

# ЭНЕРГИЯ



№№ 8-9  
сентябрь  
2001 г.

## — КИТАЙЦЫ —

*11 августа в нашем институте побывал Председатель Комитета обороны Корейской Народно-Демократической Республики Ким Чен Ир.*

На обратном пути из Москвы литерный поезд Ким Чен Ира сделал остановку в Новосибирске. В программе, предложенной северокорейскому лидеру, значилось посещение Академгородка и Института ядерной физики. После встречи в Доме ученых кортеж доставил Ким Чен Ира и сопровождающих его лиц на территорию ИЯФа прямо ко входу в ДОЛ. Здесь его встречали академик Э.П. Кругляков и член-корреспондент Г.Н. Кулипанов. Они провели гостей в зал плазменной установки. Здесь была подготовлена стендовая выставка. Э.П. Круг-

ляков, выступив в роли гида, познакомил визитеров с содержанием этой выставки, рассказывающей об основных направлениях фундаментальных исследований, которые проводятся в ИЯФе, и их прикладном использовании. Большое впечатление на гостей произвела плазменная установка. Вся встреча заняла немного времени — около

часа. Затем кортеж двинулся в сторону Новосибирска. В общей сложности поездка Председателя Ким Чен Ира в Москву и обратно продолжалась три недели.

*Фоторепортаж В. Крюкова,  
В. Петрова, А. Шляхова.*



Как только возникли проблемы с бюджетным финансированием, наш институт вынужден был учиться зарабатывать деньги. Начался период интенсивных поисков контрактных работ, которые позволили бы не только сохранить ИЯФ как исследовательский центр, но и дали бы возможность продолжать фундаментальные исследования. Одним из таких контрактов стал контракт с ЦЕРНом по производству 360 дипольных магнитов и 180 квадрупольных магнитов, предназначенных для каналов по транспортировке пучка из SPS в Большой Адронный Коллайдер (LHC). Работа по заключению и выполнению этого заказа продолжалась в течение нескольких лет, и летом нынешнего года она была успешно завершена. Наш корреспондент попросил Бориса Николаевича Сухину — ведущего научного сотрудника пятой лаборатории, который вел контракт, — рассказать об этой работе.

— Борис Николаевич, как возник этот контракт, с чего и как все началось?

— Изготовление такого количества магнитов со столь высокими требованиями к физическим параметрам, к тому же в довольно сжатые сроки — очень сложная задача. Однако у нас уже был некоторый подобный опыт взаимодействия с лабораторией SSC (США). К сожалению, в свое время эта лаборатория правительственным решением США была закрыта, и наше сотрудничество с ней естественно закончилось. Однако этот опыт оказался для нас полезным. В 1995 году в ЦЕРНе директор нашего института выступил с предложением о том, чтобы ИЯФ изготовил магниты для LHC. Осенью 1995 года он привез основные технические требования на магни-

ты. Я проделал необходимые расчеты нескольких вариантов дипольных и квадрупольных магнитов, а Валерий Меджидзаде — их эскизное проектирование. В апреле 1996 года я и В. Меджидзаде побывали в ЦЕРНе,

в сотрудничестве. Пожалуй, наиболее весомым оказалось наше предложение уже к июлю того же года сделать прототип катушки этих магнитов, которая является для них определяющим элементом. Объясняется это тем, что в отличие от обычных магнитов, где напряжение на катушке возбуждения составляет десятки вольт, здесь ситуация иная. Так как канал для транспортировки пучка составляет 2 километра, при этом магниты соединены друг с другом последовательно, то, если не использовать дополнительные

проводники для обратного тока, на крайнем магните получается напряжение до 4 киловольт. Для катушки магнита это очень серьезная цифра. К июлю 1996 года прототип катушки был готов. Испытания, которые были проведены в присутствии нескольких представителей ЦЕРНа, показали, что катушка «держит» больше 10 киловольт. Мы убедительно продемонстрировали, что можем выполнить заказ с хорошим качеством и в срок. После этого началась процедура по заключению контрактов, уточнению параметров магнитов, эскизное проектирование, поиск поставщиков и партнеров — на это ушел еще почти год. Параллельно шел поиск стали, подготовка оборудования на НИИЭФА и ЗВИ. Одна из серьезных проблем, с которой мы сразу же столкнулись, состояла в том, что нужна была сталь очень высокого качества со специальными свойствами. В результате длительных поисков необходимый материал был найден. Над выполнением

этого контракта трудились Череповецкий, Магнитогорский комбинаты, а в Екатеринбурге железо раскатывали в тонкие листы на огромных прокатных станах, затем эти рулоны весом 3-4 тонны отправляли в два адреса — НИИЭФА (С-Петербург) и ЗВИ (Москва). На ЗВИ

## Залог успеха — в правильной структуре ИЯФа

где состоялось серьезное обсуждение предложенных нами вариантов, был выбран базовый вариант, кото-



Б. Сухина и В. Меджидзаде на улице Будкера в Церне, апрель, 1996 г.

рый затем еще неоднократно изменялся. Поначалу наши потенциальные заказчики сомневались в возможностях ИЯФа. Но так как мы во время нашего визита сумели аргументированно и быстро разрешить все возникающие сомнения, то нам все-таки удалось заинтересовать их

штамповали пластины для квадруполей, а в НИИЭФА — для диполей. Причем не просто штамповали, а собирали половинки магнитов, так как там было оборудование, с помощью которого они в свое время делали магниты для большого Серпуховского ускорителя.

— *А кто еще участвовал в этом контракте?*

— Немецкая фирма «Бохум» — она поставляла специальную сталь для так называемых концевых пакетов. Австрийская фирма «Бундметалл» делала медь для дипольных магнитов, а финская компания «Отокумпу» — медь для квадрупольных магнитов. Не считая транспортных компаний, это основные зарубежные участники контракта. В марте 1997 года были согласованы и утверждены Технические Спецификации на сталь для магнитов, а также на дипольный и квадрупольный магниты.

— *Заказчиков убедили, и ... начались трудовые будни...*

— Были назначены технические руководители по производству диполей и квадруполей в экспериментальном производстве ИЯФа старшие научные сотрудники Пупков Ю.А. (лаб. 1-3) и Черток И.Л. (лаб. 5, позже его заменил Бублей А.В.), главные конструкторы диполей и квадруполей Лабуцкий С.А. и Суханов А.В., технологи Рувинский Е.С. и Лобков Б.В. Около года ушло на изготовление прототипов, которые были отправлены заказчикам. Там их посмотрели, внимательно изучили результаты магнитных измерений, затем было получено разрешение на серийное производство. Уже в марте 1999 года были отправлены первые серийные магниты.

— *Какие проблемы возникали по ходу выполнения контракта?*

— Особенность этой работы заключалась в том, что производство было почти серийное. Вначале мы изготавливали один магнит в неделю, а затем — по магниту практически ежедневно. Квадруполи собирали здесь, для этого сделали спе-

раметры не соответствуют заданным. Оказалось, что без согласования с нами в С-Петербурге начали использовать другой штамп для изготовления пластин, а там точность изготовления до 20 микрон. В итоге около тридцати магнитов оказа-

лись с отклонениями от Технической Спецификации. После изучения проблемы была найдена уникальная технология исправления брака, магниты удалось исправить, и с этой технологией исправления согласились наши заказчики, с которыми мы обсуждали

все возникающие проблемы. Требования к качеству поля были очень высокие, так как предполагается в будущем использовать эти магниты для синхротронов.

— *При таких жестких требованиях к качеству очень важен контроль за каждым этапом...*

— Каждое изделие имело паспорт, все произведенные операции проверяли контролеры. Поэтому на отдельных этапах изготовления магнита, конечно, можно было выявить несоответствия, однако конечный результат становился очевидным лишь после окончательной сборки и проведения магнитных измерений.

— *А как осуществлялась доставка магнитов в ЦЕРН?*

— Это оказалось не самой сложной проблемой. Выяснилось, что лучший вариант — доставка на грузовиках. Была разработана специальная схема креплений магнитов, чтобы обеспечить их целостность во время движения. Как запасной вариант была опробована доставка по железной дороге, но это оказа-



*Последний магнит, май, 2001 г.*

циальный стапель. Катушки тоже мотали у нас и для диполей, и для квадруполей отдельно на специальном оборудовании. После сборки магнитов нужно было проводить электрические испытания на прочность изоляции, это так называемые рабочие испытания. А дальше на каждом из уже собранных диполей и квадруполей проводили магнитные измерения на специальном стенде, этим занималась лаборатория 1-3. Начинать все это С. Михайлов, большой вклад внесли квалифицированные лаборанты В. Лобанов, А. Чабанов — без них эту работу сделать было бы нельзя. Активно участвовали в магнитных измерениях О. Голубенко, А. Огурцов, В. Комаров. Для магнитных измерений была выбрана специальная технология. Каждый магнит имеет свои особенности, это неизбежно, главное, чтобы они «укладывались» в допустимые параметры. Были разработаны специальные катушки, один комплект которых устанавливали в «базовом», взятом за образец, магните, а другой комплект — в измеряемом магните. Таким образом можно было четко понимать, чем они различаются. Примерно на 140-м магните выяснилось, что па-

*Окончание на стр. 4.*

Окончание. Начало на стр. 2.

лось менее надежным, так как при перегрузке контейнеров, что происходило несколько раз в течение пути, высока вероятность повреждения магнитов (что, кстати, и произошло с несколькими). Магниты перевозили новосибирские, алтайские, прибалтийские водители, которые по карте, без знания иностранного языка благополучно доставили весь груз к месту назначения. Там есть специальный пункт приема, где проводился внешний осмотр магнитов, но специальных магнитных измерений они не проводили, доверяя нам. Так как магниты эти потребуются через пару лет (из-за первоначальных опасений, что ИЯФ не сможет уложиться в срок, заказ сделали с большим запасом времени), то сейчас наши заказчики вынуждены платить заметные деньги за их хранение. Кстати, один из квадруполь был отправлен в США, в Национальную лабораторию в Брукхейвене. Там были проведены магнитные измерения другим методом, отличным от ияфовского. Эта проверка показала совпадение измерений и еще раз убедила ЦЕРН, что ИЯФу можно верить.

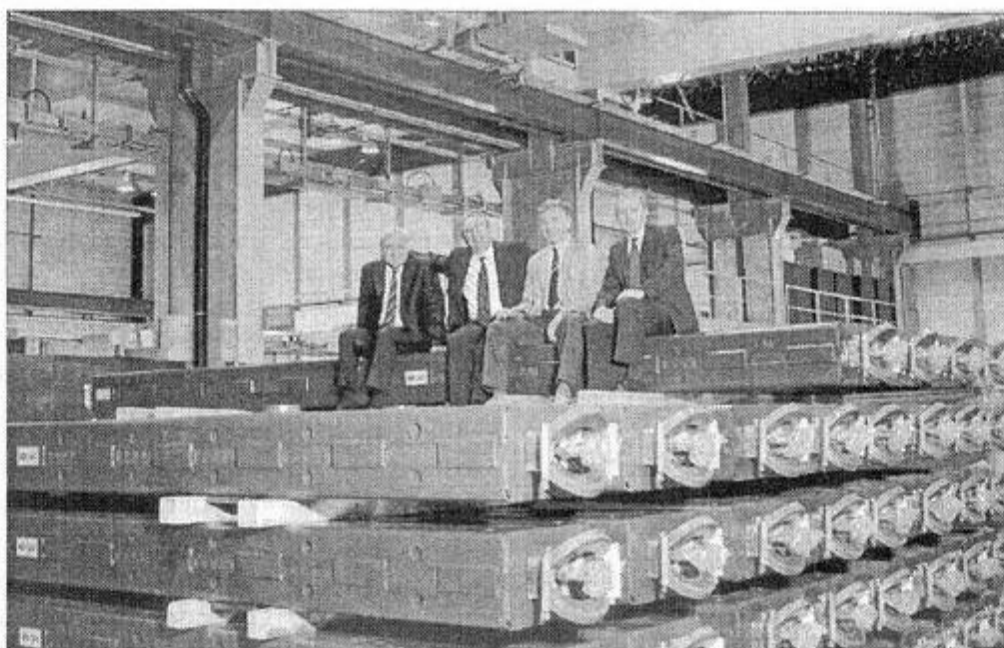
— Что определило хороший результат этой сложной работы?

— Успех этой работы в первую очередь связан, на мой взгляд, с

правильной организацией нашего института, гибкостью его структуры, созданной А.М. Будкером. Этот контракт показал возможности ИЯФа, стал хорошей проверкой его работоспособности и надежности. Над вы-

## Залог успеха — в правильной структуре ИЯФа

полнением этого серьезного контракта трудился коллектив конструкторов.



Магниты, сделанные в ИЯФе, в ЦЕРНе, (слева-направо)  
Л. Эванс, Л. Майани, А.Н. Скринский, К. Хюбнер, июнь, 2001 г.

Кроме упомянутых выше, большой вклад внесли С. Рувинский, Б. Персов, М. Таубер, Н. Зубков, Л. Арапов, и многие другие. Один из важных моментов в изготовлении этих магнитов — производство вакуумных камер. Этим занималась лаборатория 1-4, в частности, А. Булыгин, А. Дьяконов, В. Вайнонен. В этом заказе участвовали многие лаборатории: 1-3 (И. Протопопов, А. Жмака), 4 (Г. Яснов, группа В. Цуканова), 5 (В. Кокоулин, А. Гончаров, С. Чумаков, А. Горячковский), 6, 10, 11 (группа В. Капитоно-

ва) — перечислить всех просто невозможно. Отличную работу продемонстрировали слесари: по квадрупольям — В. Перезолов, по дипольям А. Заставенко, А. и О. Жиголевы, Д. Заболоцкий, сварщики А. Мирошников, Д. Сидельников, М. и В. Сергеевы, упаковка и транспортировка — В. Рыженков и А. Железцов, бригада В. Заболоцкого по намотке катушек, бригады, в которые были включены сотрудники лабораторий, по зачистке и пропитке катушек. Бесперебойную работу обеспечивали участки цехов

механического и ЭВИ, малярного и гальваники. Сборка шла на участке мастера В. Агапова. Серьезная нагрузка была у отдела перевозок — В. Бакулин, А. Кухтин, группы внешнеэкономической деятельности — С. Заковряшин.

Каких-то серьезных срывов практически не было: ИЯФ действовал четко и слаженно. Но самое важное было в том, что изменилось отношение наших заказчиков: всяческие опасения по поводу удаленности института, уровня квалификации его специалистов уступили место заинтересованному сотрудничеству. Уже спустя два года директор ЦЕРНа Эванс в беседе с А.Н. Скринским сказал примерно следующее: «Как сейчас стало просто: если сказали ИЯФу, что нужно сделать то-то и то-то — все будет сделано в срок и хорошо».

С. Середняков

**Новые данные по физике лептонов и фотонов**

*Новейшие результаты по физике элементарных частиц, представленные на очередном XX симпозиуме по лептон-фотонным взаимодействиям при высоких энергиях в Риме, 23-28 июля 2001 года.*

Главные результаты 2001 года выглядят следующим образом:

1. Открыт эффект CP-нарушения в распадах B-мезонов, предсказываемый Стандартной моделью элементарных частиц.
2. В распадах нейтральных каонов проведены точные измерения нового эффекта – «прямого» CP-нарушения.
3. Предварительные результаты измерения аномального магнитного момента  $\mu$ -мезона дают значение, заметно отличающееся от предсказаний Стандартной модели.
4. Первые данные с нейтринного детектора SNO (Канада) вместе с результатами детектора SuperKamiokande (Япония) свидетельствуют о том, что наблюдаемый дефицит солнечных нейтрино обусловлен их переходом в другие виды нейтрино.

Ниже приводится более подробное обсуждение этих результатов.

*CP-нарушение в распадах B-мезонов.*

Эффект CP-нарушения означает, что некоторые физические свойства в мире (так будем называть нашу Галактику и ближайшую часть Вселенной) и антимире (где все состоит из антивещества) различны. Наиболее известным примером являются полуплептонные распады K-мезонов, например, распад

$K_L \rightarrow \pi^+ \mu^- \nu$  в нашем мире и распад

$K_L \rightarrow \pi^- \mu^+ \bar{\nu}$  в антимире имеют разную вероятность. Как было высказано в 1967 году А.Д.Сахаровым, CP-нарушение является возможной причиной наблюдающейся во Вселенной 100%-ной барионной асимметрии. (В модели Большого Взрыва, которая объясняет происхождение Вселенной и подтверждается целым рядом экспериментальных фактов, начальное состояние предполагается зарядово симметричным).

В Стандартной модели элементарных частиц CP-нарушение является следствием ненулевого значения фазы

при смешивании кварков в слабом взаимодействии с заряженными токами. Такой эффект смешивания кварков вообще отсутствует в нейтральных токах и в электромагнитном взаимодействии.

Стандартная модель предсказывает значительный эффект CP-нарушения в распадах B-мезонов. Наиболее ярко это проявляется в распаде

$(B^0) B^0 \rightarrow J/\psi K_S^0$ , в котором конечное состояние, имеющее определенную CP-четность  $CP(J/\psi K_S^0) = -1$ , возникает как от прямого распада  $B^0 \rightarrow J/\psi K_S^0$ , так и вследствие смешивания

$B^0 \rightarrow \bar{B}^0 \rightarrow J/\psi K_S^0$ . Интерференция этих двух каналов дает волну в зависимости числа распадов от времени с амплитудой  $\sim \sin(2\varphi)$ , которая целиком определяется CP-нарушением.

Представленные результаты для амплитуды этой волны с двух B-фабрик выглядят следующим образом:

BaBar (SLAC, США):  $\sin(2\varphi_1) = 0.59 \pm 0.14 \pm 0.05$ ,

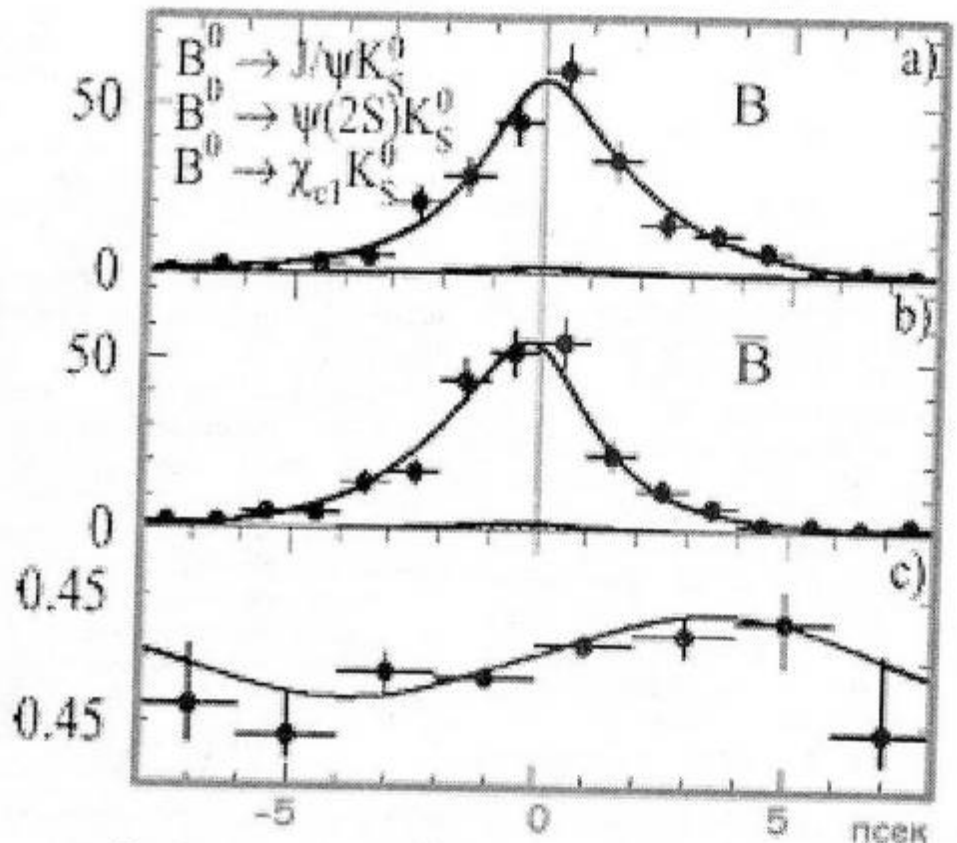
Belle (КЕК, Япония):  $\sin(2\varphi_1) = 0.99 \pm 0.14$

Если пренебречь некоторым расхождением  $\sim 2\sigma$  между BaBar и Belle и формально усреднить, сигнал CP-нарушения составит:

$$\sin(2\varphi_1) = 0.8 \pm 0.1,$$

Высокая статистическая значимость этого сигнала  $\sim 8$  стандартных отклонений, позволяет твердо заявить об открытии эффекта CP-нарушения в распадах B-мезонов, что является, по видимому, одним из самых ярких подтверждений Стандартной модели в последние годы. Можно без преувеличения сказать, что электрон-позитронные B-фабрики выполнили главную поставленную перед ними задачу: найти CP-нарушение в B-мезонах. В ближайшие годы на этих установках продолжатся эксперименты по исследованию тончайших деталей этого эффекта.

*«Прямое» CP-нарушение.* Наряду с описанным выше механизмом CP-нарушения (смешивание состояний с противоположной CP-четностью), Стандартная модель предсказывает и более тонкий эффект – нарушение CP-инвариантности непосредственно в амплитуде распада. В K-мезонах этот эффект описывается так называемыми «пингвинными» диаграммами. Соответству-



Демонстрация эффекта CP-нарушения в распадах B-мезонов – осцилляции числа распадов B-мезонов от времени на нижнем графике соответствуют CP-нарушению.

Окончание на стр.6.

С. Середняков

## Новые данные по физике лептонов и фотонов

Окончание. Начало на стр.5.

ший параметр  $\epsilon$  предсказывается на уровне  $10^{-3}$  от «обычного» параметра  $\epsilon$  CP-нарушения, равного  $2 \cdot 10^{-3}$ . Таким образом, «прямое» CP-нарушение составляет  $\sim 10^{-6}$  от амплитуды разрешенного процесса  $K_L \rightarrow 3\pi$ . Такой мизерный эффект проявляется в разнице между вероятностями распадов K- и K-мезонов на  $\pi^+\pi^-$  и  $\pi^0\pi^0$ . Две конкурирующие коллаборации NA-48 (CERN) и KTEV (FNAL) представили следующие данные:

$$\text{NA-48: } \text{Re}(\epsilon/\epsilon) = (1.53 \pm 0.26) 10^{-3},$$

$$\text{KTEV: } \text{Re}(\epsilon/\epsilon) = (2.07 \pm 0.28) 10^{-3}.$$

Усредненное значение близко к ожидаемому:  $\text{Re}(\epsilon/\epsilon) = (1.72 \pm 0.18) 10^{-3}$ , что является новым существенно важным подтверждением Стандартной модели. Следует отметить, что в некоторых распадах B-мезонов (например,  $B \rightarrow \pi\pi$ ) и очень редких распадах K-мезонов (например,  $K \rightarrow \pi\nu\nu$ ) «прямое» CP-нарушение может доминирующим и поэтому поиск таких процессов имеет важное значение.

**Эксперимент (g-2).** Группа E821 (BNL) объявила предварительный результат измерения аномального магнитного момента  $\mu$ -мезона. Отличие между экспериментом и расчетом составляет:

$a(\text{Exp}) - a(\text{Theory}) = (4.3 \pm 1.6) 10^{-9}$ , то есть, разница – почти 3 стандартных отклонения. Результат BNL, конечно, очень предварительный, но полученное отличие уже превышает в несколько раз расчетную ошибку от адронного вклада, которая в этих единицах составляет 1.2. Уменьшение этой ошибки становится актуальной задачей для низких энергий. В ближайшее время могут быть получены новые данные по адронному вкладу в (g-2) из анализа распадов  $\tau$ -лептона, а также с детекторов KLOE(DAFNE), BaBar(SLAC), где изучаются процессы типа  $e^+e^- \rightarrow \gamma + X$ , где X – адронная система с квантовыми числами виртуального фотона. Конечно, наиболее ценными являются прямые измерения адронных сечений, которые проводятся у нас на ВЭПП-2 с детекторами КМД-2 и СНД.

В случае, если результат BNL устоит (в чем есть, однако, сомнения),

он будет означать начало новой физики – это вдохновляющая новость для LHC, где будет изучаться эта новая физика. Какой именно будет новая физика, результат BNL нам сказать не сможет, но возможности здесь очень широкие: это – проявления суперсимметрии, возможная внутренняя структура  $\mu$ -мезона, вклады новых частиц и др.

**Возможное решение проблемы солнечных нейтрино.** Группа SNO доложила о предварительных результатах измерения потока солнечных нейтрино. Рабочим материалом детектора является тяжелая вода D<sub>2</sub>O, благодаря чему детектор способен к одновременной регистрации следующих процессов взаимодействия нейтрино:

– через «заряженные» токи  $\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-$  (скорость счета этого процесса пропорциональна потоку электронных нейтрино  $\nu_e$ ;

– через «нейтральные» токи  $\nu_e + d \rightarrow p + n + e^-$ , (здесь скорость счета пропорциональна суммарному потоку всех типов нейтрино  $\sim (\nu_e + \nu_\mu + \nu_\tau)$ ;

– упругое рассеяние  $\nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^-$ , которое определяется «заряженными» и «нейтральными» токами. Скорость счета в упругом рассеянии зависит от интенсивности всех типов нейтрино  $\sim (\nu_e + 0.14(\nu_\mu + \nu_\tau))$ . Как видно, вклад «нейтральных токов» заметно подавлен, хотя именно он несет основную информацию об осцилляциях солнечных нейтрино.

Как следует из приведенных выше выкладок, в случае отсутствия нейтринных осцилляций упругое рассеяние и «заряженные токи» определяются одним и тем же потоком электронных нейтрино, поэтому разность расчетных потоков нейтрино должна быть равна нулю. Однако экспериментальный результат SNO и SuperKamiokande для разности  $\Delta\Phi$  вкладов «заряженных» токов и упругого рассеяния противоречит такой простой картине:

$$\Delta\Phi = \Phi(\text{зар.токи}) - \Phi(\text{упр.расс.}) = 0.57 \pm 0.17, (3.3\sigma)$$

Наблюдение ненулевой разности потоков нейтрино численно решает существующую около 30 лет проблему де-

фицита солнечных нейтрино. До сих пор наблюдалось только исчезновение солнечных электронных или атмосферных  $\mu$ -мезонных нейтрино, а эксперимент SNO впервые указывает на «появление» новых нейтрино, предположительно  $\mu$  и  $\tau$  типа. Если этот результат и его интерпретация в ближайшие годы устоят, Стандартная модель подвергнется значительной модификации в ее лептонном секторе. Нейтринные осцилляции означают наличие у нейтрино ненулевой массы, несохранение лептонных квантовых чисел, возможно, несохранение CP-четности в процессах с лептонами и т.д. Эти и другие тонкие эффекты могут в будущем изучаться на нейтринных фабриках, идеи создания которых также обсуждались на конференции.

**Другие темы. Поиск Хиггсовского бозона.** Достаточно стабильно выглядит сегодня ситуация по Хиггсовскому бозону (H) – основному недостающему звену Стандартной модели. Как известно, на LEP и Tevatron найти Хиггса не удалось, хотя все помнят драму закрытия LEP, когда на нескольких детекторах наблюдались события с сигнатурой процесса  $e^+e^- \rightarrow HZ \rightarrow 4\text{струи}$ , соответствующие массе  $M \approx 116 \text{ GeV}$ , но тем не менее было принято решение остановить LEP в пользу развития LHC. Существующий сегодня на основе прецизионных тестов электрослабой модели верхний предел на массу H-бозона составляет  $M < 200 \text{ GeV}$  на уровне достоверности 95%, то есть нет большого противоречия с предварительными данными LEP. Основные ожидания по Хиггс-бозону связываются, во-первых, с начинающимися экспериментами на FNAL, где произведена значительная модернизация детекторов CDF и D0 и самого коллайдера Tevatron. В самом ЦЕРНе следующий этап поисков H-бозона начнется с запуска LHC, и результаты по среднеоптимистическим прогнозам ожидаются не позднее 2010 года.

**Результаты с коллайдера DAFNE.**

Коллайдер DAFNE достиг светимости  $3 \cdot 10^{31} \text{ см}^{-2}\text{сек}^{-1}$ , что позволяет записывать до  $1.5 \text{ пб}^{-1}$  в сутки. Фактический интеграл светимости летом был  $58 \text{ пб}^{-1}$  (это близко к полному интегралу на ВЭПП-2М), а к концу года они хотят иметь  $200 \text{ пб}^{-1}$ . По электрическим дипольным распадам  $\phi \rightarrow \rho^0\gamma$ ,  $a^0\gamma$  и распаду  $\phi \rightarrow \eta\gamma$  они подтвердили результаты СНД и КМД-2 и достигли сравнимой точности  $\sim 10\%$ . Сейчас итальянцы усиленно занимаются физикой K-мезонов. В качестве метки  $K_S$  используется  $K_L$

мезон, который с измеренной задержкой времени регистрируется в калориметре. В частности, они сделали измерение вероятности распада  $K \rightarrow \pi l \nu$  и повторили результат KMD-2.<sup>5</sup>

Наша конкуренция с DAFNE по измерению  $\phi$ -мезонных распадов в будущем становится проблематичной. На ВЭПП-2М пока сохраняются преимущества для поиска редких распадов типа, например,  $\phi \rightarrow \omega \pi$ , у которых большая нерезонансная подложка, поэтому требуется сканирование в широком  $\sim 10$  МэВ интервале энергии.

**Лаборатория Gran Sasso.** Участники конференции имели возможность посетить один из самых больших в мире подземных неускорительных центров, лабораторию Gran Sasso (LNGS). Она находится на расстоянии около 200 км от Рима в туннеле под одноименной горой. Высота горы около 1400 метров, что дает защищенность от космического излучения. Гора сложена из известняка с малой естественной радиоактивностью – это важно для уменьшения фона. Лаборатория имеет 3 огромных зала длиной около 100 м и высотой 20 м, где располагаются следующие основные физические установки:

- Детектор GALLEX – известная установка по изучению потока солнечных нейтрино. GALLEX способен к регистрации самых низкоэнергетических нейтрино. Подобно другим нейтринным детекторам GALLEX «видит» лишь  $\sim 50\%$  от расчетного потока нейтрино. Сейчас GALLEX замещен более совершенным детектором GNO, цель которого вести постоянный мониторинг нейтринной светимости в течение солнечного цикла (11 лет).
- Детектор BOREXINO – это нейтринный детектор на основе 300 тонн тщательно очищенного жидкого сцинтиллятора. Ожидаемая скорость счета – около 50 соб./день, что фактически позволяет вести контроль потока солнечных нейтрино в режиме реального времени.
- Детекторы двойного  $\beta$ -распада – на этих установках изучается гипотетический безнейтринный  $\beta$ -распад. Сейчас ведутся измерения и готовятся около 5 проектов. Один из наиболее известных среди них – проект Heidelberg-Moscow bb. Чувствительность этого детектора позволит установить предел на массу Майоранового нейтрино  $m < 0.2$  eV (90% CL).

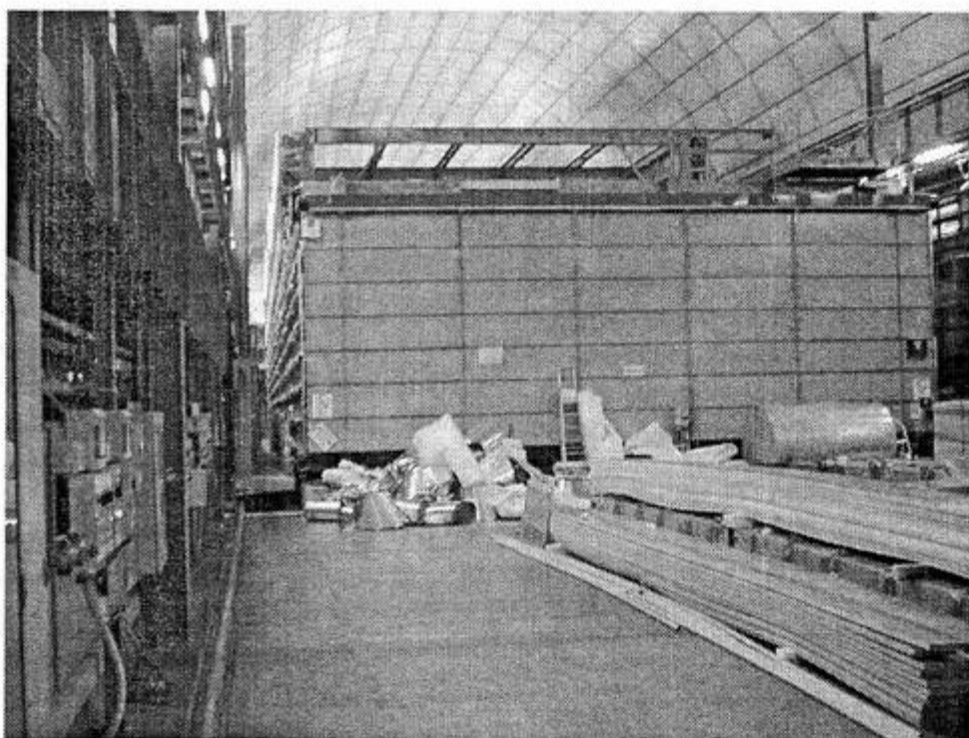
Детектор MACRO – поиск реликтовых магнитных монополей в космических лучах. Кроме того, ведутся измерения потоков «атмосферных» нейтрино.

Детектор DAMA (Dark Matter search) – поиск проявлений взаимодействия одного из кандидатов на роль «темной материи» – WIMPS (Weakly Interacting Massive Particles) с детектором на основе кристаллов NaI(Tl). Как известно, доля «темной» материи составляет около 90% от всей массы Вселенной. Целью измерений является поиск годичной модуляции сигнала с детектора, вызванного взаимодействием детектора с частицами WIMPS. Имеется также еще несколько подобных детекторов, например CRESST, HDMS.

ICARUS – универсальный детектор по поиску распада протона, а также изучения атмосферных и космических нейтрино. Будет состоять из огромной время-проекционной камеры на основе 600 тонн жидкого аргона. Этот детектор создается также в предположении использовать его для регистрации пучка нейтрино из ускорителя ЦЕРНа (проект NGS). Учитывая расстояние – 700 км между Gran Sasso и ЦЕРНом – и возможность изменять энергию и состав нейтринного пучка, можно не сомневаться, что эта установка в ближайшее время станет одной из важных в нейтринной физике.

**Заключение.** Делегация ИЯФ включала В. Голубева, Р. Ли, А. Кузьмина, Г. Поспелова и С. Середнякова (автора этой статьи). Нами был представлен «постерный доклад» – три больших плаката, посвященных новому проекту ВЭПП-2000 и двум модернизированным детекторам – КМД-2М и СНД. Сказать, что наше представление вызвало большой интерес, было бы преувеличением, тем не менее, многие люди интересовались проектом и задавали вопросы, в частности, о сроках его реализации. Возможности выступить с пленарным докладом мы не получили, но нужно отметить, что слова «Новосибирск» или «ВЭПП» (под которым люди в мире физики высоких энергий подразумевают ИЯФ), звучали в выступлениях нескольких докладчиков (J. Miller (BNL), F. Bossi (KLOE), F. Close (Oxford.U)), что свидетельствует о важности и востребованности результатов, полученных в ИЯФ. Здесь не описаны многие другие интересные результаты, прозвучавшие на конференции – распады К-мезонов и В-мезонов, астрофизика и космология, нейтринная физика, новые коллаидеры и другие темы.

Для интересующихся подробностями один из нас (В.Г.) переписал все доклады на ияфовский адрес: [http://sndfs0.inp.nsk.su/SND\\_Publications/lp01](http://sndfs0.inp.nsk.su/SND_Publications/lp01), откуда они легко доступны для просмотра.



Внешний вид детектора MACRO по изучению потоков атмосферных нейтрино в одном из подземных туннелей лаборатории Gran Sasso.

# Человек «запрограммирован» на 150 лет жизни

## Теломераза — не лекарство от старости, а фермент, решающий проблему «концевой репликации ДНК»

Как воспроизводится геном человека и почему человек смертен — тема второго семинара, который провел в нашем институте заведующий лабораторией структуры генома Института цитологии и генетики, доктор биологических наук, профессор Григорий Моисеевич Дымшиц.

— Как воспроизводится геном и какое это имеет отношение к старению? На предыдущем семинаре речь шла о структуре генома, о составляющих его молекулах ДНК и принципах ее строения. Сегодня речь пойдет о принципах репликации, потому что воспроизводство генома осуществляется процессом репликации ДНК.

В начале 60-х годов американский ученый Леонард Хейфлик показал, что если для культивирования взять нормальные диплоидные (соматические) клетки новорожденных детей, то они могут пройти 80-90 делений, в то время, как соматические клетки 70-летних пожилых людей делятся только 20-30 раз. Ограничение на число клеточных делений было названо «лимитом Хейфлика». В 1971 году отечественный ученый А.М. Оловников в своей «теории маргинотомии» (от латин. *marginalis* — краевой, *tome* — сечение) предположил, что в основе ограниченного потенциала удвоения, наблюдаемого у нормальных соматических клеток, растущих в культуре *in vitro*, может лежать постепенное укорочение ДНК хромосом при репликации.

Хромосомы соматических клеток человека (как и у других позвоночных) кэпированы многократно повторенными гексамерами — TTAGGG, общая длина которых может достигать 10 тысяч пар нуклеотидов на каждом конце. В комплексе со специфическими белками такие тандемные повторы образуют

теломеры, защищающие концы ДНК от действия экзонуклеаз, предотвращающие неправильную рекомбинацию и позволяющие концам хромосом прикрепляться к ядерной оболочке. Известно, что в ходе культивирования *in vitro* (в пробирке) некоторых клонов нормальных клеток (например, фибробластов человека) происходит укорочение теломер в среднем на 50 пар нуклеотидов за каждый цикл деления. Подобное укорочение хромосом происходит *in vivo* в подавляющем большинстве дифференцированных клеток человека.

Тот же А.М. Оловников выдвинул гипотезу о существовании особого биологического механизма, решающего «проблему концевой репликации», предположив, что он действует в клетках организмов, размножающихся вегетативным путем, а также в эмбриональных, стволовых, половых и неограниченно долго делящихся в культуре раковых клетках, но не работает в большинстве наших соматических клеток. Преимущество генетического материала в поколениях клеток и организмов обеспечивается процессом репликации — удвоения молекулы ДНК. В результате этого сложного процесса, осуществляемого комплексом нескольких ферментов и белков, не обладающих каталитической активностью, но необходимых для придания полинуклеотидным цепям нужной конформации, образуются две идентичные двойные спирали ДНК. Эти так называемые «дочерние» молекулы ничем не отличаются друг от друга и от исходной «материнской» молекулы ДНК. Репликация происходит в клетке перед ее делением, поэтому каждая дочерняя клетка получает точно такие же молекулы ДНК, какие имела материнская клетка.

«Проблема концевой реплика-

ции» заключается в том, что все известные ДНК-полимеразы, являющиеся ключевыми ферментами сложного репликативного белкового комплекса, неспособны полностью реплицировать концы линейных молекул ДНК. Для того, чтобы клетки не теряли при делении часть генетического материала, 3'-концы ДНК хромосом эукариот наращиваются перед каждым раундом репликации короткими повторяющимися последовательностями. Это осуществляется ферментом — теломеразой. Для того, чтобы понять, каким образом теломераза решает «проблему концевой репликации», необходимо рассмотреть принципы репликации, порождающие эту проблему.

### Принципы репликации

Процесс репликации ДНК основан на следующих принципах. Комплементарность. Каждая из двух цепей «материнской» молекулы ДНК служит матрицей для синтеза дополняющей ее, то есть комплементарной, «дочерней» цепи. (Рис.1).

Полуконсервативность. В результате репликации образуются две двойные «дочерние» спирали, каждая из которых сохраняет (консервирует) в неизменном виде одну из половин «материнской» ДНК. Вторые цепи «дочерних» молекул синтезируются из дезоксирибонуклеотидов заново по принципу комплементарности к нитям «материнской» ДНК. «Дочерние» ДНК ничем не отличаются друг от друга и от «материнской» двойной спирали. (Рис.1). Антипараллельность и униполярность. Каждая цепь ДНК имеет определенную ориентацию. Один конец несет гидроксильную группу (ОН), присоединенную к 3'-углероду в сахаре дезоксирибозе; на другом конце цепи находится остаток фосфорной кислоты в 5'-поло-



жении сахара. Две комплементарные цепи в молекуле ДНК ориентированы в противоположных направлениях — антипараллельно (рис.1) (при параллельной ориентации напротив 3'-конца одной цепи находился бы 3'конец другой). Ферменты, синтезирующие новые нити

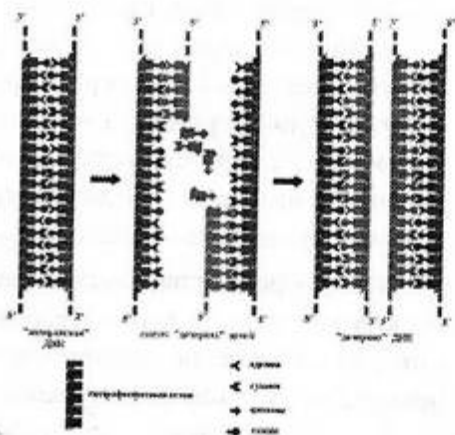


Рис.1 Образование полуконсервативных «дочерних» молекул ДНК в результате репликации. Синтез «дочерних» цепей идёт в направлении 5'→ 3' комплементарно и антипараллельно цепям «материнской» молекулы.

ДНК, и называемые ДНК-полимеразы, могут передвигаться вдоль матричных цепей лишь в одном направлении — от их 3'-концов к 5'-концам. При этом синтез комплементарных нитей всегда ведётся в 5'— 3'направлении, то есть униполярно. Поэтому в процессе репликации одновременный синтез новых цепей идет антипараллельно. (Рис.1.). Прерывистость. Для того, чтобы новые нити ДНК были построены по принципу комплементарности, двойная спираль должна быть раскручена и родительские цепи вытянуты. Только в этом случае ДНК-полимеразы способны двигаться по «материнским» нитям и использовать их в качестве матрицы для безошибочного синтеза «дочерних» цепей. Но полное раскручивание спиралей, состоящих из многих миллионов пар нуклеотидов, сопряжено со столь значительным количеством вращений и такими энергетическими затратами, которые невозможны в клетке. Поэтому репликация начинается одновременно в нескольких местах мо-

лекулы ДНК. Участок между двумя точками, в которых начинается синтез «дочерних» цепей, называется репликоном (рис.2). В эукариотической клетке в каждой молекуле ДНК в зависимости от размеров имеются сотни и даже тысячи репликонов. Репликоны в одной молекуле активируются по расписанию, заданному генетической программой. В каждом репликоне можно видеть «репликативную вилку» — ту часть молекулы ДНК, которая под действием специальных ферментов уже расплелась (рис.2 и 3). Каждая нить в вилке служит матрицей для синтеза комплементарной «дочерней цепи». В ходе репликации вилка перемещается вдоль «материнской» молекулы, при этом расплетаются новые участки ДНК.

Так как ДНК-полимеразы могут двигаться лишь в одном направлении вдоль матричных нитей, а нити

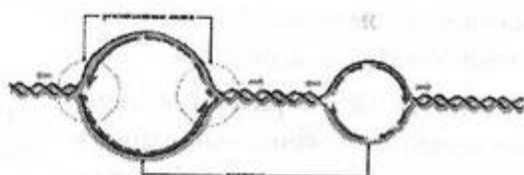


Рис.2 Репликация ДНК эукариотической хромосомы. Показан один из многих репликонов. Репликативные вилки движутся в противоположных направлениях от точки начала репликации.

ориентированы антипараллельно, то в каждой вилке одновременно ведут синтез два по-разному организованных ферментативных комплекса. Одна «дочерняя» цепь (лидирующая) растёт непрерывно, а другая (отстающая) — в виде фрагментов длиной в несколько сот нуклеотидов (так называемых фрагментов Оказаки). (Рис.3). После дей-

ствия ферментов, изменяющих структуру фрагментов, они сшиваются ДНК-лигазой, образуя непрерывную цепь. Механизм синтеза дочерних цепей ДНК фрагментами называют прерывистым.

**Потребность в затравке.** ДНК-полимераза не способна начать синтез ни лидирующей цепи, ни фрагментов Оказаки отстающей цепи. Она может лишь наращивать уже имеющуюся полинуклеотидную нить, последовательно присоединяя дезоксирибонуклеотиды к ее 3'-ОН-

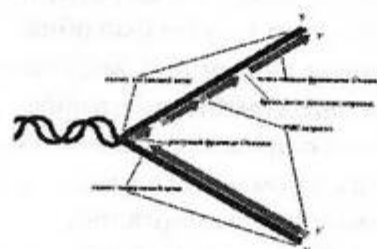


Рис.3 Схема образования «дочерних» цепей ДНК в репликативной вилке. Лидирующая цепь синтезируется непрерывно; отстающая цепь сшивается из фрагментов Оказаки после удаления РНК-затравок и заделывания брешей.

концу. Откуда же берется начальный 5'-концевой участок растущей цепи? Его синтезирует особая форма РНК-полимеразы, называемая праймазой. Размер рибонуклеотидной затравки невелик (менее 20 нуклеотидов) в сравнении с размером цепи ДНК, образуемой ДНК-полимеразой. Выполнившая свою функцию РНК-затравка (праймер) удаляется специальным ферментом, а образованная при этом брешь заделывается ДНК-полимеразой, использующей в качестве затравки 3'-ОН-конец соседнего фрагмента Оказаки. (Рис.3).

Удаление крайних РНК-праймеров, комплементарных 3'-концам обеих цепей линейной «материнской» молекулы ДНК, приводит к тому, что «дочерние» цепи оказываются короче на 10-20 нуклеотидов (у разных видов размер РНК-затравок различен). Это и порождает проблему недорепликации концов линейных молекул. В случае репли-

кации кольцевых бактериальных ДНК этой проблемы не существует, т.к. первые по времени образования РНК-затравки удаляются ферментом, который одновременно заполняет образующуюся брешь путем наращивания 3'-ОН-конца растущей цепи ДНК, направленной в «хвост» удаляемому праймеру.

Проблема недорепликации 3'-концов линейных молекул ДНК решается в эукариотических клетках с помощью специального фермента-теломеразы.

#### Как работает теломераза

Что же представляет из себя этот фермент? В 1985 году он был обнаружен у равноресничной инфузории *Tetrahymena thermophila*, а впоследствии — в дрожжах, растениях и животных, в том числе в яйцниках человека и иммортализованных («бессмертных») линиях раковых клеток HeLa. Теломераза является ДНК-полимеразой, достраивающей 3'-концы линейных молекул ДНК хромосом короткими (6-8 нуклеотидов) повторяющимися последовательностями (у позвоночных TTAGGG).

Помимо белковой части теломераза содержит РНК, выполняющую роль матрицы для наращивания ДНК повторами. Длина теломеразной РНК колеблется от 150 нуклеотидов у простейших до 1400 нуклеотидов у дрожжей; у человека — 450 нуклеотидов. Сам факт наличия в РНК последовательности, по которой идет матричный синтез куска ДНК, позволяет отнести теломеразу к своеобразной обратной транскриптазе, т.е. ферменту, способному вести синтез ДНК по матрице РНК.

В результате того, что после каждой репликации «дочерние» цепи ДНК оказываются короче «материнских» на размер первого РНК-праймера (10-20 нуклеотидов), образуются выступающие одностранные 3'-концы «материнских» цепей. Они-то и узнаются теломеразой, которая последовательно наращивает «материнские» цепи (у человека на сотни повторов), используя 3'-ОН-кон-

цы их в качестве затравок, а РНК, входящую в состав фермента, в качестве матрицы. Образующиеся длинные одноцепочечные концы в свою очередь служат матрицами для синтеза «дочерних» цепей традиционным репликативным механизмом. (Рис.4).

Схема удлинения концов линейных молекул ДНК представлена на рис.5. Сначала происходит комплементарное связывание выступающего конца ДНК с матричным участком теломеразной РНК, затем теломераза наращивает ДНК, используя в качестве затравки ее 3'-ОН-конец, а в качестве матрицы — РНК, входящую в состав фермента. Эта стадия называется элонгацией. После этого происходит транслокация, т.е. перемещение ДНК, удлиненной



на один повтор, относительно фермента. Следом снова идет элонгация и очередная транслокация.

В результате образуются специализированные концевые структуры хромосом — теломеры. Они состоят из многократно повторенных коротких последовательностей ДНК и теломерсвязывающих белков. Поскольку теломерные последовательности нуклеотидов не являются кодирующими, они выступают в роли буферной зоны как защита от «проблемы концевой репликации». Укорочение ДНК в ходе каждого раунда репликации лишь сокращает нетранскрибируемый текст теломеры, но не приводит к утрате смысловых последовательностей — генов и регуляторов их экспрессии.

Таким образом, совместное действие ферментов, репликации и те-

ломеразы обеспечивает преемственность генетического материала в поколениях клеток и организмов.

#### Теломераза и «клеточное бессмертие»

Активность теломеразы у высших эукариот обнаружена лишь в эмбриональных, стволовых, генеративных и раковых, а также в линиях иммортализованных («бессмертных») клеточных культур. В организме при дифференцировке клеток теломераза репрессируется. Экспрессию теломеразы считают фактором иммортализации клеток.

В дифференцированных соматических клетках, культивируемых *in vitro*, теломераза не работает и теломеры постоянно укорачиваются.

*Рис.4 Наращивание концов ДНК хромосом эукариот теломерными повторами. Изображён один из концов хромосомы; другой удлиняется по такой же схеме.*

Длина теломер достоверно коррелирует с пролиферативным потенциалом (например, в фибробластах человека). Укорочение теломер может играть роль митотических часов, отсчитывающих число делений клетки. По достижении критической длины теломерной ДНК запускаются процессы остано-

вки клеточного цикла.

Опубликованная в 1998 году в журнале «Science» статья американских исследователей благодаря средствам массовой информации привлекла внимание не только ученых (а в первую очередь не ученых) в связи с проблемами старения и «клеточного бессмертия». В этой прекрасной работе коллектива, возглавляемого Джерри Шеем, удалось на 40% увеличить число делений нормальных соматических клеток человека в культуре. С помощью генно-инженерных методов в клетки был введен ген каталитической белковой субъединицы теломеразы и прилегающий к нему участок ДНК, регулирующий его работу. При активной работе гена — его экспрессии, увеличивался как размер теломерной ДНК, так и продол-

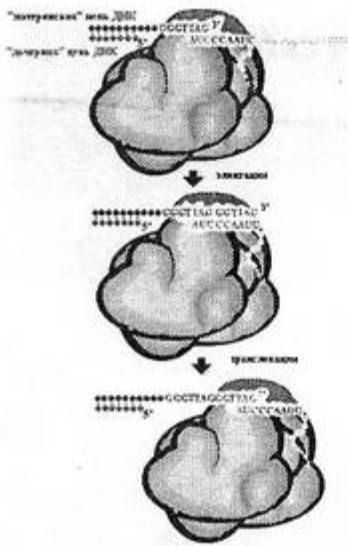


Рис.5 Схема удлинения 3'-конца ДНК с помощью РНК-содержащего фермента - теломеразы.

свободных радикалов — в ДНК возникают наследуемые «ошибки», мутации. Чем старше особь, тем больше «ошибок» накапливается в ее генетической программе.

Существуют ферментативные системы, которые проверяют все ли в порядке в ДНК, и делают они это перед репликацией (то

есть перед воспроизведением генома). Если все в норме, дается «разрешение» на репликацию клетки. Если нет, то запускается система «харакири», и клетка сама себя уничтожает — и это благо: если бы она сохранилась, то нанесла бы большой вред окружающим клеткам и всему организму в целом. Это процесс программируемой гибели клетки называется апоптозом. Феноптоз — старение и смерть целого организма. Феноптоз может происходить по-разному. Так, нерест у горбуши сопровождается обязательной гибелью и самца, и самки. Это происходит тогда, когда горбуша достигает половой зрелости (на четвертый год). Это острый феноптоз: горбуша не старела, а только созрела. Оставив потомство, родители погибают. Возьмем бамбук, который лет 20-30 размножается вегетативным путем, но как только он «захотел» размножиться половым путем, то цветет, плодоносит и мгновенно засыхает.

У человека феноптоз растянут во времени. Индивид созревает к 18 годам и потом постепенно приближается к смерти. То, что теломераза не работает в дифференцированных клетках человека — это благо. Если бы она работала, то накапливались бы мутации, и следующее поколение было бы хуже, чем настоящее, а следующее еще хуже. Это привело бы к вырождению вида. Бессмертие — страшная опасность для видов, размножающихся половым путем. Вероятность появления «паршивой овцы» возрастает про-

порционально возрасту «стада». Природа такую важную функцию как старение и смерть дублирует, выключение теломеразы — не единственный способ. Множественность механизмов старения страхует вид от «засорения» бессмертными особями, большое количество которых препятствовало бы проявлению генетического полиморфизма, обусловленного половым размножением. Смерть от старости очищает популяцию от предков и дает простор потомкам. По длине теломер все люди запрограммированы примерно на 150 лет жизни — так что каждый может попытаться реализовать свои возможности. В Японии, например, сейчас средняя продолжительность жизни 88 лет, а в Уганде — 32 года, в предыдущие же столетия люди вообще жили очень мало. Если и надо над чем-то работать, так это не над продлением старости, а над продлением молодости.

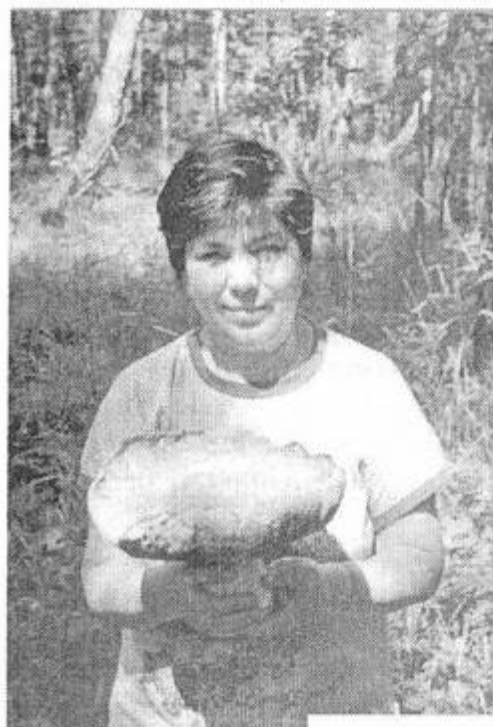
Не стоит рассматривать гены, кодирующие белковые субъединицы теломеразы и входящую в ее состав РНК, как «гены бессмертия». Поддержание длины теломерной ДНК на определенном уровне зависит не только от взаимодействия с ней теломеразы и теломерсвязывающих белков, но и некоторых, пока неизвестных факторов, регулирующих образование самих компонентов теломеробразующего комплекса. Вряд ли бессмертие, достигнутое раковыми клетками, в том числе и путем экспрессии теломеразы, — это то, к чему нужно стремиться. Лекарства от смерти нет. А тот факт, что введение в раковые клетки HeLa антисмысловой конструкции против РНК-компонента теломеразы приводит к укорочению теломер с последующей гибелью клеток, вселяет надежду на появление новых средств борьбы с раком. Понимание механизма работы теломеразы, а, главное, регуляции экспрессии ее в клетке, приблизит нас к пониманию процессов и злокачественной трансформации, и старения.

жительность жизни клеточных культур. Сверх обычных 50 делений клетки прошли дополнительно 20 делений.

Укорочение теломер можно рассматривать как молекулярный индикатор количества делений клетки, но не старения организма в целом. Так, культуры нормальных фибробластов человека, взятых от доноров в возрасте от 0 до 90 лет, выявили корреляцию между начальной длиной теломер и пролиферативной способностью клетки во всем диапазоне возрастов. А размер теломерной ДНК сперматозоидов не уменьшался в соответствии с возрастом мужчины, что говорит об экспрессии теломеразы в линии половых клеток. Прекращение работы теломеразы, отмечаемое в подавляющем большинстве дифференцированных соматических клеток животных, является, по-видимому, одним из необходимых условий на пути достижения биологической целесообразности.

И старение, и смерть — это нормальная биологическая функция организма. Каждый индивид смертен, чтобы популяция была бессмертна. Представим себе такую ситуацию: индивид, уже оставивший в молодом возрасте потомство, продолжает это делать долгое время. Это привело бы ко многим печальным последствиям. Дело в том, что со временем геном «портится». Под действием различных факторов — ультрафиолета, радиации, ряда химических соединений, кислорода и

## Лето в «Разливе»

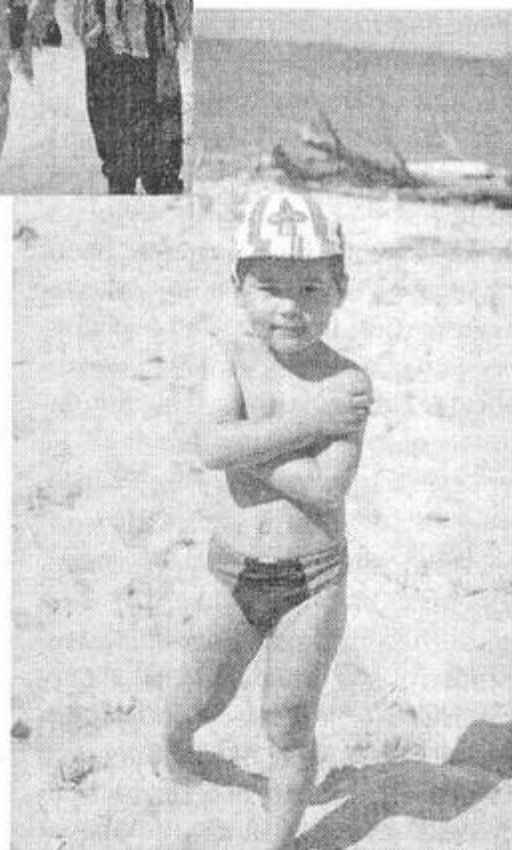


*Хотя и дождливым выдалось лето нынешнего года, желающих отдохнуть в «Разливе», как всегда, было много. Здесь каждый мог найти занятие и развлечение по душе. Удобные домики, хорошее*



*питание, надежная охрана территории, недорогие путевки — все это делает ияфовскую базу самым привлекательным местом отдыха для сотрудников нашего института.*

*Фото В. Петрова.*



Адрес редакции:  
630090, Новосибирск  
пр.ак.Лаврентьева,11,к.423  
Редактор И.В. Онучина

Газета издается  
ученым советом  
и профкомом ИЯФ СО РАН  
Печать офсетная. Заказ № 27

«Энергия-Импульс»  
выходит один раз  
в три недели.  
Тираж 500 экз. Бесплатно.