

КОЛЛАЙДЕР НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Барри Бэриш,
Николас Уокер
и Хитоши Ямамото

Более мощный электрон-позитронный коллайдер поможет ученым раскрыть тайны мира элементарных частиц

Когда Большой адронный коллайдер (БАК) будет введен в строй, позволив расширить область исследований субатомных частиц до недостижимых до сих пор энергий, наступит новая эра в истории физики. Но еще до того как появятся первые результаты экспериментов по столкновениям протонов на гигантском накопительном кольце БАК, ученые займутся предварительными работами по проектированию гигантского ускорителя частиц следующего поколения.

В настоящее время сообщество физиков заявило о создании Международного линейного коллайдера (*International Linear Collider, ILC*). В установке длиной более 30 км будут сталкиваться электроны и позитроны, разогнанные до скоростей, очень близких к скорости света. (Позитрон — античастица по отношению к электрону, с такой же массой, но с противоположным зарядом.)

Гораздо более мощный, чем его предшественники, *ILC* позволит физикам проверить и уточнить от-

ОСНОВНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ

Международного линейного коллайдера станет ниобиевая камера (резонатор) длиной в 1 м, состоящая из девяти сферических ячеек. При охлаждении до очень низких температур она переходит в сверхпроводящее состояние, и в ней генерируются электрические поля, необходимые для ускорения электронов и позитронов

крытия, сделанные на БАК. Протоны содержат три кварка, связанных между собой глюонами (частицами, определяющими сильное ядерное взаимодействие). Поскольку кварки и глюоны внутри протона постоянно взаимодействуют, процесс протон-протонного столкновения оказывается весьма сложным. В силу того, что энергия каждого кварка в момент столкновения точно не известна, определить свойства новых частиц достаточно сложно.

В противоположность протону, являющемуся сложной частицей, электрон и позитрон — фундаментальные (элементарные) частицы, и энергия, выделяемая при их столкновении, в коллайдере определена с высокой точностью. Данное обстоятельство делает *ILC* чрезвычайно полезным инструментом для точного измерения масс и других характеристик открываемых частиц (врезка на стр. 38).

Более 1600 ученых и инженеров из почти 300 лабораторий и университетов со всего мира приступили к конструированию *ILC* и детекторов, которые будут анализировать процессы столкновений. В феврале 2007 г. конструкторская группа оценила затраты на строительство данной машины в \$6,7 млрд (без стоимости детекторов). Был проведен сравнительный анализ затрат при размещении *ILC* на трех возможных площадках — в Европейской лаборатории физики частиц (ЦЕРН), в Национальной лаборатории ускорителей им. Ферми (Фермилаб) в Батавии, штат Иллинойс, и в горах Японии. Несмотря на то что стоимость *ILC* может показаться очень

высокой, она сравнима с затратами на такие научные программы, как БАК и термоядерный реактор *ITER*. И если все пойдет в соответствии с планами, то в 2020 г. Международный линейный коллайдер начнет работу, что безусловно расширит наши представления о физике элементарных частиц.

Рождение коллайдера

В августе 2005 г. около 600 физиков со всего мира собрались на горном курорте Сноумасс, штат Колорадо, чтобы приступить к планированию разработки *ILC*. Однако правильнее начать отсчет с 1989 г., когда в ЦЕРН был запущен в эксплуатацию Большой электрон-позитронный коллайдер (*Large Electron-Positron collider, LEP*). В нем электроны и позитроны ускорялись в накопительном кольце с длиной окружности 27 км и затем сталкивались, выделяя энергию в 180 млрд электронвольт (ГэВ). Однако уже тогда было ясно, что *LEP* — последний представитель коллайдеров такого типа, поскольку для ускорения электронов и позитронов до энергий в триллионы электронвольт (ТэВ) потребуется кольцо окружностью в несколько сотен километров, и стоимость его будет неоправданно высокой.

Основным препятствием на пути создания более мощных машин с накопительными кольцами является синхротронное излучение: относительно легкие частицы, электроны и позитроны, быстро теряют значительную часть своей энергии при движении по кольцу в магнитном поле. Поскольку потери энергии затрудняют ускорение таких частиц, то затраты на строительство

подобного коллайдера будут пропорциональны квадрату энергии столкновения: машина с энергией вдвое большей, чем в *LEP*, будет стоить вчетверо дороже. (Потери энергии на излучение не столь велики при ускорении тяжелых частиц, таких как протоны; поэтому туннель, где расположено кольцо *LEP*, теперь используется для БАК).

Экономически более выгодным может стать строительство линейного коллайдера, в котором при движении частиц по прямой синхротронное излучение не возбуждается. *ILC* будет состоять из двух линейных ускорителей (линаков — *linac, LINear ACcelerator*), каждый длиной 11,3 км, один для электронов, другой — для позитронов. Ускорители направлены навстречу друг другу, а столкновительная камера находится посередине.

Такое решение не лишено недостатков: в каждом импульсе электроны и позитроны должны ускоряться от состояния покоя до энергии столкновения, в то время как в накопительном кольце они набирают энергию на каждом обороте. Для повышения энергии столкновения необходимо построить более длинный ускоритель. При этом стоимость машины становится прямо пропорциональной энергии столкновения, что обеспечивает преимущество линейных коллайдеров перед кольцевыми в диапазоне энергий 10^{12} эВ (ТэВ).

В то время, когда в Европе соорудился *LEP*, в Стэнфордском центре линейных ускорителей (*SLAC*) шло строительство трехкилометрового линейного ускорителя с энергией частиц до 50 ГэВ. Несмотря на

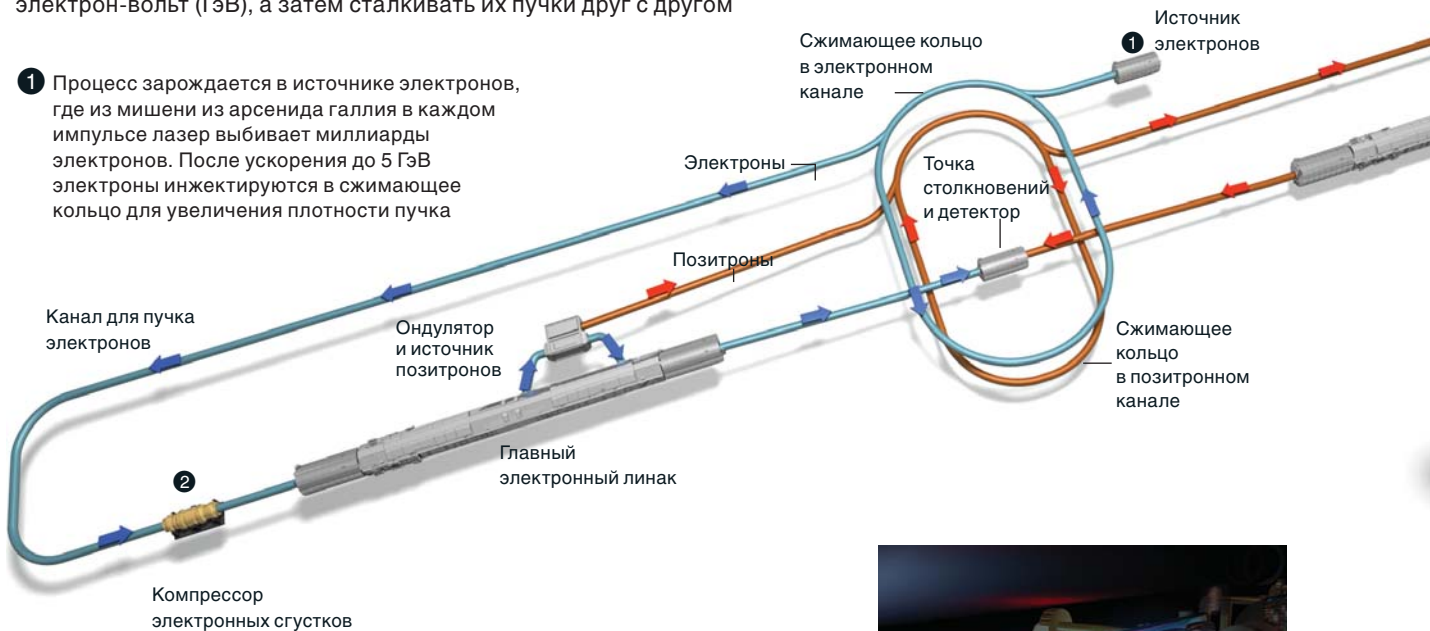
ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- По логике развития, последователем Большого адронного коллайдера (БАК) должен стать Международный линейный коллайдер (*ILC*), предназначенный для столкновения электронов и позитронов
- Конструкция *ILC* предполагает строительство двух линейных ускорителей длиной 11,3 км каждый, в которых сильные электрические поля будут ускорять частицы при их движении через цель вакуумных камер — резонаторов.
- Разработчикам предстоит не только преодолеть технические трудности, но и добиться должного финансирования проекта и выбрать площадку для его постройки.

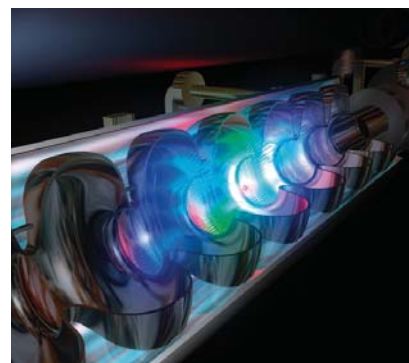
КОЛЛАЙДЕР БУДУЩЕГО

Проектируемый линейный коллайдер *ILC* длиной 30 км станет самой мощной установкой такого рода. Его линейные ускорители (линаки) будут разгонять электроны (*голубые*) и позитроны (*оранжевые*) до 250 млрд электрон-вольт (ГэВ), а затем сталкивать их пучки друг с другом

- 1 Процесс зарождается в источнике электронов, где из мишени из арсенида галлия в каждом импульсе лазер выбивает миллиарды электронов. После ускорения до 5 ГэВ электроны инжектируются в сжимающее кольцо для увеличения плотности пучка



- 2 Электроны направляются в компрессор, где их сгустки (банчи) дополнительно сжимаются и ускоряются до 15 ГэВ. Затем они попадают в главный линейный ускоритель электронов (линок) и их энергия доводится до 250 ГэВ. На середине пути в линаке электронный пучок отклоняется в специальный магнит (ондулятор), где часть их энергии преобразуется в гамма-излучение. Гамма-фотоны облучают вращающуюся мишень, создавая электрон-позитронные пары. Позитроны захватываются, ускоряются до 5 ГэВ и направляются во второе сжимающее кольцо



Компьютерная модель электрического поля внутри линака

ОБ АВТОРАХ

Барри Бэриш (Barry Barish), **Николас Уокер** (Nicholas Walker) и **Хитоши Ямамото** (Hitoshi Yamamoto) хорошо известны в области физики электрон-позитронных столкновений. Бэриш, заслуженный профессор Калифорнийского технологического института, руководит работами по проектированию Международного линейного коллайдера (*ILC*). Область его научных интересов простирается от физики нейтрино до магнитных монополей и гравитационных волн. Уокер работает в области физики ускорителей в *DESY* в Гамбурге. Посвятив 15 лет конструированию линейных коллайдеров, он стал одним из трех руководителей проекта Стадии инженерного проектирования *ILC*. Ямамото, профессор физики в университете Тохоку в Японии, участвовал в экспериментах на встречных пучках в Стэнфордском центре линейных ускорителей, на Корнеллском электронном накопительном кольце и в Японской организации по исследованиям на ускорителях высокой энергии (*КЕК*).

то что *SLAC*, работавший с 1989 по 1998 гг., не был линейным коллайдером в чистом виде, поскольку в нем использовался только один линейный ускоритель, он стал отправной точкой на пути к созданию *ILC*.

Разработка линейного коллайдера для терадиапазона (ТэВ-диапазона) началась в конце 1980-х — начале 1990-х гг., когда были предложены несколько конкурирующих технологий. В августе 2004 г. комиссия из 12 независимых экспертов рекомендовала проект группы *TESLA*, в составе которой были ученые более чем из 40 институтов. Работа



Основной элемент этого сверхпроводящего радиочастотного устройства (СПРЧ) — ниобиевый резонатор длиной 1 м, состоящий из девяти ячеек, который можно охладить до двух градусов Кельвина (-271°C). Криомодуль образуют восемь или девять таких резонаторов, состыкованных друг с другом и погруженных в емкость со сверхохлажденным жидким гелием (илл. на стр. 41). В ILC в каждом из двух линейных ускорителей будет установлено около 900 криомодулей, т.е. около 16 тыс. резонаторов во всем коллайдере. Исследователи в DESY к настоящему времени сконструировали 10 прототипов криомодулей, пять из которых установлены в DESY в лазере FLASH, где используются электроны высокой энергии. В Европейском рентгеновском лазере на свободных электронах (РЛСЭ, *European X-Ray Free-Electron Laser, XFEL*), находящемся сейчас в процессе конструирования, также будет использована технология СПРЧ — там будет установлен 101 криомодуль, ускоряющий электроны до 17,5 ГэВ.

Линейные ускорители ILC были бы короче и соответственно дешевле, если бы резонаторы позволяли генерировать электрическое поле большей напряженности. Поэтому конструкторы поставили перед собой дерзкую цель — улучшить параметры системы СПРЧ, чтобы энергия частиц на каждом метре пути увеличивалась на 35 млн электронвольт (МэВ). Сегодня уже создано несколько прототипов резонаторов, превосходящих данные параметры, однако серийное производство представляет серьезную проблему. Главный фактор, обеспечивающий повышение эффективности, — чистота их внутренней поверхности и отсутствие дефектов, следовательно, для изготовления необходимы стерильные производственные зоны.

Просто о сложном

Конструкторы ILC уже определили параметры коллайдера (врезка слева). Его длина составит около 31 км; основную часть займут два сверхпроводящих линейных ускорителя,

обеспечивающих электрон-позитронные столкновения с энергией 500 ГэВ (при столкновении электрона с энергией 250 МэВ с движущимся ему навстречу позитроном с такой же энергией в системе центра масс высвободится энергия 500 ГэВ). Пять раз в секунду ILC будет генерировать, ускорять и сталкивать почти 3 тыс. электронных и позитронных сгустков в импульсе длительностью 1 мс, что соответствует мощности 10 МВт для каждого пучка. Общая эффективность машины составит около 20%, следовательно, полная мощность, потребляемая ILC для ускорения частиц, составит почти 100 МВт.

Для создания пучка электронов мишень из арсенида галлия будет облучаться лазером; при этом в каждом импульсе из нее будут выбиваться миллиарды электронов, которые, что особенно важно для многих направлений физики частиц, будут поляризованы, т.е. их спины будут направлены в одну сторону. Электроны сразу будут ускорены до 5 ГэВ в коротком линейном СПРЧ-ускорителе, а затем инжектированы в 6,7-километровое накопительное кольцо, расположенное в центре комплекса. Двигаясь в кольце, электроны будут генерировать синхротронное излучение, и сгустки сожмутся, что увеличит плотность заряда и интенсивность пучка.

ПРЕДПОЛАГАЕМЫЕ ПЛОЩАДКИ

Разработчики ILC рассмотрели вопросы стоимости размещения коллайдера на трех возможных площадках:

В ЕВРОПЕ, в ЦЕРН, Европейской лаборатории физики элементарных частиц около Женевы

В США, в Национальной лаборатории ускорителей им. Ферми в Батавии, штат Иллинойс

В ЯПОНИИ, вдоль одного из горных хребтов

группы координировалась Исследовательским центром «Германский электронный синхротрон» (DESY) в Гамбурге. Согласно данному проекту, электроны и позитроны должны пролетать через последовательность вакуумных камер (резонаторов), выполненных из ниобия, который при очень низких температурах становится сверхпроводящим, что обеспечивает эффективную генерацию внутри камер сильного высокочастотного (порядка 1 ГГц) электрического поля. Это осциллирующее поле должно ускорять частицы вплоть до точки соударения.

МОЛОТОК И СКАЛЬПЕЛЬ

Для того чтобы понять соотношение между Большим адронным коллайдером (БАК) и проектируемым Международным линейным коллайдером (*ILC*), представьте себе первый как молоток, которым разбивают орех, а второй как скальпель, которым аккуратно делают срезы мякоти его ядра. БАК разгоняет протоны до энергии 7 ТэВ, поэтому при каждом их лобовом столкновении высвобождается энергия 14 ТэВ, и физики смогут впервые увидеть, что происходит при таких энергиях.

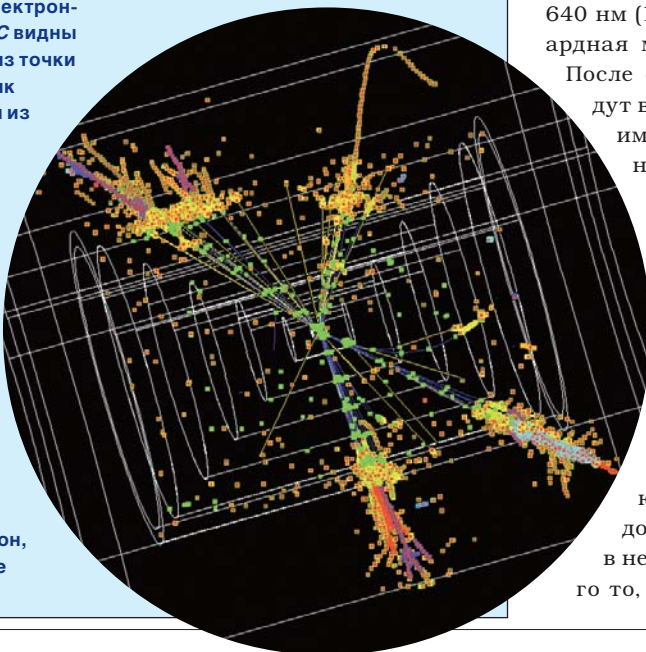
В столкновениях могут рождаться частицы, о существовании которых высказывались гипотезы, но которые до сих пор не наблюдались. Одной из таких частиц является бозон Хиггса. (Согласно Стандартной модели — широко признанной теории частиц, которая описывает электромагнетизм, а также слабые и сильные ядерные взаимодействия, — эта частица определяет массы всех других частиц.) Другой пример — суперсимметричные частицы, гипотетические партнеры известных частиц. (Например, предполагаемый партнер электрона — селектрон; партнер фотона — фотино). Более того, БАК, возможно, позволит найти свидетельство существования высших измерений, проявляющихся только в процессах при высоких энергиях.

Если бозон Хиггса действительно существует, то, как надеются физики, БАК поможет обнаружить его, определить массу и характер его взаимодействия с другими частицами. Однако сложность процесса протон-протонных столкновений не позволит физикам детально изучить свойства бозона Хиггса. Для более тщательного исследования его характеристик, таких как сила взаимодействия с другими частицами, потребуются *ILC* как более точный инструмент. Эти характеристики особенно важны, т.к. можно будет проверить справедливость Стандартной модели: правильно ли она описывает события при высоких энергиях, или для этого нужна другая теория?

Исследования суперсимметричных частиц на *ILC* предоставят возможность физикам выявить некоторые детали новых теорий. Их результаты могут определить, являются ли некоторые из этих частиц компонентами так называемой темной материи, которая составляет четвертую часть всей энергии Вселенной. Еще одна частица, которая может быть обнаружена на БАК, — гипотетический *Z*-штрих-бозон, контрпартнер *Z*-бозона, носителя слабого ядерного взаимодействия. Поскольку открытие *Z*-штрих-бозона послужило бы указанием на существование новой фундаментальной силы природы, было бы чрезвычайно интересно определить свойства этой силы, происхождение, отношение к другим силам природы и ее роль в самые ранние моменты после Большого взрыва. Именно *ILC* может сыграть решающую роль в решении этих проблем.

Наконец, весьма вероятно, что БАК и *ILC* позволят совершить неожиданные открытия новых явлений, не менее важных, чем те, которые мы упомянули.

НА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ электрон-позитронного столкновения в *ILC* видны потоки частиц, разлетающихся из точки столкновения. Каждый квадратик соответствует попаданию в один из детекторов, а их равномерно окрашенная группа демонстрирует ливень частиц. По этим данным исследователи определяют природу продуктов взаимодействия: желтые линии представляют собой траектории нейтральных частиц (в основном фотонов), а синие — заряженных частиц (в первую очередь пионов, состоящих из пар кварков). Данная модель демонстрирует тот случай, когда в электрон-позитронном столкновении рождаются бозон Хиггса и *Z*-бозон, быстро распадающиеся на более легкие частицы



Когда 200 мс спустя электронные сгустки покинут кольцо, их длина составит около 9 мм. Для оптимизации процесса ускорения и динамики последующих соударений с позитронами длина сгустков будет сжата до 0,3 мм. В процессе сжатия энергия электронов возрастет до 15 ГэВ, затем они будут введены в один из главных 11,3-км СПРЧ-линейных ускорителей, где их энергия возрастет уже до 250 ГэВ.

На середине пути при энергии 150 МэВ электронные сгустки будут слегка отклонены для создания позитронных сгустков. Электроны направятся в специальный магнит, так называемый ондулятор, где некоторая часть их энергии преобразуется в гамма-излучение. Гамма-фотоны фокусируются на тонкую мишень из титанового сплава, вращающуюся со скоростью около 1000 оборотов в минуту, образуя множество электрон-позитронных пар. Позитроны будут захвачены, ускорены до 5 ГэВ, после чего попадут в другое сжимающее кольцо и, наконец, во второй главный линейный СПРЧ-ускоритель на противоположном конце *ILC*.

Когда энергия электронов и позитронов достигнет конечной величины в 250 ГэВ и они устремятся к точке столкновения, ряд магнитных линз сфокусирует сгустки в плоские ленты шириной около 640 нм (1 нанометр — одна миллиардная метра) и толщиной 6 нм.

После столкновения сгустки будут выводиться из области взаимодействия и направляться на так называемую ловушку пучка (*beam dump*) — мишень, в которой частицы поглощаются, и их энергия рассеивается.

Для создания каждой из подсистем *ILC* требуется решить ряд сложнейших технологических и инженерных задач. В сжимающих кольцах коллайдера необходимо достичь качества пучка, в несколько раз превышающего то, что достигнуто в существ-

Создание каждой из подсистем *ILC* требует решения, как технологических, так и инженерных задач

вующих накопительных кольцах. Более того, высокое качество пучка должно сохраняться на стадиях сжатия, ускорения и фокусировки. Потребуется сложнейшая система диагностики пучка, процедуры его настройки и точнейшая подгонка всех компонентов конструкции. Наиболее сложной задачей станет создание системы генерирования позитронов и нацеливания нанометровых пучков в точку столкновения.

Разработка детекторов для анализа продуктов столкновений в *ILC* — следующая не менее сложная задача. Например, для определения силы взаимодействия бозона Хиггса с другими частицами потребуется определить импульсы и точки рождения заряженных частиц с разрешением, на порядок превышающим уже достигнутое на установках. Сейчас ученые заняты разработкой новых трековых детекторов и калориметров, которые позволят собрать на *ILC* богатый урожай для новой физики.

Последующие шаги

Несмотря на то что команда *ILC* уже выбрала общую конструкцию коллайдера, предстоит большая работа по ее детализации. В течение следующих нескольких лет, когда БАК начнет собирать и анализировать данные по протон-протонным столкновениям, будет продолжаться работа по оптимизации конструкции *ILC* для достижения лучших характеристик при разумной стоимости. Еще не известно, где будет расположен *ILC*; решение об этом зависит от финансовой поддержки, которую смогут оказать правительства. Пока рассматривают-



ся возможные площадки в Европе, США и Японии. Геологические и топографические различия, особенности местного законодательства могут определять подход к конструкции коллайдера и оценку его стоимости.

В любом случае, в работах по планированию будут учитывать научные открытия, которые еще предстоит сделать на БАК, что позволит оптимизировать ход исследований на *ILC*. Параллельно с техническим конструированием будут создаваться модели управления проектом *ILC* таким образом, чтобы каждая группа физиков, участвующих в проекте, имела право высказывать свою точку зрения. Предполагается, что создание коллайдера нового поколения и исследования на нем будут носить международный характер. ■

Перевод: А.А. Сорокин

КРИОМОДУЛИ, состоящие из цепочки ниобиевых камер, охлаждают, помещая в жидкий гелий, что придает им сверхпроводимость. Данные устройства были протестированы в исследовательском центре *DESY* в Гамбурге



ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

- www.linearcollider.org
- www.linearcollider.org/gateway
- www.linearcollider.org/cms/?pid=1000437
- www.fnal.gov/directorate/icfa/ITRP_Report_Final.pdfhttp://physics.uoregon.edu/%7EElc/wwstudy/lc_consensus.html