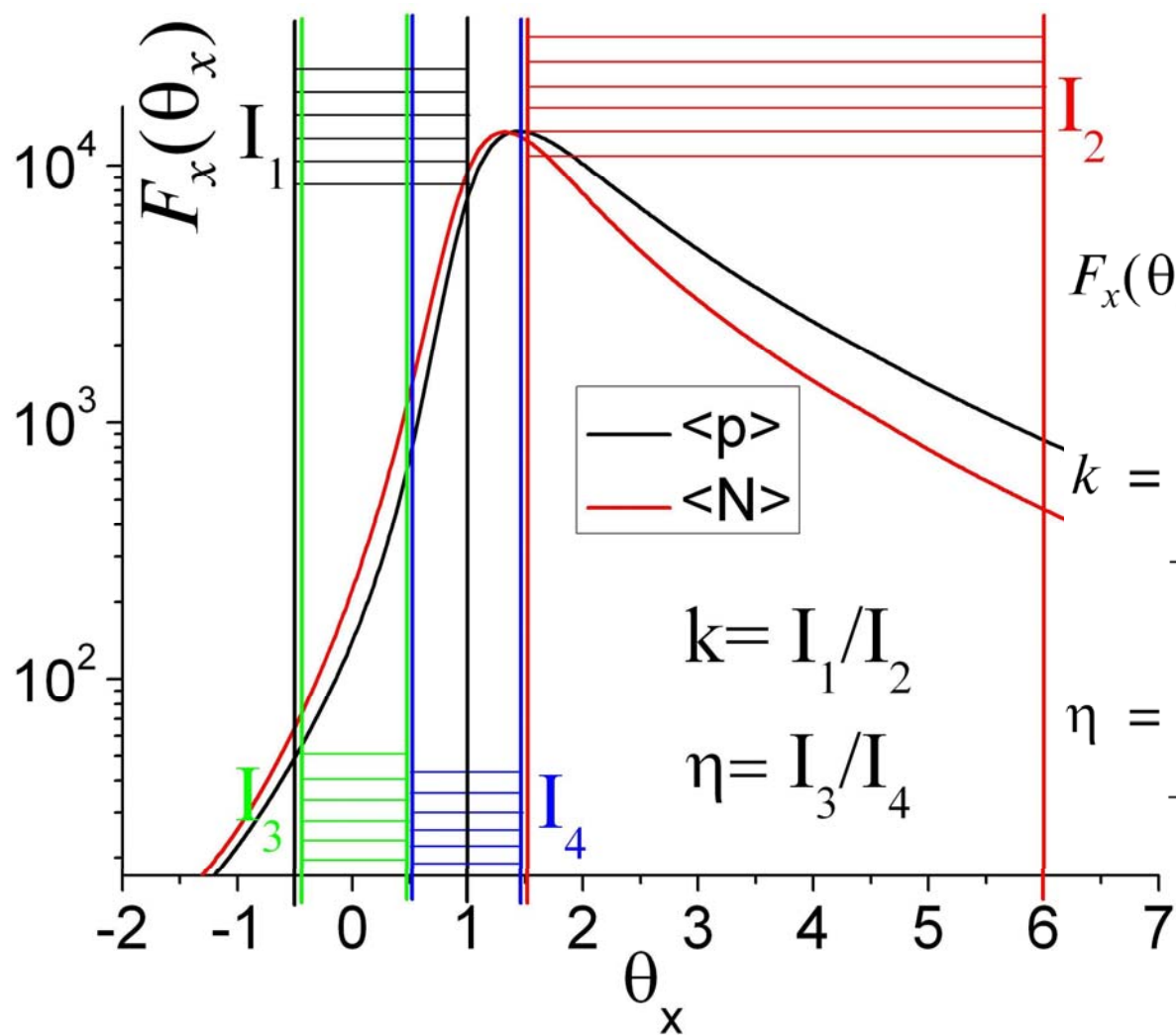
$E_0 = 1$ PeV. p- протоны, h- ядра гелия, n- ядра азота, s- серы, f- железа.

Статистика: по 50 ливней каждого типа (всего 250).

Примечание: Ошибки калибровки пикселей телескопа $\approx 3\%$ приводят к дополнительным ошибкам классификации в задаче (p,n) $\approx 5\%$

5. Новые параметры угловых образов черенковского света ШАЛ

Пример выбора переменных: коэффициент асимметрии k и “крутизна” η продольного профиля углового распределения излучения Вавилова-Черенкова ШАЛ в задаче о разделении первичных протонов и ядер азота ($E=1$ ПэВ, $R=100$ м $H=1$ км)



$$F_x(\theta_x) = \int_{-1.5^\circ}^{1.5^\circ} F(\theta_x, \theta_y) d\theta_y$$

$$k = \frac{\int_{-0.5}^{1.0} F_x(\theta_x) d\theta_x}{\int_{1.5}^{6.0} F_x(\theta_x) d\theta_x}$$

$$k = I_1 / I_2$$

$$\eta = I_3 / I_4$$

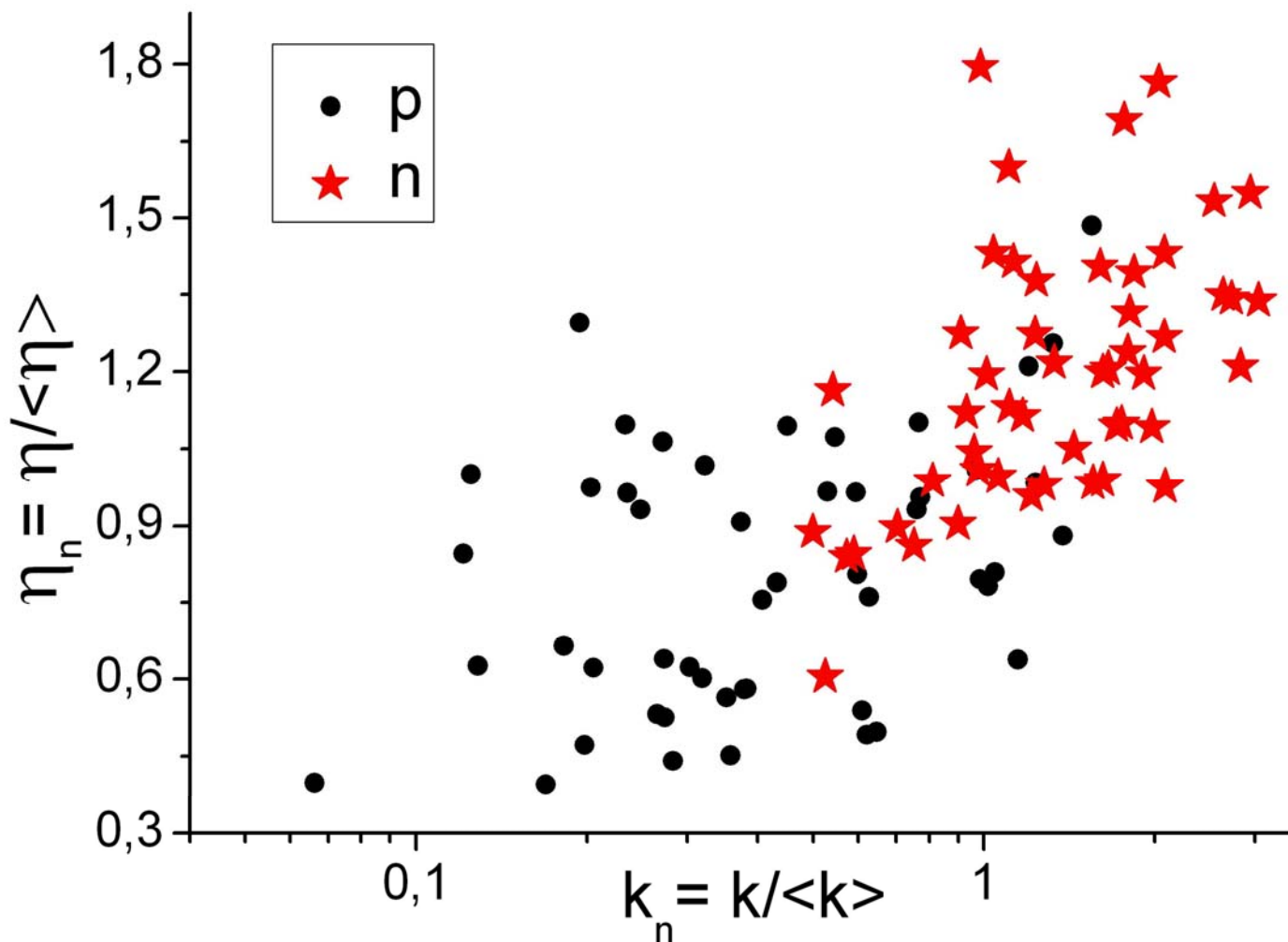
$$\eta = \frac{\int_{-0.5}^{0.5} F_x(\theta_x) d\theta_x}{\int_{0.5}^{1.5} F_x(\theta_x) d\theta_x}$$

6. Результаты классификации с использованием предложенных параметров

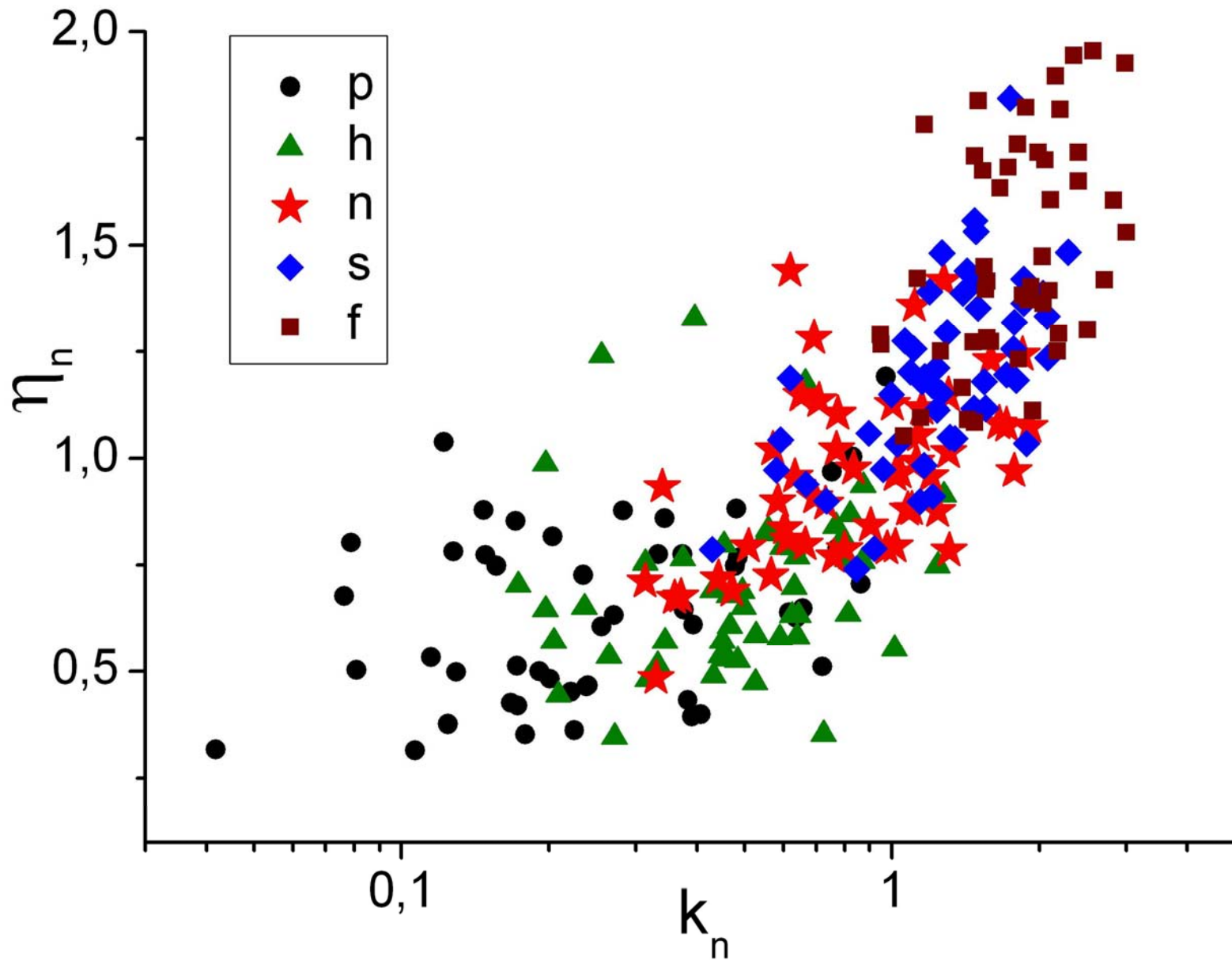
а) Классификация с двумя параметрами, взятыми на определенном расстоянии от оси:
ошибки классификации (р,п) \approx 10-15 %

E_0 , ПэВ	H, км	R, м	θ_{xk1}	θ_{xk2}	θ_{xk3}	θ_{xk4}	$\theta_{x\eta1}$	$\theta_{x\eta2}$	$\theta_{x\eta3}$	$\theta_{x\eta4}$
1	1	100	-0.5	1.0	1.5	6.0	-0.5	0.5	0.5	1.5
1	2	70	-0.5	2.0	3.0	8.0	-0.5	0.5	0.5	1.5
10	1	100	-0.5	0.5	3.0	7.5	1.0	2.0	3.5	4.5

Результат классификации в задаче о разделении первичных протонов и ядер азота ($E_0 = 1$ ПэВ, $H = 1$ км; параметры из предыдущей таблицы). Ошибки классификации составляют $\approx 10-15\%$ (в обе стороны). Доля выделенных протонов в задаче классификации $(p,h) = 0.38$



Классификация (p,h,n,s,f) (E= 1ПэВ; H=1км;
параметры из первой строки предыдущей таблицы)



7. Оптимизация параметров угловых образов ЧС ШАЛ

Схема оптимизации параметров:

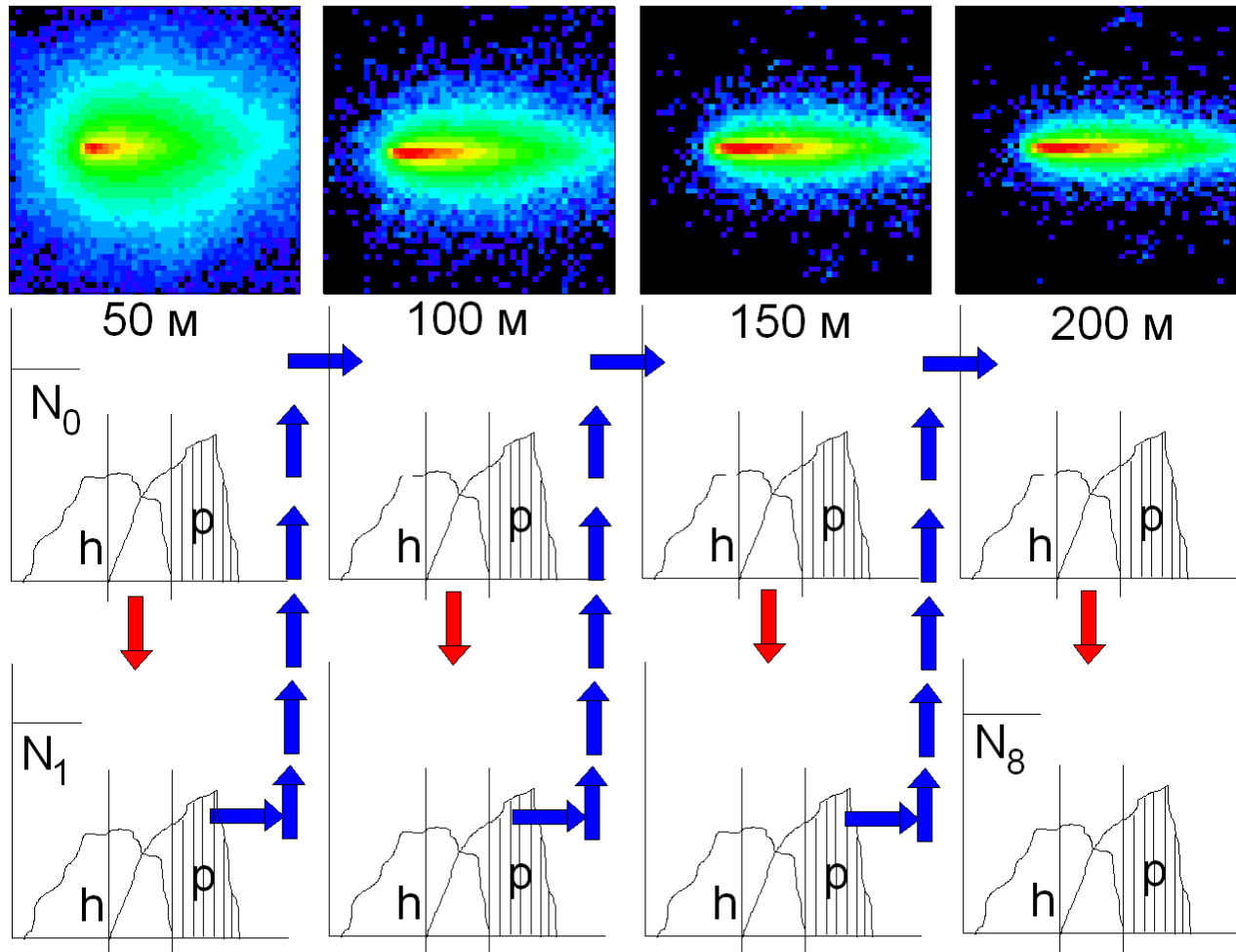
а) выбор переменных б) многомерная байесова классификация

I. “локальная” оптимизация

(соответствует красным стрелкам)- 62% выделенных протонов

II. последовательная оптимизация

(соответствует красным+синим стрелкам)- 68% выделенных протонов



Возможности разделения групп ядер ПКЛ с помощью критерия, основанного на 8 параметрах Хилласа (D,L) (сверху), и на 8 новых переменных (снизу)

$E = 1$ ПэВ $H = 1$ км

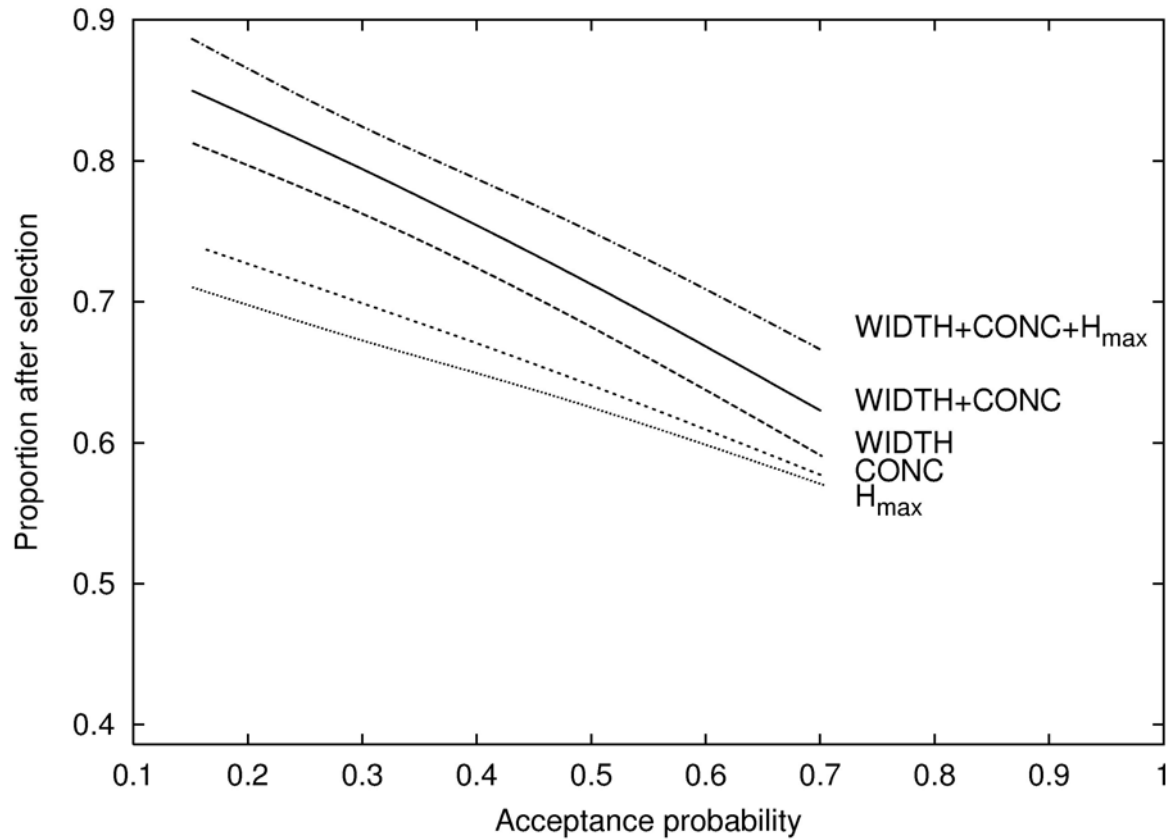
	p	h	n	s	f
p	0.48	0.40	0.12	0.00	0.00
h	0.06	0.74	0.20	0.00	0.00
n	0.02	0.12	0.68	0.12	0.06
s	0.00	0.04	0.18	0.38	0.40
f	0.00	0.00	0.08	0.06	0.86

	p	h	n	s	f
p	0.68	0.24	0.08	0.00	0.00
h	0.08	0.68	0.24	0.00	0.00
n	0.02	0.16	0.52	0.22	0.08
s	0.00	0.00	0.12	0.62	0.26
f	0.00	0.00	0.02	0.20	0.78

Выводы

1. На основании полного статистического моделирования пространственно-углового распределения черенковского света ШАЛ с энергией 1-10 PeV построены многомерные критерии разделения пяти групп первичных ядер—(p,h,n,s,f)
2. Найдено, что ошибки классификации (p,n,f) могут быть уменьшены до нескольких процентов. Кроме того, возможно частичное разделение всех пяти групп ядер (p,h,n,s,f)
3. Наряду с использованием “параметров Хилласа” (D,L,W,Conc) предложены новые параметры углового образа ЧС ШАЛ
4. Проведена оптимизация этих новых параметров, позволившая существенно повысить разделимость классов первичных ядер по сравнению с использованием величин (D,L).

Выделение протонов из общей массы первичных ядер (Aharonian et al., (2003))



	P		HVH			P		HVH	
q_0	E_{th}	η	E_{th}	η	q_0	E_{th}	η	E_{th}	η
10	16	0.89	38	0.96	30	61	0.98	141	0.99
20	43	0.91	101	0.96	60	149	0.99	203	1.00

