The submitted manuscript has been authored by 6 contractor of the U.S. Government contract No. W-31-109-ENG-38. under Accordingly, the U.S. Government retains a nonexclusive, royalty-free license to publish or reproduce the published form of this contribution, or allow others to do so, for U.S. Government purposes.

**"ORTIONS OF THIS REPORT ARE ILLEGIBLE.** 

NOTICE

best broades

the

from the

reproduced

has been 0

permit

2

ivaitabl Copy

possible availabl -

ANL-HEP-CP--83-34

DE83 015688

ANL-HEP-CP-83-34 June 1983

Cmf- 820135--2

# The Soudan nucleon-decay programme: A progress report

K HELLER,<sup>1</sup> J BARTELT,<sup>1</sup> H COURANT,<sup>1</sup> S HEPPELMANN,<sup>1</sup> T JOYCE,<sup>1</sup> M MARSHAK,<sup>1</sup> E PETERSON,<sup>1</sup> K RUDDICK,<sup>1</sup> M SHUPE,<sup>1</sup> D AYRES,<sup>2</sup> J DAWSON,<sup>2</sup> T FIELDS,<sup>3</sup> E MAY,<sup>2</sup> L PRICE,<sup>2</sup> WALLISON,<sup>3</sup> C BROOKS,<sup>3</sup> J COBB,<sup>3</sup> D PERKINS<sup>3</sup> and B SAITTA<sup>3</sup> <sup>1</sup>University of Minnesota, Minneapolis, Minnesota, USA

Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois, USA Oxford University, Oxford, UK

Presented by K Heller

Abstract. The Soudan nucleon decay programme consists of Soudan I, a 30-ton tracking ionization calorimeter at a 1700 mwe depth, a 100-400 MeV charged par-ticle test beam at Argonne National Laboratory, and Soudan II, a 1000 ton tracking ionization calorimeter at a 1800 mwe depth. Soudan I has been fully operational for 26 days giving a lower limit on the nucleon lifetime of  $>2 \times 10^{29}$  years and an upper limit on monopole flux of  $<1.8 \times 10^{-9}$ /m<sup>2</sup> Sr d. The test beam data gives a Soudan I energy resolution of about 25% for electrons and muons in the appro-priate energy range. Soudan II has been proposed and awaits funding.

#### 1. Introduction

Faced with the challenge of investigating nucleon decay to lifetimes of 10<sup>29</sup> to 10<sup>29</sup> years, our group adopted the approach of proceeding in stages. Possible difficulties with such an experiment could arise from the construction and operation of a large particle detector underground, unexpected cosmic ray backgrounds at the sensitivities probed, and the recognition of nucleon decay products as distinguished from the backgrounds. Our programme consists of building a 30-ton prototype detector, Soudan I, which is now operational in the Tower-Soudan mine, instrumenting a test beam of 100-400 MeV charged particles at Argonne National Laboratory, which has been used to investigate the prototype detector, and building a 1000-ton detector, Soudan II, which will also be located in the Tower-Soudan mine and will be expandable if necessary. This paper reports the first month of running of Soudan I in its final configuration.

## 2. The site

The Tower-Soudan iron mine is the deepest in Minnesota and is operated by the State of Minne ota as an underground park. The mine is 160 km north of Duluth, the nearest major city, and 370 km north of the University of Minnesota in Minneapolis. The Soudan I detector is at a depth of 700 m or 1700 mwe. Soudan II will be at 1800 mwe. The flux of cosmic ray muons through Soudan I is 128/hr. This flux

153

DISTRIBUTION OF THIS DOCUMENT IS UNLIMITED

Presented at the ICOBAN Conference, January 11-14, 1983, Bombay, India

is low enough not to cause any rate or background problems in the detector while being sufficient to monitor the efficiencies of individual elements of the detector.

### 3. Soudan I

154

Those responsible for building, testing, and maintaining Soudan I are: J. Bartelt, J. Blazey, T. Copié, H. Courant, D. Feyma, S. Heilig, K. Heller, S. Heppelmann, M. Hirsch, H. Hogenkamp, C. James, T. Joyce, X. Li, S. Malloi, M. Marshak, B. Neace, J. Osen, N. Pearson, E. Peterson, J. Povlis, K. Ruddick, M. Shupe, D. Wahl, and D. Wicks, of the University of Minnesota; and D. Ayres, J. Dawson, T. Fields, D. Jankowski, and E. May of Argonne National Laboratory. This detector is a tracking jonization calorimeter which, as well as being a tool to investigate technique and background, has sufficient resolution and containment to observe nucleon decay if the lifetime is less than 10<sup>31</sup> years. The Soudan J detector has been described in detail elsewhere (Courant et al 1979; Marshak 1980; Shupe 1981) and is shown in figure 1. The mass is supplied by iron loaded concrete (a taconite-concrete mixture) cast in slabs around thin walled steel proportional tubes. Each slab is 32 cm wide, 4 cm high, and 2.9 m long with 8 proportional tubes of 2.7 cm diameter running the length of the slab. The slabs are stacked to make an array 2.9 m  $\times$  2.9 m  $\times$  1.9 m. All of the 3456 proportional tubes are horizontal, with each layer perpendicular to the preceding one. The gas for the proportional tubes is a mixture of 91% Ar and 9% CO<sub>2</sub> which is safe for mine use. This gas is pumped through the entire detector, purified, and recirculated. The detector is covered on the top and sides by plastic scintillation counters as shown in figure 2.

The signals from the proportional tubes are processed by the electronics shown schematically in figure 3. The electronics allows us to determine which tubes a charged particle crossed, the pulse height of each signal, and the time the signal



Figure 1. (a) A section of the Soudan I detector array. Alternate layers of proportional tubes are at right angles so that in odd numbered layers the tubes give East-West position information and in even numbered layers the tubes give North-South position information. (b) The geometry of a single slab of the 432 slabs which make







Figure 3. A functional diagram of the major electronics for Soudan I.

arrived. The same information is also available for each of the scintillation counters. Whenever tubes are hit in 3 out of any 4 contiguous layers within 1  $\mu$  sec and the event contains at least 5 hits, the computer records the event. Each event is essentially a series of snapshots of the detector from 125 nsec before the event to 7  $\mu$  sec after the event in 125 nsec frames. These events are written to disc by our computer. A telephone link to the computer allows us to monitor the detector and sample the data. Full discs are taken to the University of Minnesota for event reconstruction and analysis.

The following sample of events is presented to demonstrate the capabilities of the Soudan I detector. Figure 4 shows a typical event, a muon, from our on-line event display. Pulse heights, represented by numbers at the positions of the hit tubes, have not been corrected for path length through the proportional tubes or amplifier gain variations. The alternate perpendicular layers give the two views of the event which can be used for three dimensional reconstruction. Figure 5 shows the worst type of event for this detector. Because of the spacing between the proportional tubes the detection efficiency is lowest for vertical tracks. Even in such an extreme case however there is no difficulty in recognizing a muon. The observed angular distribution of muons is shown in figure 6 and includes some large angle muons such as figure 7.

				-									
- 47				:.3.		:		:	:			*	
45													
						* * * *		*****				5	
43			7	*		•		• • • • • • •	•			•	• • • • • • • • •
- 41			4.			:		<					
39			*	•		•		•	•				•
		• • • • •				****		*****				********	
37			<b>6</b>	1		:							
-													
33				I				<b>.</b> .				*	
33		••		•		•		•					•
			• • • • •		••••							*******	
31		5. :		1		:				5		<b>:</b>	
20													
						ē,e e e		******					
27	5	•		•		•		•	•				•
=:					••••	** • •			• • • • • •			*******	
25												2	
		-		-									
23				****	• • • •	****							
21						• • • •						•	
14						· · · •		· · . · · · ·				********	••••••••
17				•		÷			. •			• • •	•
					• • • •	• • • •						*******	
15				:		:							
4.7													
13												********	
51								<b>.</b>				•	
- 7						. <b>.</b>			<b>.</b>			*	
7						•		• • • • • • •			,		
-							••••						
				<b></b>		:			<b></b>	1			
		•		•		• .		•	•			•	•
							••••						
- 1				••••		:			:				
48				• • • • •		•		•					
48	• • • • • •			••••	• • • •		••••			:			
48 46				:	• • • •	 	••••		<b>.</b>				
48 46				:	••••								
<b>48</b> 46 44	• • • • • •			:		  	••••		 	••••	· · · · · · · · · ·		
48 46 44 42	•••••			:		   	••••		 	••••			
48 46 44 42	• • • • • •					  	••••			• • • • •		9	
<b>48</b> 46 44 42 40	· · · · · · ·		· · · · · ·		••••	  	••••	  	:	• • • • • • • • • • • • • • • • • • •	· · · · · · · · · · ·	9	<b>.</b>
48 44 44 40 39							••••					9	<b>6</b>
48 44 42 40 39							• • • •		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·			9	<b>6</b>
48 44 42 40 38 36							••••	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·				9	<b>6</b>
48 44 42 40 38 36								· · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·				9	6
48 44 42 40 38 36 36								· · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·				9	9. 4. 
48 44 42 40 38 36 34 32								· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·				9	6. 9. 4.
48 44 42 40 38 36 34 32												9	9. 4.
48 44 42 40 38 36 34 32 30							• • • •					9	6. 9. 4. 3.
48 44 42 39 36 34 32 30 29							• • • •					5	6. 9. 4. 9. 9.
48 44 42 39 36 34 32 30 29													6. 9. 4. 3.
48 44 42 39 34 32 30 29 26												9	6
48 44 42 38 36 34 32 30 28 26												9	6. 
48 44 42 38 36 34 32 20 22 24 24												9	6
48 44 44 39 36 34 30 26 26 22 24 22												9	6. 
48 44 40 38 34 30 26 22 24 20												9	6
48 44 40 38 36 34 30 25 24 20												9	6. 
48 44 40 38 34 30 22 24 20 19												9	6
48 44 42 40 38 34 32 25 24 22 20 14													6. 
48 44 40 36 34 30 26 420 22 420 19 14												9	4. 
48 44 42 08 34 30 22 42 20 16 14													6. 
48 44 44 40 36 37 30 26 42 20 16 47 15 15													6 9
444420 36420 36420 320 224220 16442 1142													6. 9.
444420 36420 26420 26420 144200 144200 14400 1400000000													6
													6. 9. 
444420 36420 36420 264220 164420 164420 164420 164420 164420 164420 164420 164420 164420 164420 164420 164420 164420 164420 164420 1644000 16440000000000													6 9
44442086420986420986420986420886420886420886420886420886420886420886420886420886420886420886420886420886420886													6. 9. 4. 5. 3. 4.
48 444 40 36 42 20 22 42 20 16 4 20 8 4 5 4 20 8 4 5 4 20 8 5 4 20 8 5 5 4 20 8 5 5 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20													6
444420864420224220964420844													4. 

Figure 4. A typical single muon event in the Soudan I detector. The two views represent the alternate layers of the detector array. The numbers represent the uncorrected pulse height of the signals.

A stopping  $\mu^+$  can be recognized by its decay  $\mu \rightarrow ev\bar{v}$  characterized by a lifetime of 2.2  $\mu$ sec. This decay is signalled by a delayed hit near the end of the muon track. Figure 8 shows a time distribution for 25 stopping muons from a subset of the data. The distribution is consistent with the measured muons lifetime and demonstrates our ability to identify muon decays.

Multiple muons have also been observed in the detector. Figure 9 shows a typical two muon event while figure 10 shows a much less frequent 6 muon event. The multiple muon tracks are parallel within the resolution of the detector indicating an atmospheric origin. The frequency of multiple muons passing through the Soudan I detector in 26 days is given in Figure 11.

It is the interactions of muons which we are carefully studying to determine the background for various types of nucleon decay detectors. Figure 12 shows a muon initiated electromagnetic shower while figure 13 is a muon interaction with discrete

45 47 41 . 34 · . . : . . . . . . : . . . . . : : . . . J. 37 33 33 31 27 27 23 23 21 19 17 15 13 11 ....... 7 3 • ā . : . . . . . 6. \*: . . . . . . . Ē 48 ..... :....8........................ 26 24 22 20 18 16 14 12 10 . 4 . . . . . . . . . . . .

Figure 5. A muon track illustrating the weakness of the detector for small angle tracks. The track passes through several layers between tubes in the odd layers giving a missing section of the track. This weakness however causes no difficulty in muon identification and rejection.

charged particle products. These figures also illustrate that muon interactions can give rise to products emerging at large angles to the incident track. Events with large angle secondaries could be a background for water Cerenkov detectors. Another possible background for all detectors can arise from a neutral hadron entering the detector and interacting or, in the case of a kaon, decaying. These neutral hadrons could be generated by muons interacting in the rock. Figure 14 shows a muon clipping the corner of the detector in coincidence with a contained event well separated from the muon track. Figure 15 shows a muon track through the detector in coincidence with an isolated "V". One can calculate the mass of the neutral parent from the range of the charged particles making up the "V" and the opening angle. Assuming both charged particles are pions, the mass of the parent is consistent with that of a kaon. Because our pattern recognition programmes are still **P.S.--10** 





	:			•••	• • •					:		:			t		. :			1			
		•																					
				••											÷		- 7	• • •					
	!						• -			•		•											
										••••		•••	••••		***		••	• • •			•••		
				•••	• • •					:		:			<u>.</u>		- :						
																			•••				
				••	• • •					· • •		1 A F	* * * *										
	!			<b>.</b> .			• .			•		•			•							-	
			• • • •	•••	•••		•••		••••			• • •	• • • •	••••	***		• •	• • •			• • •		
				2			:			2		:			* · · ·		- :					•	
							-			-									•••		•••		
				÷ • ·	• • •		÷.,								ī		.:				• • •		
	!			•			۰.			• • •					•								
					•••	•••	•••			•••	••••	•••	•••••				••	• • •	• • •	• •	• • •		
				•••			:.			:		:			t		. :						
		,																					
				••	• • •		••			•••	• • • •				· · · ·					• •			
	!			1			•			•		•	202		•		•						
					•••	••••	•••	•••		•••	••••	•••		•••	****		•••	•••	• • •	•••	• • •		
	1			÷			:.			:	C	7. :			2		. :						
							•			•											•		••
				••	• • •		ē *								ā								
	1			:			1.	88.		1					•						-	- 1	
				-	- •									* • •			•••		• • •	•••	•••		••
				÷ • •	• • •	<b>n</b>	Ξ.			Ξ					÷		. : .						
	•			n.			•			•		•			•								
					•••		• •	•••	•••	•••	• • • •	••	• • • •	•••	• • • •		• • •			• •			••
	1			:	• • -		:			<b>:.</b> .					:					. •			
																		•••	•••		• • •		••
				<b>é e</b> 1	• • •		÷ •										. : .						
				• .			• .			•					•								
					•••	•••	•••	•••		•••	••••	•••		•••	****						• • •		••
							:			:					:		- 1.						
		•		•						•									•••				••
	•••		• • •	•••	• • •	• • •	••	• • •	• • •	• • •		• •			· • • •								••
				:			:			1					•					-			-
				-			-							•••		• • •	• • •		•••	•••	•••		••
										-					•								
										•••							- ī ·						~ ~
					•••	•••	•••	•••	•••	•••				•••			• • •	•••	• • •		•••	• • •	••
						•••	•••	•••	•••	•••				•••			• • •	•••	•••	.:	•••	•••	••
	:			:				•••						•••	••••		• • •	• • • •	• • •		•••	•••	••
••••	•••	••••	•••	:	•••	••••	:.	•••	••••	:	••••	• •					•••	••••	• • •	- : .	•••	•••	••
••••			•••	:	•••	•••• •••	:.	 		: :		. : .		· · · ·	:		• • •	• • • •	• • •		•••	•••	••
••••				:		•••• •••	:.	••••		:	••••	. : .		· · · ·	:	•••	• • •	• • • •	•••		•••	•••	···
•••••			••••	:	•••	· · · ·	:. :. :.	  	· · · ·			. : .		  	:		• • • •		•••		•••	• • • • • • • • •	···
•••••			•••	:			· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · ·	••••					· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	:	••••			•••		•••	•••	 
•••••			•••			· · · ·		  	••••				••••	  	:	•••					•••	•••	  
•••••					•••	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	: : :	   	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·					   	:		• • •				•••	• • • • • • • • • • • •	
•••••					•••			· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	••••						:		• • • •				•••	•••	•••
					•••	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·					    	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·						••••	• • • • • • • • • • • • • • • •	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
					• • •	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	••••					· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·								•••	•••
						· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·					· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·								• • • • • • • • • • • • • • • •	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
						· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·						· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·								• • • • • • • • • • • • • • • •	··· ··· ···
						· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·					· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·								• • • • • • • • • • • • • • • •	··· ··· ···
								· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·						· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·								• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	··· ··· ···
								· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·														· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
																							· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
																							· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
		6																					· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
		6																					
		6			· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·																		
		6-			· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·																		
		<b>6-</b>							6 <b>3</b> ,														
		6-			· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·				с														
		6			47				63.														
		6																					
		<b>6-</b>													· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·			647					
		6			· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·										· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·			647					
		6																647					
		6																647				553	
		6".							65.									647				553	
		6-																647				533	
		6"																647				533	
		6-			49													647				533	
		6"							63.									647					
			5.						88. 9>				69. 69. 69. 68. 7. 68. 7. 69.	69. 	BB. C? BB. C? BB. C? BB. C?	69 88 7 88 5	69 88 92 5	C? C? C? C? C? C? C? C? C? C?	69    88    7>    3	69 88 7 88 7 88	69. 88. 72. 88. 5. 69. 88. 69. 88. 69. 88. 72. 88. 73. 88. 74. 75. 75. 75. 75. 75. 75. 75. 75	69 88 92 5	69. 80. 69. 80. 69. 80. 70. 80. 80. 80. 80. 80. 80. 80. 8

Figure 7. A typical large angle muon track through Soudan I. The polar angle of this event is 80 degrees.



Figure 8. Number of stopping muons with a delayed hit near the end of the track versus the delay time of that hit. The distribution is characteristic of the muon lifetime.

-						
47						· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
46	. 7 4				•	
40						***************
43				********		
						**************
39	. • R F	•		********		********
37	I.					****************
25		•	•		•	
55						
33			:			* *
31	N <b>4</b> ,				<del>.</del> . <b></b> .	<b></b> .
29		•				********
27					<del>.</del> . <u>.</u>	
25	2		•	• •	•	• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •
						****************
23	<b>* A</b> . 3		:			· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
			•			
~1						
19	B.F.		:	*******		* *
17			<b></b>			· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
	•	•	•	• •	•	• •
13			:		. <b>.</b> . <i></i> <b>.</b>	* *
		•				
41					<i></i>	**************
•	• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •				<b></b>	<b>**</b>
-						
7						· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
	· • • • •			• • .	•	• •
-						
3	D:F					
	-	•	•	• •	•	
						· · ·
	_				_	
48			:	:1		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
48				:1		
48 46				: 1	<b>.</b>	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
48 46 44				: 1	<b>.</b>	·····
48 46 44				: 1		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
48 46 44 42		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		: 1		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
48 46 44 42 40				: 1		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
48 46 44 42 40		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		: 1		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
48 46 44 42 40 38				: 1		
48 44 42 40 38		3		: 1	6	
48 46 44 42 40 38 36	. 62 			: 1	6	
48 46 44 40 36 36 34	. 62. 	. 1		: 1	б́.	
48 44 42 40 36 36 34 32	. 62	1. 		: 1	6	
48 44 42 40 36 36 32	. 62. 			: 1	6	
48 44 42 40 38 34 32 30	. 62			: 1	6	
48 44 42 40 38 36 34 32 30 28	. 62. 			: 1	6	
48 44 42 38 34 30 34 30 20		1. 3. 		: 1	6	
48 44 42 38 34 30 28 28 28	. 62			: 1	6	
48 44 42 38 34 30 28 20 28 24		. I. 		: 1	6	
48 44 42 38 34 30 28 25 24	. 62	.1. .3. .F. .4. 			6	
48 44 42 38 34 30 30 20 22 22 22 22 22 22 22 22				: 1	6	
48 44 42 38 34 30 28 24 20 28 24 20	. 62			: 1	6	
48 44 40 36 30 30 20 20 20 20 20 20 20 20 20		3. 		: 1	6	
48 44 420 36 32 20 8 24 20 8	. 62			: 1	6	
48 44 40 36 30 30 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20		1. 			6	
48 44 420 36 32 30 84 20 80 80 80 80 80 80 80 80 80 80 80 80 80	. 62	I	3.	: 1	6	
48 44 420 36 32 30 8 4 20 8 4 4 20 8 4 4	. 62	1. 	3.		6	
48 44 42 08 34 20 84 42 08 42 20 84 20 84 20 84 14	. 62	1. 3. 4. 3. 3. 3. 3. 3. 3. 3. 3. 3. 3. 3. 3. 3.		: 1	6	
48 44 44 33 34 30 84 42 30 84 42 20 84 42 20 84 42 20 84 42 20 84 42 20 84 42 20 84 42 20 84 42 20 84 42 20 84 42 20 84 42 20 84 42 20 84 42 20 84 42 20 84 42 20 84 20 80 80 80 80 80 80 80 80 80 80 80 80 80	. 62 	1. 			6	
48 44 44 09 04 02 08 44 20 84 42 08 44 20 84 42 20 84 42 20 84 42 20 84 42 20 84 42 20 84 42 20 84 42 20 84 42 20 84 42 20 84 42 20 84 42 20 84 42 20 84 42 20 84 20 80 80 80 80 80 80 80 80 80 80 80 80 80		1. 3. 			6	
48444208642088642208844208642208844208642088642088642088642088642208844208864420886442088644208864420	. 62		· 3. · 4. · 3.		6	
48444208642088642208644208 3333328642208644208		1. 3. - F. 4. 	3		6. 	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
48444208642088642208844208	. 62		- 3. - 2. - 3. - 2.		6	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
484442086420886420886442086442086420886420886420886420886442088644208864420886442088644420886		I	3		6	
44442086420886420864420864	. 62	1. 3. 4. 3. 3. 3. 3. 3. 3. 3. 3. 3. 3. 3. 3. 3.	3. 		6	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
444420844208442084420844120844		1. 	3		6	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
4844420864200826422018442108442	. 62	1. 3. 4. 3. 3. 3. 3.	3. 		6	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·

Figure 9. A typical two muon event in Soudan I.

1. J. . . . 1. 6A. . . . 13. . 5. з .3..... ï ...: 6. 33. . \*\*\*\*\*\*\*\*\*\*\* · · · · · **:** · · · · · · · **: 4**. . . . . **.** . **. . . . . . . . . .** 22 3. . . . . . . . .... . 3. •. **4**• • **\*** • • • • • • • **\*** • . . . . . . . 5. ŝ

Figure 10. A six muon event in Soudan I. Three of the muon tracks appear close together in the view shown by the even numbered layers but are well separated in the perpendicular odd layer view.

in a primitive state for complicated events we cannot, at this time, quote rates for these processes.

Finally, we have not detected any contained event originating from a 10-ton fiducial mass in the centre of the detector. This gives a lower limit on the nucleon lifetime of  $2 \times 10^{29}$  years at a 90% confidence level for nucleon decays into two or more particles resulting in charged products from our first 26 days of running. As our pattern recognition programmes improve we expect to increase the fiducial mass of the detector by about a factor of two.

We have also not detected any slow, penetrating, ionizing particles with velocities  $10^{-4} < \beta < 10^{-2}$ . This puts a limit on the flux of such particles, presumably monopoles, of  $< 1.8 \times 10^{-3}/\text{m}^2$  Sr d at the 90% confidence level compared to the published limit of  $< 3 \times 10^{-2}/\text{m}^2$  Sr d Ullman (1981). The published limit was also achieved using proportional counters and presents arguments as to why scintillation counters may not be efficient monopole detectors.

K Heller et al



Figure 11. The number of multiple track muon events seen in Soudan I in 26 days. The number in parentheses by each point is the relative frequency. Note the broken scale.

### 4. Test beam

Modules of the Soudan I detector were exposed to both a positive and a negative test beam at Argonne National Laboratory. The beam momentum was varied from 100-400 MeV/c and the particles were identified by time of flight. Figure 16 is a typical time of flight spectrum for the 250 MeV/c negative beam. Figure 17 gives the measured energy resolution of the Soudan I detector for electrons and muons. The energy of the electrons was determined by the number of proportional tubes hit while muon energy was determined by range. Electrons are easily distinguishable from other particles by their electromagnetic shower. Our analysis of these exposures is continuing.

						•										•								•						
47		: .						:							. ÷		84				(									
																				•••			•••				••	•••		•
					•••	• •	• • •			••			••		• •			• • 1			. 7,									•
- 43		1.						:				. : .			. *				•		6.	4.				•				-
							•••			• •				• • •			•••	•••		•••			•••	•••			••	• • •		•
			4		÷.	۰.۰			۰.	• •					• 1			•• •			1							• • •		• **
39					2.			1							. :			!		_ J						•				
						•••				•••	• • •				•••	• =•	••	•••			•••		••	•••	• •		• •	•••	•••	•
37					Ξ.	••				••					• 7			••		۰.		۰.			•		• •		• • •	
35								•	• • •			. : .			. •	9	ε.		. 58	<b>.</b>		٠								
										•••					•••			• :_			•••	•••	•••	•••	• •	• • •	• • •	•••	• • •	•
ل ک					· • •	é .								• • •	. :			. Q	; ^#	IJ.,		::.				. ::	• •			
31					• .					÷.,					. •							•				٠				
		••••				•••	•••			•••			•••	• • •	•••	•••	••		• • •	• • •	•••			••	• •	• • •		• • •		•
- 24					:.				ε.	• •					• •			7I:	: • •	i, ė.		. : .		•••				• • •		
27		· •						•		<i>.</i>		. • .			. •			78		Ε.										
						•••					•••			•••	••	• •••	· -		_		•••		••	•••	• •		• •	•••	•••	•
23									۰.	۰.					• •		.7	<b>H</b> #:	57.				• •				• •			•
23					±			:							. •		7-	<b>N#</b> 1	マフド	h		• .		. •		•				
							•••							• • •	•••	•••	1.	×			•••		•••		• •	•••	••	•••	•••	•
21					:.	• •			••	• •					.:		66	#F	F. 2						• •	. : .				
19								•							. ÷			CN		2.						•				
					•••	• •	• • •	••••	•••	••	• • •		• •	•••	••	• • • •	·	<b>G</b> D	<b>.</b>		•••		•••	••	• •	• • •	• •	• • •	•••	•
17		: .						:	• •				• • •		.:	. 33	IC7		7	. 5.					• •	. : .				
15.								•			•	•				A.U										1				
	*****				••	••	•••		••	••	•••	• • •	•••	•••						• • •	• • •		• •		• •	• • •	•.•	••	•••	•
- 13					:.	••		:		• •						387	44	•••		•••		:.	• •	• •		. : .				
					•							•			•	05		2.								•				
					••	••	•••	•••	•••	•••	• • •		•••	• • •	• •	••.	••		•••	••	• • •	•••	••	•••	• •	• • •	••	••	•••	•
- 7		: .			:	• •	•••	:		• •					.:		••	!						• •	• •	. : .				
7		•										•			٠.		,					•	•							-
		• • • •			••	••	•••	•••	•••	•••	• • •		•••	•••	• :	•••	••	•••	•••	•••	• • •	•••	•••	• •	• •	• • •	• • •	•••	•••	•
- 5					:	• • •		:	• •				••		.3			!		• • •		: <b>:</b> .			• •					
			•		•			٠.				٠.				•						•								•
			•••	•••	•••	• •	•••	•••	•••	••		•••	•••	•••	•••	• • •	••	• • •	• • •	•••	• • •			••	• •	• • •	••	• • •	• • •	•
1					•••	••	• • •	7	••						• •	• • •	• •	•••				::.					• •			
																									-					
		_																												
48	• • • • •	:.		C7.	:	•••		:	••	••		. : .	•••		. : .		••	:				:.	••	•••	•			•••		
48 46	• • • • •		•••	C7.	:	••	•••	:	•••	••	•••	:.	•••	•••	. :	•••	••	•••		•••	•••	:.	••	••	•••		••	•••	•••	•
48 46	•••••			C7.	: 3.	•••	•••		••	•••	•••	. : .	•••		. :	•••	••	•••	•••	•••	•••	:.	•••	•••	•••		•••	•••	•••	•
48 46 44	••••			C7.	: 3. :	•••	•••		•••	•••	•••		•••		. 1. . 1 . 1	•••	••	•••	•••	•••	•••	:.	••	•••	•••		•••	•••	•••	•
48 46 44 42	••••			C7.	3. 3.	•••			•••	•••	•••		•••		. :	•••	•••	•••	•••	•••	•••	:.	•••	•••	•••		•••	•••		•
48 46 44 42	• • • • • •			C7.	3.	• •		•••	•••	•••	•••		• • •		. : . : . : . :	• • •	•••	•••	•••	••••	••••	:. :. :.	•••	•••	•••			•••		• • •
48 46 44 42 40				C7.	3.	•••		 	• •	•••	•••		•••		• • • •	•••	•••	87	• •	••••	• • •	:. :. :. :.	•••	•••	•••			• • •		• • •
48 46 44 42 40 38				C7.	3.	•		 		•••	•••		•		. :	• • •	•••	87	• •	• • •		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	•••	•••	•••			• • •		• • •
48 46 44 40 38				C7.	3.			• • •	• •	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	•••		• • •		• • •	• • •	• •	  87: 6.	• •	• • • •		•••••••••••••••••••••••••••••••••••••••	•••	•••	•••			• • •		• • • •
48 44 42 40 38 36				C7.	3.	•••			•••	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·			• • •				• • • • • • • • • • • • • • • • • • •	87: 6.		· · · ·			•••	•••	•••			• • •		• • • • • •
48 44 42 40 38 36 34				C7.	3.			•	• •	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	. D.		•				• • • •	87:					•••	•••	•••					• • • • • •
48 44 42 38 36 36 37				C7.	3.					· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	. D.	1.	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·				• • • •	87 6,					•••	•••						•
48 44 42 38 36 36 32 32				C7.	3.					· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	. D.	1.	· · · ·	C	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		• • • • • • • • • • • • • • • • • • •	87:					•••	•••••••••••••••••••••••••••••••••••••••						• • • • • • • •
48 44 42 38 38 34 32 30				C7.	3.					· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	. D.	1. 	- 4. - 4. - 4. - 4.	C	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		• • • • • • • • • • • • • • • • • • •	87					•••	••••						• • • • • • • •
48 44 42 38 36 36 32 30				<b>C7</b> .	3.					· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	. D.	1. 	- 4. - 4. - 4. - 4.	5.958	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		<b>9</b> .	87					• • • • • • • • • • • • • • • • • •	•••						• • • • • • • • • •
48 44 42 38 34 32 30 28				C7.							. D.	1. No(		C	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		<b>9</b> .	87					•••	•••••••••••••••••••••••••••••••••••••••						
48 44 42 36 36 32 30 32 32 32 32 32 32 32 32 32 32 32 32 32				<b>C7</b> .							. D.		- 4 - 4 - 4 - 4	59 959 959 959 959	······································		<b>9</b> .	87:					•••	•••						• • • • • • • • • •
48 44 42 38 36 32 30 28 20				<b>C7</b> .							. D.			59 59 59 59 59 59 59 59 59 59 59 59 59 5	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	······································	9. 	87:					•••	••••••						
48 44 42 36 36 36 30 28 26 24				<b>C7</b> .						· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	. D.		- 4 - 4 - 4 - 4 - 4 - 4 - 4 - 4 - 4 - 4	5. 5. 5. 5. 5. 5. 5. 5. 5. 5. 5. 5. 5. 5	······································	7 37	9. 3.	87:		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·				••••••						
48 44 42 36 36 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30 30				<b>C7</b> .						· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	. D.	Ne4	• • •	5. 559 595 81 361	······································		9. 3. 9.	87: 6, : 5, : 105:						•••••						
48444408 3644208 364208 22222222222222222222222222222222222				<b>C7</b> .						· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	. D.	1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1. 1	- 4, - 4, 	559 859 81 81 81			9. 3. 20.	97 6. 5.			D.			•••••••••••						
48 44 42 38 36 32 30 328 24 22 20				<b>C7</b> .						· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	. D.	1. 	• • • • • • • • • • • • • • • • • • •	559 559 559 54 559 559 559 559 559 559 5			9. 30. 20. 5	87 6. 5. 1 0E1 951		A.										
48 44 42 36 36 30 30 26 22 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20				<b>C7</b> .							. D.		• • •	559 559 559 540 50 50	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		9. 30. 50.	87: 6. 5. 1 DE1 951	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	A										* * * * * * * * * * * * * * *
48 44 40 36 30 30 30 22 22 20 8				<b>C7</b> .							. D.			C			9. 30. 59.	87: 6. 5. 1051 951		A										
484444086442086442086422086				<b>C7</b> .							. D.			C B5B 3+C 361			9. 9. 9.	87: 6. 5. 1 DE1 951		A	D									
48 44 40 36 30 30 30 24 20 86 4 20 86 4 11				<b>C7</b> .						· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	. D.		· • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	559 3+C 351 3-			9. 30. 59	87: 6. 5. 1 931		A 	D									
48 44 44 33 34 30 32 24 20 86 40 164 11				C7.							. D.		· • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	530 530 530 530 530 530 530 530 530 530	······································		9. 9. 9. 9.	87: 6. 5. 1 DE1 951	95 87 87	A				•••••••••••••••						
48 44 42 36 37 30 32 24 20 86 42 20 86 20 80 80 80 20 80 80 20 80 80 80 80 80 80 80 80 80 80 80 80 80				<b>C7</b> .						· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·			· • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	5361 551 551 551 551 551 551 551 551 551 5			9. 9. 9.	87: 6. 5. 1 951		A	D			• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •						
484442086420864208642086420 111110				C7.							. D.			53+C			9. 30. 20.	87: 6.: 5.: 1 951	95 7F	A 										
4844420 33420 33222220 164420 11110				<b>C7</b> .										C		73	9. 30. 5	87 6. 5. 1 DE1 951	195 197 197	A				· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·						* * * * * * * * * * * * * * * * *
48 44 44 33 34 30 32 24 20 8 44 120 8				<b>C7</b> .						· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·			4. 4. 3861	C 859 841 361			9. 30. 20. 5	87 6. 5. 1 0 5.	(95 37F	A	D									
44442086420864420864420864208644208642086				<b>C7</b> .									· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	53953 361 361			9. 30. 20. 5	87 6, 3, 1 951	(95) (95)	A.										
48 44 44 38 34 42 30 28 24 20 18 14 120 8 6				<b>C7</b> .										C959 8#C		3	9. 30. 20.	87: 6. 5. 1051 951		A	D									
48 44 42 30 30 28 24 20 18 14 12 0 8 4				<b>C7</b> .							. D.			5.53 5.53 5.53 5.53 5.53 5.53 5.53 5.53		3.3.7EN	9.	87: 6.: 5.:1 95: 	1976 	A	D									* * * * * * * * * * * * * * * * * * * *

Figure 12. A typical electromagnetic shower induced by a muon in Soudan I. Note the charged track visible in the even view coming from the centre of the shower. This track is at a large angle to the muon track.

47	A	* · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		
			· · · · · · · ·	
-3	••••••	*******	****************	
43		********	<b>.</b>	
-41 -				
20	. 6			
37	•••••••••••••	*******	***************************************	
37		*******		
35		:7		
33		; н		
2.	************		<i></i>	
31				••••
27	• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	********		
Ż7			. 3	
26				
20		*******	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	
23		*	Yi	
21		<b>:</b>		
10	•	•	6 6 6 R	
				•••••
17	*********	••••••		
15		:		
13			F 5. A345 2	
				• • • • •
- 9				
7	• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •			
		•••••••		• • • • •
Э		:		
1		******		
-			•••••••••••••••••••••••••••••••••••••••	
40				
48		: <i>.</i>		
48 46		:		••••
48 46 44	••••••	:		••••
48 46 44	••••••	:		••••
48 46 44 42	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	:	4	
48 46 44 42 40	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	:	4	••••
48 46 44 42 40 38	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		4	••••
48 46 44 42 40 38	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		4	• • • •
48 46 42 40 38 36	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		4	
48 46 42 40 38 36 34	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		4. D. 	
48 46 42 40 38 34 32	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		4	
48 44 42 38 36 32 32 32	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		4. D. 	
48 46 42 40 38 36 32 30			4	
48 44 42 38 34 32 30 28			4	
48 44 40 38 36 32 30 28 26			4	
48 44 40 38 34 30 32 30 28 26 26			4	
48 44 40 35 42 35 30 35 40 35 40 35 40 35 40 35 40 35 40 35 40 35 40 35 40 35 40 35 40 35 40 35 40 35 35 35 35 35 35 35 35 35 35 35 35 35			4 D 	
4864420 864420 86420 86642 86642 86642			4	
4444208542085420 232222222222222222222222222222222222			4	
486420864208864208			4	
486420864208642084			4	
444420864208642086 3333222286 1			4	
4844208642086420864208642086420864208642			4.    D.    9.    9.    1.    1.    2.    3.    4.    3.    4.    5.    5.    5.    5.    6.    7.    8.    9.	
4844208642086420864208642086420864208642			4. 	
444420864208642086420			4	
4444208642086420864208644208	48.		4. 	
48444208644208644208 3333222228844208		5.	4	
484420864208642086420864208642086			4 	
444420864208642086420864		5.	4	
4444208642086420864208642086420864208642		5	4 	

Figure 13. Discrete charged particle tracks originating from a muon interaction in Soudan I. Tracks at large angles to the muon direction are visible in both views.

47	-				<b>.</b> .	_	· ·
76	***********		• • • • • • • •	· · · <b>· · · ·</b> · · ·	* * * * 7, * 5		
45	••••	********					
43		:		1	E :		
41	• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	•	•	•	. 7 .	••••••	•
				•••••		********	• • • • • • • • • • • • • • • • •
37		•••••		• • • • • • • •	••••••		
37		:		<b> 1</b>			
35		***** ***					
33	• • • •		•				•
5.							
31	•••••••	••••••••		• • • • • • • •	• • • • • • • •		• • • • • • <sup>•</sup> • • • • • • • • •
29		? <b>. :</b>					
27		* *					
58			••••••	••••••	••••••		
~ ~		********		• • • • • • • • •	*******	*******	
23	•••••	•••••	: <b>&gt;</b> :				
21		:					
19	• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •						
14					•••••		•••••••••••••
*/	************	•••••	3		• • • • • • • • •		
15	·····	:		. A. b :			
13		<b>:</b> . <b>:</b>		3 :	:		
11	•	•		CEG> .	•	•	• •
**	***********	•••••			•••••••		
		<b></b> .	*******	<b>0</b>	• • • • • • • •		
7		: . <b></b> :		8 5:			<b>. </b> .
5		* *		3 :			
				. 400		••••••	• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •
			· · · · ·		*******		
1	••••• <b>•••</b> ••••			. 41 1			
48				:			
48	9:	:			•••••		•••••
48 46		:		<b>.</b> <b>.</b>	•••••		
48 46 44		: : :					· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
48 46 44 42		: : : : : : : :		·			· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
48 46 44 42 40		:				· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
48 46 44 40 20		:				· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	
48 46 44 40 38	9: 9: A. H.					· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	
48 46 44 40 38 36							
48 46 44 40 38 36 34							
48 46 44 40 38 36 34 32							
48 46 44 40 38 36 36 32							
48 46 44 40 38 36 36 32 30							
48 46 44 40 38 36 32 30 28							
48 46 42 36 36 30 28 20 28 26							
48 44 420 36 420 36 420 36 420 36 420 36 420 36 420 36 420 36 420 36 420 36 420 36 420 36 420 36 420 36 420 36 44 420 36 44 420 36 44 36 44 20 36 44 36 44 36 420 36 44 36 36 420 36 44 36 36 420 36 44 36 36 420 36 44 36 36 420 36 420 36 420 36 36 420 36 420 36 420 36 420 36 36 420 36 36 36 420 36 420 36 420 36 36 36 36 36 36 36 36 36 36 36 36 36							
4664208642086420864208642086420864208642							
48 44 40 36 30 30 22 22 22 22 22							
48 44 420 36 420 36 420 30 86 420 30 86 420 30 86 420 30 86 420 30 86 420 30 86 420 30 86 420 30 86 420 30 86 420 30 86 420 30 86 420 30 86 420 30 86 40 30 90 80 30 90 80 30 90 80 90 80 90 80 90 90 90 90 90 90 90 90 90 90 90 90 90							
444420864208644208							
4664420 366420 366420 2086420 16							
4864420864208642086420864							
444420864208642086420864	+ + + + + 						
4844420 336422222 116442 112							
49 44 40 33 30 22 40 20 22 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12							
48 44 420 33 33 22 4 420 33 33 22 4 220 16 4 120 8							
4844420 334420 3324420 11420 11420 84							
444420 33333 22222 116420 1120864							
4444208642086420864208642086420864208642		,					

Figure 14. A contained event in Soudan I in coincidence with a muon track clipping the corner from layers 49 to 38.

164

. . .

							-					-										-					-								•	•			. '			
- E -	•	• •	• •	٠	٠	• •	÷.	٠	• =	• •		Ψ.	•		•	••	:.	• •	• •	••	•	••	••	• •	••	•			• • •	• • •	•••	• •	10	83	30	<b>D</b> .	• •	•	•	• • •	••	• • •
43	1	• •	• •	•		••	:.	•	.7	Γ.,		:,			•	• •	۰.	•		• •	• • '	:.		•		• 1	:			• • 1	:		• •	. : .		••						
43		• •					:.			• •		٤.			• •		:.			Ą.	:	:.				. :	<b>:</b>			:	:	••		. : .		• •		1		• • •		• • •
41					•	•••						•					•			4	•						•	•						•						10		
-		•	•••	•	•	••			• •	• •	••	: •		•••	•	••	:'	•	•••		•	. '	•••		•••	• •				•••		•••	•••		••	•••	•••				••	•••
47		• •	• •	•	•	••	••	•	• •	• •	• •	•••	• • •	• •	•	• •	••	•	• •	••	• •	••	• •	•	••	• •	•••	• • •	• • •	• • •	•••	••	<b>ه</b> ه.	7:	:•	• •	••	• •	••	••	••	•••
37		• •	• •		•	••	:.		• •	• •	• •	۰.	• • •		•	••	:.	•	• •	• •	• • 1	:.	• •	•	• •	• 1	•••	• •		• • 1	•••	••	• •	. : .	• •	••	• •		•••	• •	••	• • •
35		• •		•	•	• •	:.	•	••	• •		:.				• •	:.,	•		• •	• • 1	:.		•	• •	•	:			:	:	••	1.	. : .	••	• •	••	?	:.	• •	••	
33							÷.					:.	'								:	:.				. :	• • •			!	:	. 4		. :		• •		!	= -		• •	
51						•••			••	• •				• •			:-	•				•																			•••	
		• •	• •	•	•	• •		•	••	• •	••	: •	• • •	• •	• •	•.•.		•	••		•	:•	• •	•	•••	• :	•••	•••	•••	•			•••	• • •	••	• •	••			••	• •	•••
47	. 1	• .	• •	۰.	•	• •	-	•	• •	• 1	••	Ξ.	•	• •	• •	••	•••	• 1	••	• •	••	÷ •	••	•	••	•		•••	•••	••			••	• •	••	• •	• •	•	•	••	••	•••
27					••	• •	:,	•		• •		:.			•	••	:.		• •	• •	ا يە د	:.	• •	•	• •	4	2	• • •		:	: U.	• •	••	. :	••	• •		:	:	••	••	• • •
25					-		:.					:.	. 4				:.			• 1		:.			• •	- 1	:	•••		1	2	••		. : .	• •			!	:.	••	• •	
23		•		٠.	_		•	-				•			÷.		•.	÷.				• .				. !	:			. 7:						. :			• -			
51					•	••		•	•••		•••			••	•			•					• •		••	1						•••	•		•••					•••	•••	
	•	• •	1	1	•	••	••	•	••	• •	• •	•	1	•••	•	••	11	•		••	•	••	••	•	•••	• :	•••	•••			•••	•••	••	• •	••	•••	••	• • •	••	• •	••	
17		• •	. 8	۶.	• •	• •	:.	•	• •	• •	• •	٠.	. 7	••	•	••	:7	· • •	••	• •	•	÷.	• •	•	• •	• •	·	•••		• • •	••	- 1	••	• •	••	••	••	••	••	••	• •	
17						• •	:.		••	• •	• •	:.			•	• •	:.	•	• •	• •	'	:.		•	••	•	:	•••	<b>4.</b> .	1	:		••	.:			• •	:	:.	•••	••	
15		1		5.			:.					:.					:.			• •	:	:.			• •		:	. 5,		:	:			. :		• •	• •	:	:.	• • •		
13							•		• •			•					•	Ξ.		÷.,		• .				È.	• .				•		2.2						• .			
	- 2		•••	•	1	•••	: •	•	••	•••			•	•••		•••		•		•••			•••		•••								•••	• •	••						•••	
			• •	٠		1		•	• •	• •	••	•••		••		••		• 3		•••	••	••	••	•	•••	• :		•••	•••	••	. • •	•••	••	• • •		••	• •	•••	•••	••	••	• • •
-	1	2	••	٠	٠	14	•	•	••	• •	• •	÷ •	• •	• 1	• •	••	٠,	• •	• •	• •	•	••	••	•	••	- 1	•••	•••	• • •	••	•••	••	••			÷ •	••	•	•	• •	••	• • •
7		З,			•	• •	:.	•	••		• •	:,	•	• •	•	••	:.	•		• •	• • 1	:.	• •		••	5	:	• • •	• • •	1	:	••	••	. :,			• •	:	:		•••	
- 5 -					•	•••	:.	4		• •		:.	•	• •	•	• •	٤.			• •	• •	:		•		. :	:	• • •		:	:		• •	. :			•••	1	:	• • •		
3							:	-				:.					:.					:.			• •	. :	:			:				. •				!				
Ť	-							•				•					•					•											•••									
-			•••	•	•	•••	••	•	• •	• •			•	••	• •	••	••	• •				••	•••		•••	•	•••		•••	•••	•••	•••	••	• • •	••	••	•••	•••	••		• •	• • •
							- 4													•											_			-								
		•	• •	٠	• :	••		•. •	ο.	• :	•	÷.		• •		• •	•••	• '	• •	••	•	••	• •	•	• •	• 3	•••	•••	• • •	•••	•••	••	••	• •		••	• •		•	• • •	• • •	• • •
40		• •		٠	• 1	25	5.	<b>)</b> . (	э.	• •	• •	:.	•••	• •	• •	• •	:.	••	• •	• •	• • •		• •	• •	• •	• 1	•••	•••		••	:		• •	. : .	. • •	••	••	:			• •	
44				•			÷.	•	••		• •	ŧ.	•			• •	:.	• •	• •	••	•	:.		•	• •	• •	:	• •	•••	•	:	••	• •	. :	÷.,	••	• •	• 1			•••	• • •
42							٠.			2.		:.					<u>.</u>			÷.,		• .				. :	•				•			•	· .							
40				•		•••	:-	•				1														1										• •						
	•	• •	•	٠	• •	•••	: •	•	• •	•••	•	: •	•••		• •	••	:•	• •	•••	•••	•	:•	• •	•	•••	• :			•••	•••		•••	•••	•••		••	•••	•			•••	•••
30	•	• •	• •	٠	• •	••	••	•	• •	• •	•	••	•••		• •	••	••	• •	•••	•••	• • •	••	•••	•	••		•••	•••	•••	• • •	•••	•••	• • •			• •	••	•		• • •		• • •
36	•	• •	•	٠	• •	• •	:.	•	. Þ	• •	•	:.	• •	• •	• •	• •	:.	• •	••	••	•	:.	••	• •	• •	• •		• •		•••	•••	••	• • •	. : .		• •	• •	• •				
34				•	۰.	• •	:.	•	. 8		•	:.	• •	• •	• •	• •	:.	• •	• •	• •	•	:.	••	• •	• •	. :	:	• •	• •	- 1	:			. : .			• •	. :	•••			
32							:.		. 2	Э.		:.	• •		• •		:.				. :	:.		• •		. :	:	• •	• •	:		• •		. : .			• •	. :	· .			
30	1	κ.	1	•								•										• .					•							-								
50		-		•	•	•	. •	•	• •	• •		. •	• •		• •	••	: •	• •		•••			•••	• •		• :		•••	•••	•		••	• • •			•.•	••	• :				•••
20	1		•	•	• •	• •	<b>é</b> •	•	• •	: :		:•	• •	• •	• •	•	<b>.</b> .	• •	• •	• •	•	••	• •	• •	• •	• •	•••	•••	••	•	•••	••	•••	• • •	•••	• •	••	• •	•••	• • •	•••	• • •
20	•	ь.	•	٠	• •	••	•••	•	• •	•••	•	••	• •	• •	• •	••	:.	• •	•	• •	•	•••	٠•	• •	• •	•	•••	••	• •	•	•••	••	• • •	. : .	•••	• • •	• •	- :				
24			E		• •	• •	:.	•		5.	•	:.	• •	• •	• •	• •	:.	• •	•	• •	•	:.	• •	• •	• •	4:	:	••		. :	:	• •	• • •	. : .		• • •	• •	. :	:			
22							:.			6.	•	:.	• •				:.		• •		:	:.	. 1	2		. 3		•••		:	:	• •	• • •	. : .				. :				
20			2	-			• .			3.		:.					•.				•••	• -	Ċ.											•								
10				•	• •	••	: `	•	• •.						• •	•••	: `	• •		•••		5			•••	• •						•••	•••			••	••	• :	•			
	•	• •	•	•	• •	••	••	•	• •	•	• •	•••	•••	••	• •	••	••	• •	•				• •	• •	•••	• •	•••	••	•••	• •	• •	••	• • •		•••		••	• •	• •	• • •		
10	1		• •	•	• •	••	:.	٠	• •	• •	• •	÷.	• •	• •	• •	• •		• •	•	• •		••	••	• •	••	• •	•••	••	• •	•••	•••	••	• • •	. : .		• • •	۰.	• •		• • •	• • •	
14	-	>.	• •,	•	• 1	8.	:.	•		Ô.	•	:.	• •	• •	• •	• •	٤.	• •	•	••	•	:.	••	۰.	• •	- :	:	••	••	•••		••	• • •	, <b>"</b> ,		• • •	• •	.:		•••		
12				•	• •		:.	•	• •	• •	• •	:.	•		• •		:.			• •	• 1	Ь.		• •	• •	. :	:			. :	:	••	• • •	. : .		• • •	• •	. :				
10	,				• •		:.			1.		:.			• • •		:.				•	:.				. :	:															
8				-			1	_				•								• -		Ľ.		2																		
Ā		•		•	- 1			•	•••		-		• •			•	: •				-		••		••	-		••	•••	•		••	• • •		•••	•••	•••	• •	• •	••		
	•	•	•	•	• •	••	:•	•	• •	•••		••	••	• •	• •	••	••	• •	•	• •	•	•	••	•••	• •		• •	••	••	• •	• •	••	• • •		••	•••	• •	• :				
- 2	•	• •	• •	٠	• •	•	٠.	• •	• •	• ]	•	÷.	• •	• •	•••	• • .	•	••	•	• •	•	•	••	141	• •	• :	•••	••	• •	.:	••	••	• • •	. : .				.:	••	• • •	• • •	
3		•	• •	٠	• •	• •	:.	•		• 4	Z.	:.	• •	• •	•••	• •	:.	• •		•	• 1	:.	••	• •	• •	. :	:	• •								•••	••	:	-			

Figure 15. A charged particle "V" in Soudan I clearly visible in the even view. The "V" is in coincidence but cleanly separated from the through going muon track.

. .. .

• · · · · ·







Figure 17. Energy resolution of the Soudan I detector as determined by the Argonne test beam. (a) For electrons the energy is calculated from the number of proportional tubes hit in the electromagnetic shower. (b) For muons the energy is calculated from the range of the straight track.



Figure 13. A comparison of the single hit resolution of the Kolar apparatus, Soudan I and Soudan II.





### 5. Soudan II

To build Soudan II, the Minnesota and Argonne groups have been joined by Oxford. The Soudan II group is now H. Courant, K. Heller, S. Heppelmann, T. Joyce, M. Marshak, E. Peterson, K. Ruddick, M. Shupe from the University of Minnesota, D. Ayres, K. Coover, J. Dawson, T. Fields, N. Hill, D. Jankowski, E. May, L. Price from Argonne National Laboratory and W. Allison, C. Brooks, J. Cobb, D. Perkins, and B. Saitta from Oxford University. This detector is described in detail elsewhere (Bartelt *et al* 1981). Soudan II will be a 1000-ton tracking ionization calorimeter consisting of iron plates and drift modules. For comparison the resolutions of the Kolar detector, Soudan I and Soudan II are shown in figure 18. Figure 19 shows a Monte-Carlo generated event,  $p \rightarrow e^+ \pi^0$  in Soudan I and the same event with the much finer resolution of Soudan II. In addition to the bubble chamber quality of the Soudan II event pictures, directionality and particle identification can be reliably achieved from the track geometry and ionization. We hope to begin construction of Soudan II by the beginning of 1983.

#### References

Bartelt J et al 1981 University of Minnesota Preprint COO-1764-410 Courant H et al 1979 University of Minnesota Preprint COO-1764 394 Marshak M 1980 First Workshop on Grand Unification (Brook line: Mat. Sci. Press) Shupe M 1981 Second Workshop on Grand Unification (Ann Arbor: Birkhäuser Press) Ullman J D 1981 Phys. Rev. Lett. 47 289

## DISCLAIMER

5 4

This report was prepared as an account of work sponsored by an agency of the United States Government. Neither the United States Government nor any agency thereof, nor any of their employees, makes any warranty, express or implied, or assumes any legal liability or responsibility for the accuracy, completeness, or usefulness of any information, apparatus, product, or process disclosed, or represents that its use would not infringe privately owned rights. Reference herein to any specific commercial product, process, or service by trade name, trademark, manufacturer, or otherwise does not necessarily constitute or imply its endorsement, recommendation, or favoring by the United States Government or any agency thereof. The views and opinions of authors expressed herein do not necessarily state or reflect those of the United States Government or any agency thereof.