

Higgsbosonen

En introduktion

...
Ett projektarbete inom Modern fysik
SH1012

...
Handledare:
Jonas Strandberg

Naemi Florin	Jennifer Lemne
naemif@kth.se	lemne@kth.se
930523-8785	910127-0545

31 maj 2014

Sammanfattning

År 2013 mottog Peter Higgs och François Englert Nobelpriset i fysik för sina teorier om den så kallade Higgsbosonen. Higgsbosonen sägs vara den partikel som ger de andra elementarpartiklarna massa, och anses därför vara en av universums viktigaste byggstenar. Men hur fungerar den egentligen? Här följer en kort introduktion till denna fascinerande partikel.

Innehåll

1	Introduktion	3
2	Standardmodellen	3
2.1	Elementarpartiklar	3
2.1.1	Elementära fermioner - materia	4
2.1.2	Bosoner - kraftförmedlare	5
2.2	Elementära krafter	5
3	Higgsbosonen i teorin	6
3.1	Higgsteorins uppkomst	6
3.2	Möjliga sönderfall	7
4	Higgsbosonen experimentellt	7
4.1	Bakgrundsprocesser	7
4.2	Sökkanaler och sannolika sönderfall	8
4.3	Koppling och massa	9
5	Slutsatser	10

1 Introduktion

Vi har länge varit intresserade av de byggstenar som bygger upp all materia. Idag har utvecklingen gått så långt att vi tror att vi har börjat hitta de minsta beståndsdelarna. Vi kallar dem elementarpartiklar. Den så kallade standardmodellen (figur 1) är en schematisk beskrivning av de elementarpartiklar som vi i dagsläget känner till, och interaktioner dem emellan.

Tyvärr hade standardmodellen vissa brister (vilka beskrivs närmare i avsnitt 3). Bland de första forskarna att komma med en teori som löste dessa 'problem' var Peter Higgs, François Englert och Robert Brout, som förutspådde en ny partikel med speciella egenskaper, vilken fick namnet Higgsbosonen.

Det dröjde dock länge innan man kunde påvisa Higgsbosonens existens. En av de avgörande faktorerna var att man till en början helt enkelt inte kunde konstruera tillräckligt starka partikelacceleratorer för att kunna skapa så högenergetiska protonkollisioner som det skulle visa sig krävas för att skapa Higgsbosoner.

2 Standardmodellen

2.1 Elementarpartiklar

Elementarpartiklarna delas upp i grupper beroende på inre egenskaper, såsom massa, spinn, laddning och färgladdning, samt grupp-specifika egenskaper. I ett system med interagerande partiklar bevaras dessa, liksom antalet av varje partikeltyp, enligt vissa konserveringsregler. Vilka egenskaper som bevaras beror på vilken typ av interaktion som sker, men till exempel ska - vilket är en självklarhet i den klassiska mekaniken - ett systems energi och rörelsemängd bevaras. Även spinn, laddning och färgladdning bevaras universellt. Vissa andra egenskaper, som till exempel antalet av varje partikeltyp (baryontal, leptontal etc.), bevaras ibland, lite beroende på vilken krafttyp partiklarna växelverkar under.

Till varje partikel hör också en så kallad *antipartikel*, vilken ungefär kan beskrivas som partikelns spegelbild med avseende på bland annat laddning. De har samma egenskaper och lika stora laddningar, men med olika laddningstecken - bland vilka positronen (e^+), elektronens antipartikel, kan nämnas. Konventionellt betecknas antipartiklar överstruket, som till exempel antiprotonen \bar{p} . Antipartiklar uppkom teoretiskt som en del av den negativa lösningen av den relativistiska Schrödingerekvationen.

Tre generationer av materia (fermioner)

	I	II	III		
massa →	2.4 MeV/c ²	1.27 GeV/c ²	171.2 GeV/c ²	0	? GeV/c ²
laddning →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
spinn →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
namn →	u upp	c charm	t topp	γ foton	H Higgs boson
	4.8 MeV/c ²	104 MeV/c ²	4.2 GeV/c ²	0	
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
Kvarkar	d ner	s sär	b botten	g gluon	
	<2.2 eV/c ²	<0.17 MeV/c ²	<15.5 MeV/c ²	91.2 GeV/c ²	
	0	0	0	0	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	ν_e elektron neutrino	ν_μ myon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z⁰ Z boson	
Leptoner	0.511 MeV/c ²	105.7 MeV/c ²	1.777 GeV/c ²	80.4 GeV/c ²	
	-1	-1	-1	±1	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
	e elektron	μ myon	τ taulepton	W[±] W boson	
					Gaugebosoner

Figur 1: En schematisk illustration av standardmodellen som tar elementarpartiklarnas egenskaper i beaktning.

2.1.1 Elementära fermioner - materia

Leptoner och kvarkar Kvarkarna har den speciella egenskapen färgladdning. Begreppet färgladdning syftar inte till partikeln optiska egenskaper, utan är en schematisk konvention som hör ihop med kvarkarnas interaktioner med gluoner via den så kallade starka kraften. De förekommande färgerna är grön, röd och blå, och antigrön, antiröd och antiblå för motsvarande antipartiklar. Sammansättningar av kvarkar kallas hadroner, vilka i sin tur är uppdelade i baryoner och mesoner. Mesoner består av en kvark och en antikvark, och är följaktligen bosoner (se avsnitt 2.1.2), medan baryoner består av tre kvarkar med olika färgladdning och därför är fermioner. Bland baryonerna kan protonen (uud) och neutronen (udd) nämnas.

Karakteristiskt hos alla stabila partiklar - och därmed även fermioner - är att de har en neutral, eller så kallat vit, färgladdning. I baryonernas fall skulle detta innebära färgladdningskombinationen grön + röd + blå.

De sex leptonerna delas in i tre familjer, med stigande massa, där varje familj består av en partikel och dess motsvarande neutrino.

Tre generationer Ett annat sätt att betrakta de elementära fermionerna är generationsvis - kolonnvis, enligt fig. 1 - där massan av varje generations partiklar ökar med generationstalet. En tydlig distinktion mellan de olika generationerna är deras stabilitet. Den lättaste generationen - uppkvark, nedkvark, elektron och elektroneutrino - är också den mest stabila, och är den som i störst utsträckning byggner upp universum. Den tyngsta är däremot väldigt instabil och dess partiklar sönderfaller fort till lättare generationer.

2.1.2 Bosoner - kraftförmedlare

Bosoner är alla partiklar med heltaligt spinn, vilka - till skillnad från fermionerna - inte lyder under Pauliprincipen. De icke sammansatta bosonerna är gaugebosonerna och Higgsbosonen.

Gaugebosoner Det finns fyra gaugebosoner, som alla är interagerande partiklar i de olika elementarkrafterna, vilka beskrivs närmare i avsnitt 2.2. Gemensamt för gaugebosonerna är spinntalet 1. Medan fotonen och gluonen är masslösa, är W^\pm - och Z^0 -bosonerna väsentligt tyngre än såväl leptonerna som kvarkarna, med undantag för toppkvarken som är extremt tung.

Higgsbosonen Higgsbosonen är ytterligare en boson, utan vare sig laddning, färgladdning eller spinn. Varför Higgsbosonen förutsågs och vilka andra egenskaper den har, samt hur man experimentellt kunnat påvisa den förklaras mer detaljerat senare (avsnitt 2 och 3), efter en kort genomgång av elementarkrafterna.

2.2 Elementära krafter

Mellan och genom dessa partiklar verkar olika typer av krafter. Trots strävan att förena dem i en enda universell kraft har man i dagsläget tre separat verkande krafter - den starka, den elektrosvaga och den gravitationella kraften.

Den starka kraften Den så kallade starka kraften är den kraft som håller ihop kvarkar. Dess förmedlarpartikel är gluonen, vilken växelverkar med färgladdade partiklar. Sin styrka till trots har kraften en mycket kort räckvidd, cirka 1 fm.

Den elektromagnetiska-svaga kraften Den elektrosvaga kraften, som vid låga energier bör betraktats som två separata krafter -

den elektromagnetiska och den svaga kraften - verkar i det elektromagnetiska fältet med hjälp av fotonen (elektromagnetisk växelverkan) och W^\pm - respektive Z^0 -bosonerna (svag växelverkan). De båda 'del'-krafterna har olika räckvidd - den elektromagnetiska kraften avtar som $1/r^2$, medan den svaga kraften i stort sett bara verkar inom atomkärnor eftersom dess effekt avtar exponentiellt med avståndet.

Gravitation Jämfört med de två andra elementarkrafterna är gravitationen oerhört svag - 10^{38} gånger svagare än den starka kraften. Dock är den, genom att inte samtidigt kunna förklaras relativistiskt och kvantmekaniskt, ett av den moderna fysikens stora mysterier. Inte heller har man experimentellt lyckas påvisa kraftens teoretiskt förutspådda förmedlarpartikel ('gravitonen'). Gravitationens räckvidd avtar med det kvadrerade avståndet.

3 Higgsbosonen i teorin

Till skillnad från gaugebosonerna är inte Higgsbosonen direkt kopplad till någon av de tidigare nämnda krafterna - däremot verkar den i ett eget fält, Higgsfältet. Fältet förutsågs finnas överallt, men bara ge sig till känna och därigenom kunna mätas via just Higgsbosonen. Att hitta Higgsbosonen var alltså ekvivalent med att hitta själva Higgsfältet. Men varför var det så viktigt att hitta fältet? Varför är Higgsbosonen en så fundamental del av standardmodellen?

3.1 Higgsteorins uppkomst

En av de största bristerna i standardmodellen fram till dess att partikelns existens bekräftats uppstod rent matematiskt i den med modellen medföljande teorin om *gaugeinvarians*, vilken förenklat säger att fält (exempelvis det elektromagnetiska fältet) ska kunna genomgå vissa typer av transformationer oförändrat (vara gaugesymmetriska). Det är i ett visst steg i transformationen som man måste kräva att fotonen är masslös - något som också bekräftats experimentellt. När samma beräkningar görs med W^\pm - och Z^0 -bosonerna uppstår dock ett problem - även dessa måste matematiskt sett krävas vara masslösa, trots att de experimentellt visats vara synnerligen massiva. Det är här Higgsfältet kommer in i bilden - om man 'lägger till' ett ytterligare fält i teorin, som medför ett så kallat *spontan symmetribrott*, så är gaugeinvariansen inte längre ett problem, och man måste inte längre kräva masslöshet hos W^\pm - och Z^0 -bosonerna. Tillägget av ett nytt fält innebär också ett tillägg av kvanta - Higgsbosonen. Man brukar

säga att Higgsfältet genom Higgsbosonen växelverkar med partiklar, och på så sätt - via den så kallade Higgsmekanismen - ger dem massa¹.

3.2 Möjliga sönderfall

Higgsbosonen själv är så gott som omöjlig att hitta, då den är en extremt instabil partikel. Däremot kan den genomgå ett stort antal olika sönderfall - alltså fanns den teoretiska möjligheten att betrakta partikelns eventuella existens genom titta på dess sönderfallsprodukter. Det förutsågs att om bosonen fanns kunde den sönderfalla till diverse möjliga slutprodukter, med olika hög sannolikhet för respektive utfall, beroende på bosonens massa, vilken inte kunde bestämmas teoretiskt.

$$H^0 \rightarrow W^+W^-, H^0 \rightarrow Z^0Z^0, H^0 \rightarrow \gamma\gamma, H^0 \rightarrow \tau^+\tau^-, \\ H^0 \rightarrow c\bar{c}, H^0 \rightarrow b\bar{b}, H^0 \rightarrow gg, H^0 \rightarrow Z^0\gamma, H^0 \rightarrow t\bar{t}$$

Bland de möjliga utfallen genomgår vissa partiklar strax ytterligare ett sönderfall (exempelvis Z^0 , som sönderfaller till två fermioner). Teoretiskt sett finns även en sannolikhet att Higgsbosonen sönderfaller till lättare partiklar, exempelvis en elektron och en positron, men på grund av deras låga massa är sannolikheten för ett sådant sönderfall enormt liten i förhållande till övriga möjliga sönderfall.[1]

4 Higgsbosonen experimentellt

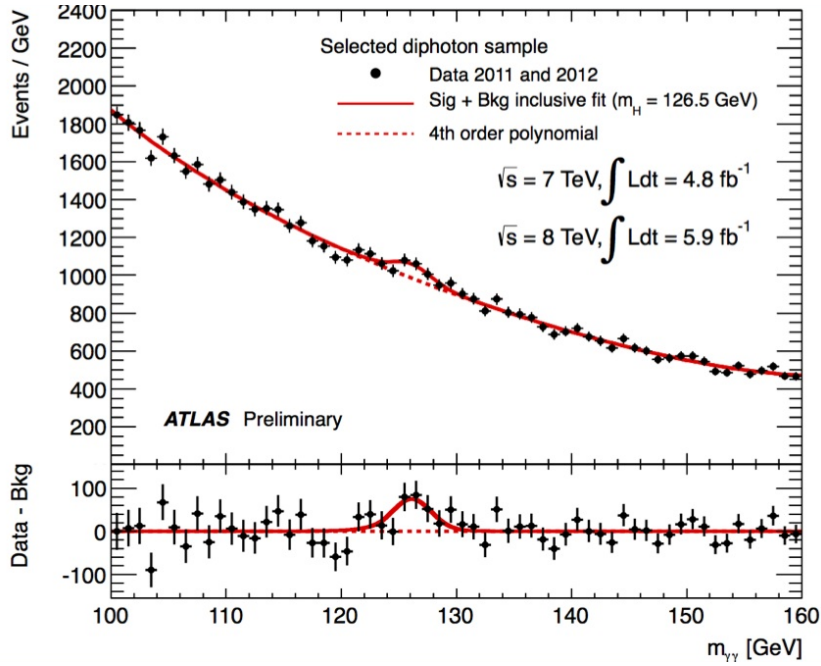
Genom protonkollisioner med extremt hög energi kan man skapa Higgsbosoner, vars omedelbara sönderfall då kan registreras.

4.1 Bakgrundsprocesser

Det hade förvisso varit trevligt att säkert kunna fastställa att en viss signal kommer från just ett sönderfall av en Higgsboson, men så lätt är det dessvärre inte. Det finns alltid en stor mängd så kallad bakgrund närvarande i mätningarna från diverse 'vanliga' kollisioner. Om exempelvis två fotoner detekteras är sannolikheten att de skapats i en 'vanlig' kollision mellan en kvark och dess antikvark väsentligt högre än sannolikheten att de kommer från en sönderfallande Higgsboson.

¹Hur det egentligen fungerar blir först någorlunda vettigt då det formuleras matematiskt - huvudsaken är att om Higgsfältets existens påvisas stärks den matematiska formuleringen av standardmodellen väsentligt. En relativt okomplicerad introduktion till problemet ges av B.R. Martin, *Nuclear and Particle Physics, An Introduction* (Wiley, andra upplagan), och en lite mer ingående förklaring finns i B.R. Martin och G.P. Shaw, *Particle Physics* (Wiley, tredje upplagan).

Tyvärr är signalerna för de båda möjligheterna identiska. Däremot sker de flesta 'icke-Higgsrelaterade' sönderfallen - bakgrundsprocesserna - med en viss teoretiskt förutsägbar frekvens, vilket gör det möjligt att beräkna en förväntad bakgrundskurva.



Figur 2: Antal uppmätta sönderfall till två fotoner som funktion av deras energi. Det syns en tydlig avvikelse från den kontinuerliga bakgrundssönderfallskurvan vid den totala fotonmassan 125 GeV, vilket antyder att signalerna kommer från ett Higgssönderfall. Dock är inte $\gamma\gamma$ -kanalens mätningar ensamma tillräckliga för att fastställa att det inte bara är en slumpmässig avvikelse.

4.2 Sökkanaler och sannolika sönderfall

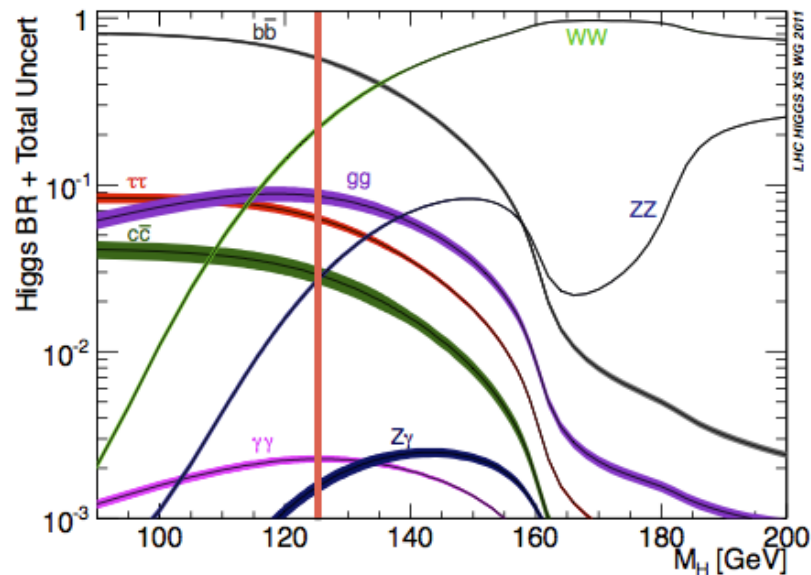
Vid betraktande av figur 2 söks avvikelser från bakgrundskurvan. Om Higgsbosonen varit närvarande bör detta bara synas vid kollisioner där sönderfallsprodukterna har en energi motsvarande en specifik massa. På så vis påvisas inte bara partikelns existens, utan även dess okända massa.

De mest intressanta sökkanalerna är

$$H^0 \rightarrow \gamma\gamma, H^0 \rightarrow Z^0 Z^0 \text{ och } H^0 \rightarrow W^+ W^-.$$

I fallet W^+W^- beror det på den höga sannolikheten för just ett sådant utfall. För höga massor hos Higgsbosonen - högre än dubbla massan hos W^\pm -bosonen - är sannolikheten för W^+W^- -sönderfallet överlägset dominerande. Detta har använts för att kunna utesluta Higgsmassor mellan cirka 140 och 190 GeV [7].

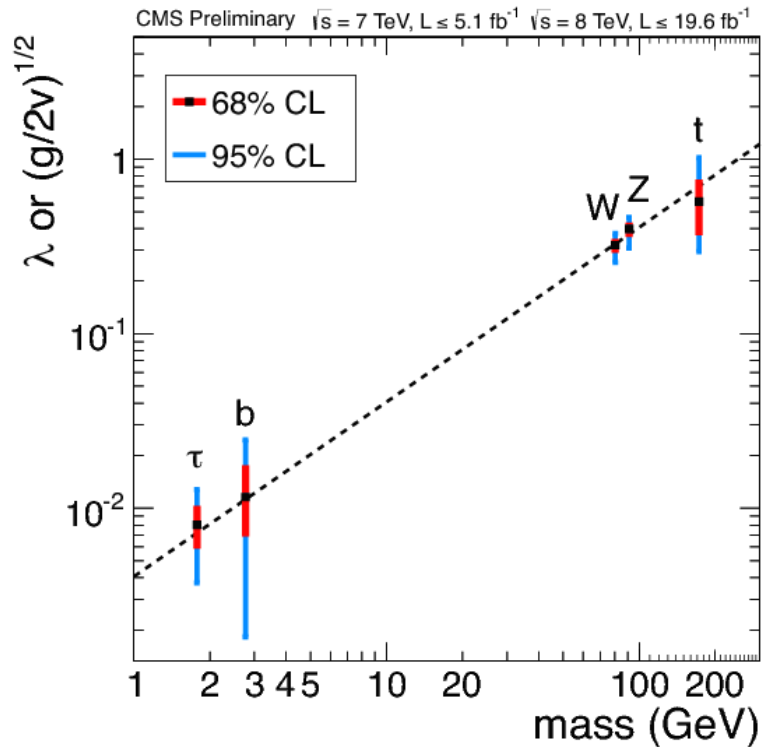
W^+W^- ger dock inte alls en lika tydlig signal som Z^0Z^0 och $\gamma\gamma$ gör. Möjligheten att näst intill exakt mäta energin hos de två sistnämnda slutprodukterna, där Z^0Z^0 i sin tur sönderfaller till fyra leptoner, gör båda kanalerna till goda kandidater för att upptäcka Higgsbosonen. En ytterligare fördel hos $\gamma\gamma$ -kanalen är att bakgrunds-signalerna - trots att de är höga - kan mätas och inte behöver beräknas, då de inte har någon struktur utan är jämnt fördelade.[7]



Figur 3: Så kallade *branching ratios* för olika hypotetiska Higgsmassor - för varje värde på massan visas de olika sannolikheterna med en viss osäkerhet (sannolikhetens 'tjocklek') att Higgsbosonen sönderfaller till olika partikel-par. Dessa summeras, för varje Higgsmassa, till 1. Higgsmassan är utmärkerad med ett rött streck vid 125 GeV.

4.3 Koppling och massa

Ur den uppmätta datan från de tre huvudsökkanalerna kan man inte bara extrahera massan hos Higgsbosonen, utan även andra egenskaper, som med vilken styrka den kopplar till andra partiklar. Enligt



Figur 4: Styrkan på kopplingen mellan Higgsbosonen och en viss partikel som funktion av massan hos partikeln. Den streckade linjen är det teoretiskt förutspådda sambandet, vilket stämmer överens med experimentella data (med osäkerheter i rött och blått).

standardmodellen skulle Higgsbosonens koppling till andra partiklar - det vill säga, med vilken styrka den interagerar med respektive partikel - vara direkt proportionell mot den andra partikeln's massa. Med andra ord, ju tyngre partikel, desto starkare kopplar den till Higgsbosonen. Och, mycket riktigt - experimentella data visar just detta (fig. 4), vilket markant stärker bevisen på att det faktiskt är standardmodellens Higgsboson man hittat.[4]

5 Slutsatser

Trots att man ganska snabbt kunde utesluta stora massspann genom såväl teori som experiment, och trots att man tidigt hade en korrekt

hypotes om att Higgsbosonens massa skulle ligga under i alla fall 500 GeV, tog det tid att samla in tillräckliga mängder statistiskt underlag för att komma upp i en rimlig konfidensgrad för att våga förklara partikeln hittad² (av experimentets natur kan man aldrig vara hundra procent säker på att man hittat Higgsbosonen). Det sistnämnda är orsaken till varför man något år innan man hittat partikeln kunde förutspå att man inom ett år antingen skulle ha hittat den eller ha uteslutit teorin om den.

Higgsäventyret är dock långt ifrån över. Nu när man väl hittat en partikel som stämmer överens med modellens krav återstår mängder av frågor - har den andra teoretiskt förutspådda egenskaper? Portaler till ny forskning öppnas också - teorier om så kallad *supersymmetri* förutsäger inte bara en utan flera Higgspartiklar. Det finns med andra ord jättemycket roligt kvar att forska om!

²För att vetenskapligt sett ha fastställt att det faktiskt är Higgsbosonen man hittat krävs en signifikansnivå på fem standardavvikelse, eller mindre än $2 \cdot 10^{-7}$ sannolikhet att hypotesen är felaktig.

Referenser

- [1] B.R. Martin, *L^AT_EX: Nuclear and Particle Physics*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 2nd Edition, 2009.
- [2] B.R. Martin, G. Shaw, *L^AT_EX: Particle Physics*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 3rd Edition, 2008.
- [3] R. Harris, *L^AT_EX: Modern Physics*. Pearson New International Edition. Harlow: Pearson Education Limited, 2nd Edition, 2014.
- [4] arXiv:1307.1427v1 [hep-ex], *L^AT_EX: Measurements of Higgs boson production and couplings*. URL: <http://arxiv.org/pdf/1307.1427v1.pdf>, 2013.
- [5] ScienceDirect, *L^AT_EX: Physics Letters B*. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.physletb.2012.08.020>, 2012.
- [6] Matt Strassler, *L^AT_EX: Decays of the Standard Model Higgs*. URL: <http://profmattstrassler.com/articles-and-posts/the-higgs-particle/the-standard-model-higgs/decays-of-the-standard-model-higgs/>, 2012.
- [7] Matt Strassler, *L^AT_EX: Seeking and Studying the Standard Model Higgs Particle*. URL: <http://profmattstrassler.com/articles-and-posts/the-higgs-particle/the-standard-model-higgs/seeking-and-studying-the-standard-model-higgs-particle/>, 2012.
- [8] Matt Strassler, *L^AT_EX: A Lightweight Standard Model Higgs Particle*. URL: <http://profmattstrassler.com/articles-and-posts/the-higgs-particle/why-is-it-hard-to-find-the-higgs-particle/a-lightweight-standard-model-higgs-particle/>, 2012.